

Der DOK-Versuch

Vergleich von biologischen und konventionellen Anbausystemen
über 45 Jahre





Der DOK-Versuch untersucht seit 1978 die Unterschiede zwischen biologisch und konventionell bewirtschafteten Ackerkulturen. Dieses Dossier fasst die wichtigsten Erkenntnisse aus mehr als 40 Jahren Forschung kurz und verständlich zusammen und richtet sich damit an interessierte Fachleute aus der Praxis, Beratung und Wissenschaft.

Im DOK-Versuch werden die landwirtschaftlichen Systeme Biologisch-dynamisch (BIODYN), Biologisch-organisch (BIOORG) und Konventionell (CONFYM) miteinander verglichen. Damit simuliert der Versuch Betriebe mit Ackerbau und Viehhaltung. Hinzu kommt das ausschließlich mineralisch gedüngte, konventionelle System CONMIN. Dieses repräsentiert eine viehlose Landwirtschaft. In den Systemen BIODYN, BIOORG und CONFYM werden jeweils zwei Verfahren mit unterschiedlicher Düngeintensität untersucht.

Die Ergebnisse der Forschung beziehen sich auf fünf Kulturarten, die aktuell abwechselnd innerhalb der siebenjährigen Fruchtfolgeperioden angebaut werden: Silomais, Soja, Winterweizen, Kartoffel und Kleegras. Das Dossier stellt Ergebnisse aus den Bereichen Ertrag, Bodenqualität, Nährstoffversorgung, Biodiversität und Klima vor.

Inhalt

Vorwort	3
Spitzenforschung mit Praxisbezug	4
Der Standort	7
Der Versuch	9
Ertrag der Kulturen	17
Nährstoffdynamik	25
Bodenqualität	31
Biodiversität	37
Klimawandel	43
Dank	45
Publikationen aus dem DOK-Versuch	46

Lesehilfe

Dieses komplexe Thema lässt sich nicht ohne Abkürzungen und Fachbegriffe darstellen. Leser*innen finden deshalb auf Seite 51 ein Abkürzungs- und Erläuterungsverzeichnis. In Tabellen und Grafiken werden unterschiedliche Kleinbuchstaben genutzt, um statistische Unterschiede deutlich zu machen.

Vorwort

Inspirierende und verlässliche Ergebnisse im Dienst einer nachhaltigen Ernährungssicherung

Selten wurden wissenschaftliche Versuche auf eine so lange Dauer ausgelegt wie der DOK-Versuch. Aber gerade im Hinblick auf viele Forschungsfragen ist diese Kontinuität besonders wertvoll, weil einige Ergebnisse erst nach einer längeren Zeit richtig relevant werden. Das gilt beispielsweise auch für langfristige Beobachtungen der Auswirkungen des Klimawandels. Kurzfristige Ergebnisse sind zwar relevant, aber nicht auf die Langzeitauswirkungen des äusseren Einflusses ausgerichtet, es braucht die Wirkung der Zeit. Im DOK-Versuch gibt es ab dem ersten Versuchsjahr durch die Bewirtschaftungsmethoden bestimmte, verschiedene äussere Einflüsse und die Fragen, die sich die Forschenden stellen, entwickeln sich – je nach Untersuchungsgegenstand und gesellschaftlichen Themen – im Laufe der Jahre und Jahrzehnte weiter.

Seit seinen Anfängen vor Jahrzehnten weiss ich, dass es den DOK-Versuch gibt. Ebenso, dass er die Ergebnisse verschiedener Anbaumethoden in Bezug auf Ertrag und Ertragsfähigkeit – kurz- bis langfristig – und ihre Auswirkungen auf die Umwelt vergleicht. Der Fokus liegt dabei vor allem auf der Bodenfruchtbarkeit, dem Klima, den Nährstoffflüssen und der Biodiversität. Der DOK-Versuch ist ein Paradebeispiel einer erfolgreichen Zusammenarbeit zwischen den Eidgenössischen Forschungsanstalten – heute Agroscope – und dem FiBL. Sowohl als Forscher an der ETH wie auch später als Verantwortlicher für die Politikgestaltung am Bundesamt für Landwirtschaft und heute im Dienste der globalen Ernährungssicherheit und Ernährung beim UN Committee for World Food Security, habe ich immer wahrgenommen, dass die Ergebnisse des DOK-Versuchs zeigen, wo die Unterschiede zwischen den Produktionsmethoden «biologisch-dynamisch», «organisch-biologisch» und «konventionell» in Bezug auf aktuelle Forschungsfragen liegen und wie sich die Systeme entwickeln.

