

Boden und Klima

Klimawirkung der biologischen Bodenbewirtschaftung

Die Landwirtschaft spielt im Klimawandel eine bedeutende Rolle. Als Verursacherin von Klimagasen trägt sie einerseits zur globalen Erwärmung bei, verfügt aber andererseits auch über ein grosses Potenzial zur Minderung des Klimawandels. Gleichzeitig wird die Landwirtschaft durch die negativen Auswirkungen der Klimaveränderungen belastet.

Der Biolandbau stellt eine Möglichkeit zur Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel dar. Biologisch bewirtschaftete Böden geben weniger klimaschädliches Lachgas ab als konventionell bewirtschaftete Äcker. Die vielfältigeren und aktiveren Mikroorganismen in den Bioböden können zudem zu einer besseren Anpassungsfähigkeit der Biokulturen an klimatisch bedingte Stresssituationen beitragen. Mit der Humuswirtschaft können Biobetriebe den im Boden gespeicherten Kohlenstoff erhalten und steigern. Reduzierte Bodenbearbeitung kann zu einer zusätzlichen Anreicherung von Kohlenstoff im Boden führen.



Landwirtschaft – wichtige Akteurin im Klimawandel

Anstieg des Kohlenstoffs in der Luft

Der Kohlenstoff in der Atmosphäre ist neben anderen Treibhausgasen (THG) dafür verantwortlich, dass auf der Erde eine mittlere Jahrestemperatur von +15 °C herrscht und das Leben in der bekannten Form möglich ist. Je mehr THG vorhanden sind, desto mehr erwärmen sich die Erdoberfläche und die Atmosphäre. In den letzten 250 Jahren führte der menschengemachte Ausstoss von THG zu einem Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration von 280 ppm auf aktuell 405 ppm. Damit einher geht eine Steigerung der durchschnittlichen globalen Jahrestemperatur um 1 °C (bis 2017). In der Schweiz verzeichnen wir im gleichen Zeitraum sogar einen Anstieg um 2 °C!

Hohe Emissionen der Landwirtschaft

Direkt verursacht die Landwirtschaft weltweit 11,2 % der THG-Emissionen^[1]. Rechnet man aber

die Emissionen hinzu, die für die Bereitstellung der landwirtschaftlichen Betriebsmittel wie chemische Düngemittel und Pflanzenschutzmittel, sowie die Emissionen, die durch Rodungen von Urwald zur Futtermittelerzeugung verursacht werden, stammen 21 % bis 37 % der weltweiten THG-Emissionen aus der Landwirtschaft, bzw. aus dem globalen Ernährungssystem^[2]. Im Jahr 2018 lag der Anteil der Landwirtschaft in der Schweiz bei 12,8 % der gesamten THG-Emissionen^[3]. Abb. 2 auf Seite 3 zeigt die Verteilung der Emissionen der Schweizer Landwirtschaft im Jahr 2015^[4]. Die Grafik berücksichtigt auch die Emissionen, die durch Landnutzungsänderungen, Treib- und Brennstoffe, sowie die Vorleistungen zur Produktion von Düngemitteln etc. verursacht werden. Dem Sektor Landwirtschaft werden offiziell nur die grünen Bereiche zugeordnet.

Treibhausgase: Die wichtigsten THG der Erdatmosphäre sind Wasserdampf, Kohlendioxid (CO₂), Ozon (O₃), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O). CO₂, CH₄ und N₂O sind die THG, die durch menschliche Aktivitäten stark beeinflusst werden, während die Konzentrationen von Wasserdampf und Ozon langfristig stabil sind, bzw. nur indirekt durch den Menschen beeinflusst werden. Von den globalen THG-Emissionen aus der Landwirtschaft entfallen 46% auf N₂O, 45% auf CH₄ und 9% auf CO₂.

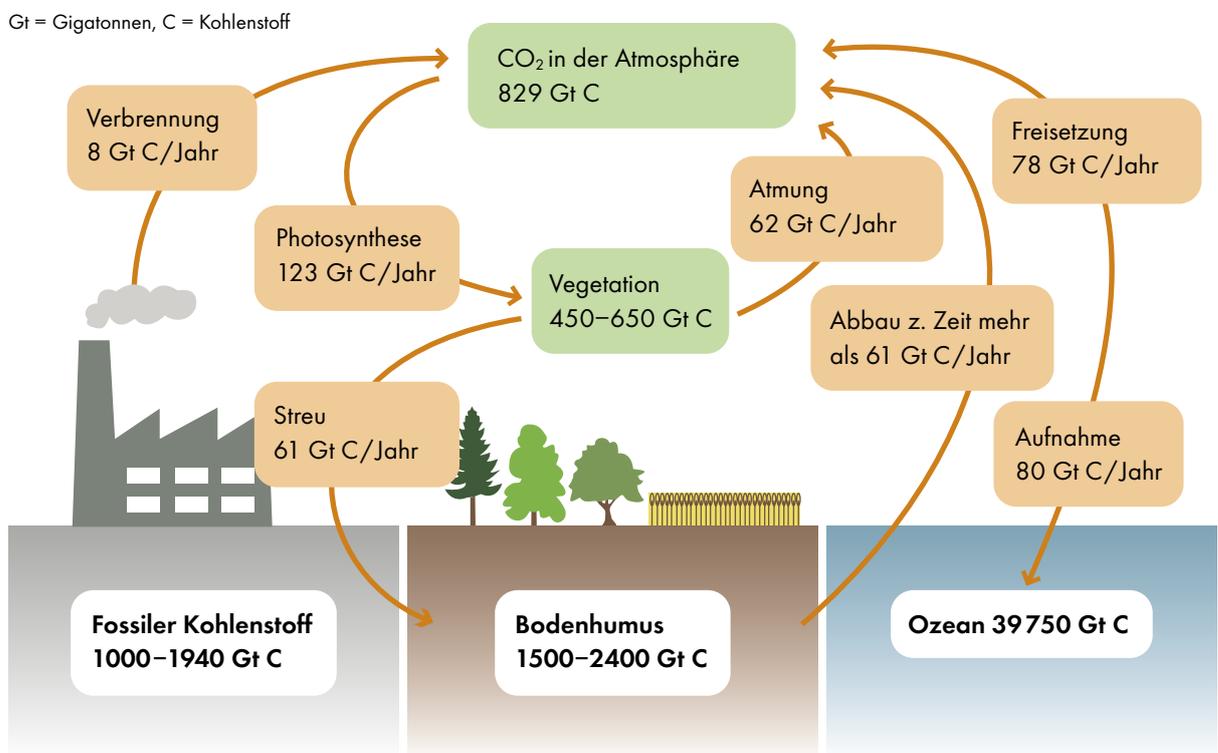
Fluorkohlenwasserstoffe sind die einzigen THG, die nur durch menschliche Aktivität erzeugt werden. Sie kommen nur in geringen Konzentrationen in der Atmosphäre vor, haben aber aufgrund ihres extrem hohen Erwärmungspotentials (bis zu 14 800 mal höher als CO₂) einen deutlichen Einfluss auf das Klima. CO₂ stammt aus Abbau- und Veratmungsprozessen der lebenden Biomasse sowie aus Verbrennungen im Rahmen menschlichen Aktivitäten; CH₄ vornehmlich aus Abbauprozessen in Böden unter Luftabschluss (Nassreisenaub und Mooregebiete) und aus anaeroben Prozessen in den Mägen von Wieder-

käuern, und N₂O entsteht insbesondere während und kurz nach der Ausbringung von stickstoffhaltigen (Hof-)düngern.

CO₂-Äquivalente: Die verschiedenen THG CO₂, CH₄ und N₂O haben unterschiedliche Erwärmungspotenziale. Damit man die Wirksamkeit aller THG vergleichen kann und weil CO₂, über alle Sektoren hinweg das mit Abstand wichtigste THG ist, wird dessen Potenzial gleich 1 gesetzt. Demnach hat CH₄ ein 24-fach und N₂O ein 298-fach höheres Potenzial zur Erwärmung der Atmosphäre als CO₂. Die unterschiedliche Lebensdauer der THG in der Atmosphäre wird in dieser Potenzialberechnung auch berücksichtigt.