Wenn man den DOK-Versuch näher betrachtet, stellen sich aber auch viele Fragen zum Forschungsdesign an sich und zur Entwicklung der einzelnen Produktionsverfahren. Wie viel Dynamik ist vorhanden? Zum Beispiel wurde aus der ursprünglichen «konventionellen» die «integrierte Produktion». Auch innerhalb der biologischen Ausrichtung gibt es eine Dynamik, zum Beispiel mit neuen Sorten, Fruchtfolgen, Maschinen und bei der biologischen Schädlings-

regulierung. Es stellen sich interessante Fragen, nicht nur aus Sicht der Forschung, sondern auch aus der Perspektive einer nachhaltigen Ernährungssicherung und der Praxis. Die einzelnen Kapitel dieser Publikation geben Antworten auf viele dieser Fragen und bilden die Entwicklung der Versuchsanlage und der behandelten Fragestellungen ab.

Aus der Perspektive einer globalen, nachhaltigen Ernährungssicherung stellt sich konsequenterweise die Frage, inwieweit biologische Produktionsmethoden ihren Beitrag leisten. Braucht es mehr oder weniger Biolandbau, oder soll gar die ganze Landwirtschaft auf Bio umstellen? Das sind provokante Fragen, auf die es nur komplexe Antworten gibt. Sicher ist, dass der sehr hohe Anteil an Lebensmittelverlusten (nach der Ernte) und Lebensmittelabfällen (vor allem in den Haushalten) sowie der hohe Futtermittelanteil auf den Ackerflächen korrigiert werden kann und der Behauptung eines Mehrbedarfs an Fläche bei einer steigenden Bevölkerungszahl entgegensteht. Mit anderen Worten: Die Knappheit wird relativiert. Überlegungen in diese Richtung sind legitim, wenn man die Umweltauswirkungen der verschiedenen Produktionsmethoden und deren Folgekosten vergleicht, die von der Gesellschaft getragen werden.

Eine besondere Herausforderung für die beiden Forschungsinstitutionen FiBL und Agroscope ist die langfristige Finanzierung des DOK-Versuchs. Es ist sehr wichtig, hier auf die beiden genannten Dynamiken – Langzeiteffekte einerseits und Produktionsverfahren andererseits – hinzuweisen. Die erfolgreiche Einwerbung von zahlreichen Drittmitteln für den DOK-Versuch bei anderen Bundesämtern, dem Schweizerischen Nationalfonds und der EU zeigt eindrücklich, dass diese Art von Langzeitforschung für die Grundlagen- und Anwendungsforschung relevant ist. Damit ist der DOK-Versuch zu einer wichtigen nationalen und internationalen Forschungsplattform geworden.

Ich lade Sie ein, dieses Dossier zu lesen. Es ist anregend, es beeindruckt durch seine Wissenschaftlichkeit. Deswegen hat es der DOK-Versuch auch in den «Walk of Fame» der Wissenschaft geschafft: in die Zeitschrift *Science*. Möge uns der DOK-Versuch noch lange mit verlässlichen Ergebnissen beeindrucken und Orientierung geben.



Präsident Stiftungsrat
Prof. Dr. Bernard Lehmann

Spitzenforschung mit Praxisbezug

Die Frage einer umweltverträglichen und produktiven Landwirtschaft ist seit Jahrzehnten aktuell. Weltweit werden eine Vielzahl verschiedener Anbauverfahren für die ackerbauliche Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln praktiziert. Ganze Gesellschaften und Generationen diskutieren die Vor- und Nachteile von biologischen und konventionellen Anbausystemen.

Personen aus der landwirtschaftlichen Praxis, der Wissenschaft und der Politik haben die Diskussion in der Schweiz bereits in den frühen 1970er-Jahren aufgegriffen und 1978 den DOK-Versuch in Therwil, Baselland etabliert. **DOK** steht dabei für **D**ynamisch, **O**rganisch und **K**onventionell. Der Versuch untersucht die Unterschiede in den biologisch-dynamischen, biologisch-organischen und konventionellen Anbausystemen mit verschiedenen Düngeintensitäten.