Gigatonne (Gt): Gigatonne ist eine weitverbreitete Einheit für THG-Mengen. Eine Gigatonne sind 1.000.000.000 Milliarde Tonnen und entspricht 1×10¹⁵ Gramm oder 1 Billionen Gramm. Ein anderer Begriff für die gleiche Größenordnung ist 1 Petagramm (Pg). Wir verwenden die Begriffe Humus und organische Bodensubstanz (OBS) synonym, basierend auf dem gemessenen organischen Kohlenstoffgehalt des Bodens multipliziert mit 1.72.

Abb. 1: Vereinfachte Darstellung des globalen Kohlenstoffkreislaufs



Humusauf- und -abbau spielen in den für das Klima relevanten Kohlenstoffflüssen eine wesentliche Rolle. Der CO₂-Gehalt der Atmosphäre nimmt zurzeit jährlich um 3,3 Gt C zu. Der C-Austausch mit den Karbonatgesteinen, dem mit Abstand größten Kohlenstoffspeicher, geht wesentlich langsamer und ist deshalb hier nicht aufgeführt. Quelle: Grafik nach Heinz Flessa angepasst durch FiBL, Daten IPCC^[2]

Der Boden – ein wichtiger CO₂-Speicher

Im Jahr 2018 wurden weltweit, vor allem durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern, 34 Gigatonnen CO₂-Äquivalente emittiert. Diese jährlichen Emissionen sind im Kontext des globalen Kohlenstoffkreislaufs eigentlich gering (Abb. 1 auf Seite 2). Insgesamt befinden sich nämlich 75 Mio. Gigatonnen Kohlenstoff auf der Erde. Davon ist jedoch der grösste Anteil (99,94 %) in Kalkgesteinen gebunden. Nur 0,05 % sind in den Ozeanen und 0,0037 % in Böden gebunden. Böden enthalten doppelt so viel Kohlenstoff wie die Atmosphäre und die terrestrische Biomasse zusammen, die jeweils 0,001 % ausmachen (Abb. 1). Um die Emissionen aus den verschiedenen Quellen und Treibhausgasen zu vergleichen, wird CO₂ als einheitliche Währung verwendet und oft als CO₂-Äquivalent (CO₂-eq.) ausgedrückt.

Der Mensch kann nur die Kohlenstoffgehalte von Atmosphäre, Boden und Vegetation beeinflussen. In diesem Zusammenhang spielt die Landwirtschaft eine wichtige Rolle, um den Klimawandel abzumildern. Durch die Anreicherung von Humus kann der Boden Kohlenstoff speichern. Kleine Änderungen der Kohlenstoffmenge im Boden haben grosse Auswirkungen aufs Klima.

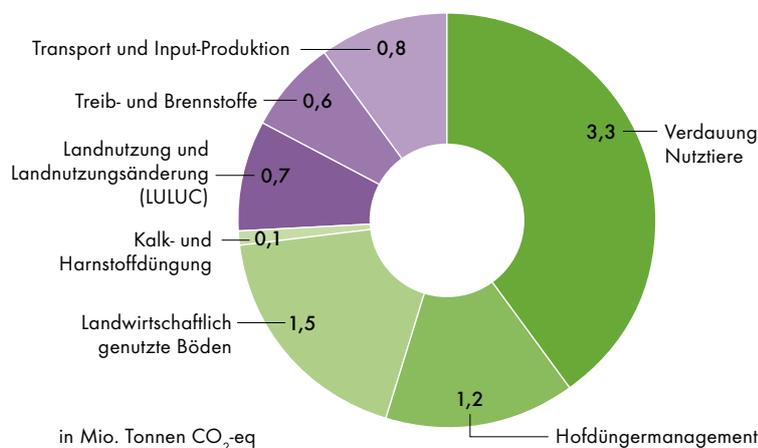
Darüber hinaus hält die Landwirtschaft aber noch weitere Optionen bereit, welche die Dynamik des menschengemachten Klimawandels beeinflussen können. Die landwirtschaftliche Produktion könnte dadurch an den Wandel angepasst werden und handlungsfähig bleiben.