Hochaktuelle Themen wie der Klimawandel und die Klimaanpassung, der Verlust der Biodiversität, das Wachstum der Weltbevölkerung und die Abhängigkeit von Rohstoffen fordern mehr denn je eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Art und Weise, wie wir Lebensmittel und Futter erzeugen.

Der DOK-Versuch vergleicht die landwirtschaftlichen Produktionssysteme jetzt bereits seit mehr als 45 Jahren und schuf so eine wissenschaftliche Grundlage für die damals wie heute kontrovers geführte Diskussion über die Chancen des biologischen Landbaus.

Wissenschaftliche Basis für politische Fragen

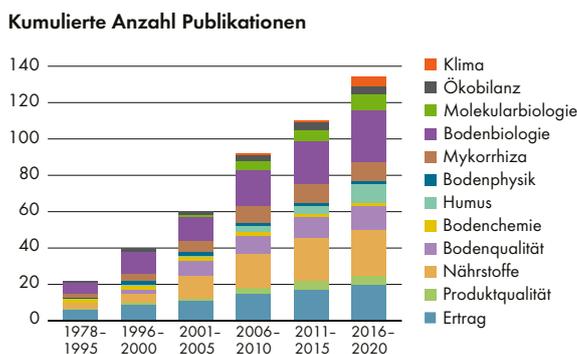
Der bisherige Höhepunkt des DOK-Versuchs war zweifelsohne eine wissenschaftliche Veröffentlichung in der Zeitschrift *Science* im Jahr 2002 über Bodenfruchtbarkeit und Biodiversität in der biologischen Landwirtschaft. Damit wurde der Biolandbau salonfähig und es wurde anerkannt, dass er Lösungsansätze für die grossen Umweltprobleme der landwirtschaftlichen Produktion bietet.

Aktuelle Forschungsprojekte im DOK-Versuch befassen sich mit den Themen Bodenqualität, Biodiversität und Klima, die aus globaler gesellschaftlicher Perspektive hochrelevant und für unsere Zukunft entscheidend sind.

National und international bedeutsam

In über 40 Jahren sind mehr als 120 wissenschaftliche Publikationen aus dem DOK-Versuch hervorgegangen, daneben Doktorarbeiten und eine Vielzahl studentischer Arbeiten (Abbildung 1). Unzählige Besucher*innen aus vielen Ländern der Welt, Landwirt*innen, Studierende, Schüler*innen, aber auch hochrangige Wissenschaftler*innen der besten Universitäten haben den Versuch besichtigt und Forschungsprojekte im DOK-Versuch realisiert.

Abbildung 1: Anzahl der Publikationen in wissenschaftlichen Journalen



Das Schweizerische Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation hat den DOK-Versuch 2015 in die Roadmap der Schweizerischen Forschungsinfrastrukturen aufgenommen. Diese sammelt nationale Versuchseinheiten mit der grössten Bedeutung. Damit ist der DOK-Versuch im Olymp der Schweizer Wissenschaften angekommen.

Der Versuch ist Teil eines zirkulären Forschungsansatzes: Offene Fragestellungen aus der Praxis werden zunächst im DOK-Feld mit modernsten Methoden untersucht. Es folgen Detailstudien im Gewächshaus und auf Praxisbetrieben. Die neuen Erkenntnisse werden wiederum in die aktuelle Feldforschung integriert. Der DOK-Versuch steht somit bei aktuellen Fragestellungen der nationalen und internationalen Agrar- und Umweltforschung für Untersuchungen im Freiland häufig an prominenter Stelle.