Biolandbau: nachweislich klimafreundlich

Langzeitversuche wie der DOK-Versuch in Therwil / CH, der Bodenbearbeitungsversuch in Frick / CH, sowie Literaturstudien (Meta-Analysen) und Ergebnisse aus dem EU Horizon 2020-Projekt iSQA-PER, wie auch Betriebsvergleiche von Agroscope, lassen bezüglich der Klimawirkung des Biolandbaus folgenden Schlüsse zu:

- Biologisch wirtschaftende Betriebe mit Klee-gras-anbau, Mist und Gülle aus der Viehhaltung bieten gute Voraussetzungen für die Erhaltung oder Steigerung des Humusgehaltes im Boden.
- Reduzierte Bodenbearbeitung kann auch im biologischen Landbau die Humusmenge im Boden zusätzlich erhöhen.

Abb. 2: Komplette, sektorenübergreifende Treibhausgasemissionen der Schweizer Landwirtschaft im Jahr 2015



Die Emissionen aus der Verdauung der Nutztiere (Methan von Wiederkäuern), dem Hofdüngermanagement, den landwirtschaftlich genutzten Böden (Dünger und Nutzung von Moorböden) sowie aus der Kalk- und Harnstoffdüngung werden im nationalen Treibhausgasinventar im Sektor Landwirtschaft rapportiert^[4].



Der Biolandbau trägt mit dem Aufbau des Humusgehaltes im Boden aktiv zur Verbesserung der Fruchtbarkeit, Wasserhaltekapazität und Struktur des Bodens bei. Er sichert damit die langfristige Leistungsfähigkeit der Böden, verbessert das Wasserangebot für die Kulturen und reduziert Bodenverluste durch Erosion.

- Dank niedrigeren Stickstoffgaben und einer besseren Bodenfruchtbarkeit sind die Lachgasemissionen im Biolandbau um 40 % tiefer als im konventionellen Anbau.
- Dank vielfältigeren und aktiveren mikrobiellen Gemeinschaften im Boden mineralisieren biologisch bewirtschaftete Böden bei Trockenstress effizienter Stickstoff und sind somit besser an den Klimawandel angepasst.
- Pro Ernteeinheit benötigten die biologischen Anbauverfahren im DOK-Versuch 19 % weniger Energie als die konventionellen Verfahren. Bezogen auf die Fläche waren es sogar 30–50 % weniger.

Höhere Kohlenstoffbindung im Humus

In einer umfassenden Literaturstudie konnte gezeigt werden, dass biologisch bewirtschaftete Böden 170 kg bis 450 kg mehr Kohlenstoff pro Hektar und Jahr im Humus speichern als konventionell bewirtschaftete Böden^[5]. Der Unterschied resultiert vor allem aus dem mehrjährigen Anbau von Klee-gras und der organischen Düngung.

Ein höherer Humusgehalt im Boden erhöht die Wasserinfiltration und -speicherfähigkeit des Bodens, sowie die Stabilität der Bodenaggregate, was auch der Erosion von Böden vorbeugt^[6]. Ausserdem verbessert der dynamische Teil des Humus über biologische Mechanismen die Pflanzengesundheit^[7,8].

Analysen von 2000 Bodenproben in der 40-jährigen Laufzeit des DOK-Versuchs bei Basel, dem weltweit bisher längsten Vergleichsversuch zwischen biologischen und konventionellen Anbausystemen^[9,10], zeigen, dass:

- der Humusgehalt bei biologisch-dynamischem Anbau mit Kompostanwendung leicht ansteigt.
- der Humusgehalt im konventionellen Anbau mit rein mineralischer Düngung deutlich abnimmt.
- die Humusgehalte im konventionellen Anbau mit gemischt organischer und mineralischer Düngung und im organisch-biologischen Anbau annähernd stabil bleiben.