Dass der DOK-Versuch in der akademischen Spitzenforschung einen festen Platz hat, zeigt sich auch in der Qualität der Forschungsarbeiten und in der anhaltenden Aktualität der untersuchten Fragestellungen. Im Folgenden einige Beispiele:

- Ganze sieben Projekte im Rahmen des Nationalen Schweizer Forschungsprogramms «Ressource Boden» nutzten den DOK-Versuch als Experimentierfeld. Sie untersuchten die Verbindung von Bodeneigenschaften und -funktionen mit der landwirtschaftlichen Produktion¹.
- In einem vielbeachteten EU-Projekt zur Bodenqualität untersuchte ein internationales Forschungsteam den Einfluss der Bewirtschaftung auf die Ökosystemdienstleistungen des Bodens. Der DOK-Versuch war ein wichtiger Pfeiler der Versuchsinfrastruktur².
- Für ein Projekt des Schweizerischen Nationalfonds (SNF) untersuchen FiBL Bodenforscher*innen, wie sich die Bewirtschaftung im DOK-Versuch auf die Humusqualität und den Humusumsatz auswirkt³.
- Seit 2016 untersuchen internationale Forschungsgruppen den Einfluss der Anbausysteme auf die

Trockenstresstoleranz der Kulturen und mikrobiellen Gemeinschaften⁴.

- Ein SNF-Projekt über die mikrobielle Biodiversität im Boden in Bezug zum Stickstoffkreislauf geht derzeit in seine letzte Phase.
- In einem neuen EU-Züchtungsprojekt werden die Mikroben-Gemeinschaften auf Samen von Kulturpflanzen untersucht⁵. In einem zweiten Projekt erarbeitet ein Forschungsteam einen Rahmen für das Monitoring der Bodenfruchtbarkeit⁶.

Offene Fragestellungen haben Forschende veranlasst, weitere Langzeitversuche zu spezifischen Themen anzulegen. Dazu gehört ein Feldversuch zu Auswirkungen reduzierter Bodenbearbeitung, der Düngungsstrategie und biodynamischer Präparate. Die Versuchsfelder wurden 2002 in Frick angelegt. Auch die 2005 gestarteten Systemvergleiche des FiBL in Indien, Kenia und Bolivien haben ihren Ursprung in der Erfolgsgeschichte des DOK-Versuchs.

¹NFP 68, ²iSQAPER, ³DynaCarb, ⁴BiodivERsA (SOILCIIM, Biofair und Microservices), ⁵Liveseeding, ⁶Benchmarks

Abbildung 2: Forschungsthemen und -methoden im Laufe der Zeit

Ertragsstabilität und -qualität

Ernte Klassische Methoden (Ertragshebungen, Proteingehalte, Nährstoffgehalte, Spurenelemente), Sortenprüfung, visuelle Methoden

Ernte

Fernerkundung, Modellierung, Künstliche Intelligenz, Metabolitenanalyse, Proteinmusteranalysen

Phosphor- und Stickstoffkreisläufe

Phosphor-Bilanz Input/Output Flächenbilanz

Phosphor-Kreislauf Radioisotope ³²P, ³³P, Fraktionierung

Stickstoff-Fixierung

Stickstoff-Rhizodeposition

Stickstoff-Transfer Stabiles Isotop ¹⁵N

Stickstoff-Bilanz

Klima

Kohlenstoffgehalte

OBS-Qualität Dichte-Fraktionierung, Abbauersuche

Treibhausgas-Emissionen, Resilienz,

Wurzel-Kohlenstoff-Umsatz

NIR, NanoSIMS, NMR

Biodiversität und Bodenbiologie

Mikrobielle Biomasse und Aktivität Klassische Methoden

Regenwürmer und Nützlingsfauna, Mikrogen-Biodiversität PLFA

Mykorrhiza

Morphotaxonomie, genetische Identifikation

Boden-Metagenomik

Mikrobielle Gemeinschaften, funktionelle Diversität

In dieser Abbildung sind die übergeordneten Themen aus dem DOK-Versuch fett dargestellt. Jeweils ergänzend sind die Methoden aufgeführt, mit denen die jeweiligen Fragestellungen untersucht wurden. Beides ist anhand der Achse unten im Zeitverlauf eingeordnet.



Ursprünge unter anderen Voraussetzungen

Die Fragestellungen, die der DOK-Versuch behandelt, sind inzwischen Teil einer öffentlichen Diskussion. Ganz anders waren die Voraussetzungen für die Pionier*innen in den siebziger Jahren: Gegen alle Widerstände trat damals in der Schweiz eine kleine Gruppe von Biobäuer*innen mit ihren Unterstützer*innen für die wissenschaftliche Überprüfung des biologischen Landbaus ein.