Die in den biologischen Systemen über sechs Fruchtfolgeperioden und alle Kulturen gemittelten und im Vergleich zum konventionellen System um 20 % geringeren Erträge, werden mit deutlich geringerem Düngemitelesatz und ohne chemisch-synthetische Pestizide erzielt.

Reduzierte Bodenbearbeitung als Potenzial

Auf den Pflug zu verzichten, ist nicht nur aus Gründen des Bodenschutzes gut; reduzierte Bodenbearbeitung hat auch Potenzial zum Klimaschutz. Ein weitgehender Ersatz des tiefen Pflügens durch flachere und meist nicht-wendende Bodenbearbeitung im Biolandbau kann den Humusgehalt deutlich über das Niveau der biologischen Bewirtschaftung mit Pflug heben^[11]. Im 13-jährigen Bodenbearbeitungsversuch des FiBL in Frick konnte der Humusgehalt in den oberen 50 cm um 8 % erhöht werden. Über die gesamte Laufzeit des Versuchs stieg der Humusgehalt unter reduzierter Bodenbearbeitung bei gleichbleibenden Treibhausgasemissionen um rund 700 kg C pro Hektar und Jahr^[12,13].

Eine Studie zu Untersuchungen auf 60 Betrieben im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms «NFP 68 Ressource Boden», bei denen Flächen von Biobetrieben mit Flächen von konventionellen und No-till-Betrieben verglichen wurden, zeigen, dass



Im direkten Vergleich: links traditionelle Bodenbearbeitung mit dem Pflug und rechts reduzierte Bodenbearbeitung mit dem Grubber.



Der Humusgehalt im Boden kann sowohl durch eine biologisch-dynamische Bewirtschaftung als auch durch reduzierte Bodenbearbeitung gesteigert werden.

die biologische Bewirtschaftung den Humusaufbau ebenso gut fördert wie No-till unter konventioneller Bewirtschaftung^[14]. No-till-Betriebe verzichten komplett auf den Pflug, bekämpfen das Unkraut aber chemisch mit Round up, einem glyphosathaltigen Herbizid. Im Vergleich zu den No-till- und konventionellen Betrieben weisen die Felder der Biobetriebe ein aktiveres und komplexeres Bodenleben auf^[15].

Niedrigere Lachgasemissionen im Biolandbau

Eine Auswertung der weltweit verfügbaren Literatur über N₂O-Emissionen im Feld zeigt, dass biologisch bewirtschaftete Böden zwar pro Fläche weniger N₂O ausstossen als konventionell bewirtschaftete Böden, pro Ertragseinheit aber leicht mehr^[16]. Der Metaanalyse zur Folge würde ein Mehrertrag von 9 % in der biologischen Produktion ausreichen, um die ertragsbezogenen N₂O-Emissionen auf das Niveau der konventionellen Produktion zu reduzieren.

Eine Studie des FiBL im 40-jährigen DOK-Versuch^[16] zeigt, dass biologisch und biodynamisch bewirtschaftete Böden flächenbezogen im Mittel 40 % geringere N₂O-Emissionen aufweisen als konventionell bewirtschaftete Böden. Die Gründe dafür sind eine geringere N-Düngung und eine bessere Bodenqualität in den biologischen Anbauverfahren. Besonders niedrig sind die N₂O Emissionen im biodynamischen Anbau. Dort wurden im Vergleich zum konventionellen Anbau auch ertragsbezogen ein Drittel weniger N₂O Emissionen gemessen^[17].



Bestimmung der Treibhausgasemissionen im Ackerbau. Mithilfe von manuellen Kammern, die regelmässig auf einen im Boden versenkten Ring montiert werden, können die vom Boden emittierten Treibhausgase gesammelt, nach einer kurzen Zeit mit einer Spritze entnommen (Bild) und anschliessend im Labor an einem Gaschromatographen gemessen werden.

Bessere Anpassungsfähigkeit von Bioböden

Der Klimawandel bringt wahrscheinlich mehr Starkregenereignisse und Trockenperioden mit sich. Forschungsergebnisse des FiBL zeigen, dass biologisch bewirtschaftete Böden besser an diese Herausforderungen angepasst sind als konventionelle.

So weisen die Bioböden im DOK-Versuch infolge der höheren Humusgehalte eine bessere Aggregatstabilität auf^[18]. Dadurch sind diese Böden besser gegen Erosion infolge von Starkregenereignissen geschützt.

In einer Literaturstudie wurde nachgewiesen, dass die mikrobielle Aktivität in biologisch bewirtschafteten Böden deutlich höher ist als in konventionell bewirtschafteten, unter anderem auch in Bezug auf die Proteaseaktivität^[19]. Die Protease ist ein Enzym, welches den ersten Schritt in der Mineralisierung von organisch gebundenem Stickstoff katalysiert. In einem Topfexperiment mit Böden aus dem DOK-Versuch konnten Forschende vom FiBL zeigen, dass die Böden aus dem biologisch-organischen Anbau bei Trockenheit 30 % mehr Stickstoff aus einer Gründüngung mineralisierten als die Böden im konventionellen Anbau^[20]. Dabei konnte die bessere Mineralisierungsleistung auf eine erhöhte Vielfalt der Mikroorganismen in den biologisch bewirtschafteten Böden zurückgeführt werden. Eine kürzlich publizierte Studie bestätigt: Extensive Be-

wirtschaftung führt dank vielfältigeren mikrobiellen Gemeinschaften zu einer besseren Anpassung an Trockenstress in Acker- und Grasländern^[21]. Weitere FiBL-Studien haben gezeigt, dass bakterielle und pilzliche Impfmittel insbesondere im mediterranen und trockenen subtropischen Klima die Erträge in low-input Systemen deutlich steigern konnten.^[22,23,24]

Höhere Energieeffizienz der Bioproduktion

Die Effizienz der Nutzung vorhandener Ressourcen ist ein wichtiger Indikator für die Nachhaltigkeit eines Produktionssystems. Zur Berechnung der Energieeffizienz wird neben den direkten Energiebeiträgen (z. B. Treibstoff für Traktoren) auch die indirekte Energie berücksichtigt, die zur Erzeugung der zugekauften Produktionsmittel (z. B. Dünger oder Pflanzenschutzmittel) benötigt wird.

Biologische Anbaumethoden im DOK-Versuch brauchen zwar etwas mehr Energie für Infrastruktur und Maschinen als die konventionelle Bewirtschaftung (z. B. für maschinelles Hacken und Striegeln), dafür jedoch deutlich weniger Energie für Dünger und Pestizide. Im Mittel von 20 Jahren brauchten die biologischen Verfahren pro Ernteeinheit 19 % weniger Energie^[25]. Auf die Fläche bezogen waren es 30–50 % weniger.



Bioböden mit einem höheren Humusgehalt und einer verbesserten Aggregatstabilität können besser mit durch Klimawandel hervorgerufenen Extremwetterereignissen umgehen. Zum Vergleich zwei Bilder aus dem DOK-Versuch: links konventioneller Anbau ohne Mistgabe und rechts bio-dynamischer Anbau mit Kompostmistgabe.

Schlussfolgerungen

Klimamindernde Potenziale besser nutzen

Als Schlussfolgerung ergibt sich, dass durch die biologische Bewirtschaftung der Böden die Auswirkungen der Landwirtschaft auf das Klima vermindert werden und dass biologische Anbausysteme besser an den Klimawandel angepasst sind.

Reduzierte Bodenbearbeitung unter Biobedingungen (ohne Herbizide) ist eine Perspektive, um den Biolandbau noch klimaschonender zu machen. Intensive Forschung ist aber nötig, um die Unkrautregulierung noch effizienter zu gestalten^[11,26]. Ein grosses Potenzial liegt insbesondere in den Techniken der Präzisionslandwirtschaft.

Der relative Vorteil der Biolandwirtschaft in Bezug auf die Klimawirkung hängt neben der Stickstoffdüngung stark von der Flächenproduktivität ab. Hier weist der Biolandbau aufgrund der geringeren Erträge einen höheren Flächenbedarf auf. Deshalb ist die Weiterentwicklung der Biolandwirtschaft durch verbesserte Sorten (Züchtung), einen effektiveren biologischen Pflanzenschutz und die Rezyklierung von Nährstoffen aus urbanen Gebieten wie Kompost und Biogärgut zentral. FiBL Forschende haben zudem gezeigt, dass eine Ausweitung der Biolandwirtschaft ökologisch grosse Vorteile bringt, weil bestehendes Ackerland besser vor Erosion geschützt wird. Weltweit gehen jährlich 10 Mio. Hektar Ackerland durch Wind- und Wassererosion endgültig verloren. Eine weitere Ausdehnung der Biolandwirtschaft ist deshalb auch wichtig für den Bodenschutz^[27].

Für einen effektiven Bodenschutz braucht es aber weitere Massnahmen, wie z. B. geringere Lebensmittelverluste und weniger Futterproduktion in Form von Getreide, Mais und Soja auf dem Acker (bzw. einen geringeren Fleischkonsum), um die globale Ackerfläche bei gesteigerter Biolandwirtschaft nicht ausdehnen zu müssen^[28]. Insgesamt betrachtet leistet die biologische Landwirtschaft bereits jetzt einen wichtigen Beitrag zum Schutz des Klimas und ist zudem besser an den stattfindenden Klimawandel angepasst.

FiBL Forschung: Ausbringung von Hofdünger im Bodenbearbeitungsversuch in Frick. Die THG-Emissionen werden zu Ereignissen gemessen, bei denen Emissionsspitzen zu erwarten sind.

Noch offene Fragen

In mehreren Bereichen besteht noch Bedarf nach wissenschaftlicher Abklärung.

Im Bereich Humus und Bodenqualität laufen aktuell Projekte zur Stabilisierung des Humus, zur optimalen Düngung für den Humusaufbau und den optimalen Humusgehalt eines bestimmten Bodens unter Berücksichtigung der Pflanzenernährung.

Im Bereich THG-Emissionen besteht Bedarf an Emissionsmessungen über gesamte Fruchtfolgen und während der Hofdüngerlagerung und -ausbringung, sowie zur Methanproduktion in der Tierhaltung.

Im politischen Bereich wird über die optimalen Werkzeuge zur Förderung der Landwirtschaft vor dem Hintergrund von Ernährungssicherheit, Klimaschutz, Biodiversität und Ressourceneffizienz geforscht.



Referenzen

- 1 Tubiello et al. (2015). The Contribution of Agriculture, Forestry and other Land Use activities to Global Warming, 1990-2012. *Global Change Biology* 21, 2655-2660.
- 2 IPCC, (2019). *Climate Change and Land - Summary for Policymakers*.
- 3 FOEN (2020). *Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990-2018: National Inventory Report and reporting tables (CRF). Submission of April 2020 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol*. Federal Office for the Environment, Bern.
- 4 AgroCleanTech, (2019). Übersicht der landwirtschaftlichen Treibhausgase inkl. Vorleistungen, Treib- und Brennstoffen und Bodenkohlenstoff (LULUC) 2015. https://www.agrocleantech.ch/images/Klimaschutz/Treibhausgasemissionen_Landwirtschaft/THG_2015_Kreisdiagramm_gross.png.
- 5 Gattinger et al. (2012). Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proceedings of the National Academy of Science*, 109: 18226-18231.
- 6 Bünemann, et al. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120, 105-125.
- 7 Bongiorno et al. (2019a). Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators* 99, 38-50.
- 8 Bongiorno et al. (2019b). Soil suppressiveness to *Pythium ultimum* in ten European long-term field experiments and its relation with soil parameters. *Soil Biology & Biochemistry* 133, 174-187.
- 9 Mäder et al. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* 296, 1694-1697.
- 10 Fliessbach et al. (2007). Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agriculture Ecosystems & Environment* 118, 273-284.
- 11 Cooper 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: 22.
- 12 Krauss et al. (2017). Impact of reduced tillage on greenhouse gas emissions and soil carbon stocks in an organic grass-clover ley - winter wheat cropping sequence. *Agriculture Ecosystems & Environment* 239, 324-333.
- 13 Krauss et al. (2020). Enhanced soil quality with reduced tillage and solid manures in organic farming – a synthesis of 15 years. *Scientific Reports* volume 10, Article
- 14 Büchi, L., Walder, F., Banerjee, S., Colombi, T., van der Heijden, M.G.A., Keller, T., Charles, R., Six, J., 2022. Pedoclimatic factors and management determine soil organic carbon and aggregation in farmer fields at a regional scale. *Geoderma* 409, 115632.
- 15 Banerjee et al. (2019). Agricultural intensification reduces microbial network complexity and the abundance of keystone taxa in roots. *The ISME journal*, doi.org/10.1038/s41396-019-0383-2.
- 16 Skinner et al. (2014). Greenhouse gas fluxes from agricultural soils under organic and non-organic management – A global meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 468–469: 553-563.
- 17 Skinner et al. (2019). The impact of long-term organic farming on soil-derived greenhouse gas emissions. *Scientific reports*, 9(1), 1702.
- 18 Siegrist et al. (1998). Does organic agriculture reduce soil erodibility? The results of a long-term field study on loess in Switzerland. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 69, 253-264.
- 19 Lori et al. (2017). Organic farming enhances soil microbial abundance and activity – A meta-analysis and meta-regression. *PLoS one* 12, e0180442.
- 20 Lori et al. (2018). Distinct nitrogen provisioning from organic amendments in soil as influenced by farming system and water regime. *Frontiers in Environmental Science*, 1-14.
- 21 Lori et al. (2020). Compared to conventional, ecological intensive management promotes beneficial proteolytic soil microbial communities for agro-ecosystem functioning under climate change-induced rain regimes. *Scientific Reports* volume 10, Article number: 7296
- 22 Mäder et al. (2011). Inoculation of root microorganisms for sustainable wheat-rice and wheat-black gram rotations in India. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(3), pp.609-619.
- 23 Schütz et al. (2018). Improving crop yield and nutrient use efficiency via biofertilization—A global meta-analysis. *Frontiers in plant science*, 8, p.2204.
- 24 Mathimaran et al. (2020). Intercropping transplanted pigeon pea with finger millet: Arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria boost yield while reducing fertilizer input. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, p.88.
- 25 Nemecek et al. (2011). Life cycle assessment of Swiss farming systems: I. Integrated and organic farming. *Agricultural systems*, 104(3), 217-232.
- 26 Armengot et al. (2015). Long-term feasibility of reduced tillage in organic farming. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 339-346.
- 27 Bai et al. (2018). „Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China.“ *Agriculture, Ecosystems & Environment* 265: 1-7.
- 28 Muller et al. (2017). Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *Nature communications*, 8(1), 1290.

Impressum

Herausgeber: Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL
Ackerstrasse 113, Postfach 219, CH-5070 Frick
Tel. 062 865 72 72, info.suisse@fibl.org, www.fibl.org

Autorinnen und Autoren: Paul Mäder, Markus Steffens, Maike Krauss, Andreas Fliessbach, Hans-Martin Krause, Colin Skinner, Martina Lori, Giulia Bongiorno, Matthias Klais, Christine Arncken, Hansueli Dierauer, Else Bünemann, Adrian Müller, Urs Niggli, Andreas Gattinger

Redaktion: Vanessa Gabel, Jeremias Lütold (FiBL)

Gestaltung: Brigitta Maurer (FiBL)

Fotos: Thomas Alföldi (FiBL Schweiz): S. 3, S. 5(1), Hansueli Dierauer (FiBL Schweiz): S. 4, Andreas Fliessbach (FiBL Schweiz): S. 6, Matthias Klais (FiBL Schweiz): S. 1, Else Bünemann (FiBL Schweiz): S. 5 (2), Alfred Berner (FiBL Schweiz): S. 7

FiBL Best. Nr. 2517 ISBN - Download 978-3-03736-160-3

Das Merkblatt kann von shop.fibl.org kostenlos abgerufen werden.

© FiBL 2022