Aufgrund dieses erfolgreichen Engagements erhielt das 1973 zu diesem Zweck gegründete Forschungsinstitut für biologischen Landbau zusammen mit der damaligen Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene den Auftrag, in einem Langzeitversuch die drei Landbausysteme biologisch-dynamisch, biologisch-organisch und konventionell zu vergleichen. Das FiBL betreut hauptsächlich die biologischen Versuchspartzen, während das Schweizer Kompetenzzentrum für Agrarforschung Agroscope für die konventionell bearbeiteten Versuchsfelder verantwortlich ist.

Erfolgsrezept Wissenschaft und Praxis

Schon bei der Planung, aber vor allem während der Versuchsdurchführung waren Biolandwirt*innen beteiligt, um den Praxisbezug zu garantieren. Ihr Engagement für den Versuch und ihr anhaltendes Interesse an den gewonnenen Erkenntnissen haben die beteiligten Wissenschaftler*innen zu Höchstleistungen angespornt. Neben den wissenschaftlichen Publikationen war es ein wichtiges Ziel, die teils komplexen Erkenntnisse Landwirt*innen und interessierten Personenkreisen zugänglich zu machen.

Durch die akribische Dokumentation der Kulturmassnahmen und die vielfältigen Analysen ist der DOK-Versuch inzwischen eine der bestbeschriebenen Agrarflächen der Welt. Der Versuch und die Datensammlung werden durch die lange Dauer und die Konsistenz der Datenaufnahmen von Jahr zu Jahr wertvoller.



Forschende und Landwirt*innen treffen sich regelmässig bei den DOK-Flurbegehungen (oben im Jahr 2012, unten 2023).

Der Standort

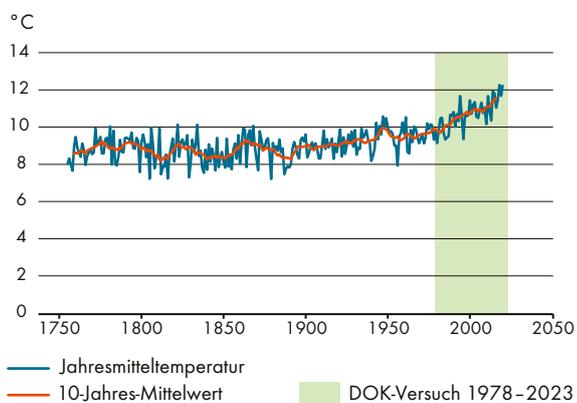


Die Versuchsfelder liegen im Leimental, südwestlich von Basel in der Oberrheinischen Tiefebene.

Klima

Die Oberrheinische Tiefebene ist klimatisch günstig mit Wärme und Feuchtigkeit versorgt. Die mittlere Jahrestemperatur betrug bis zum Ende des letzten Jahrhunderts 9,7 °C. Das Mittel der Jahre 2010–2020 liegt inzwischen bei 11,2 °C. Die Jahresniederschläge betragen aktuell durchschnittlich 872 mm.

Abbildung 3: Temperaturveränderung



Jahresmittel und gleitender Durchschnitt der Lufttemperatur in Baselland, gemessen in 1 m Höhe. Zwischen 1978 und 2010 hat die Temperatur um 1,5 °C zugenommen.

Boden und Geologie

Die Versuchsanlage liegt in der Südostecke des Rheingrabens und ist umgeben von Jurahügeln. Der Rheintalgraben ist mit mächtigen Schotterebenen gefüllt, die in der letzten Kaltzeit mit Feinmaterial (Löss) aus den Schwemmebenen der Gletschervorfelder überlagert wurden. Dadurch entstanden in den Muldentälern fruchtbare Lehmböden.

Der Löss im Leimental ist tiefgründig. Darauf haben sich mässig entwickelte Parabraunerden gebildet, die stellenweise zur Pseudovergleyung neigen. Die Böden sind entkalkt, weisen aber noch einzelne Gesteinsbrocken aus dem nahen Jura auf. Die Böden sind zwischen 1 m und 1,3 m tief verbraunt und damit sehr gut durchwurzelbar.

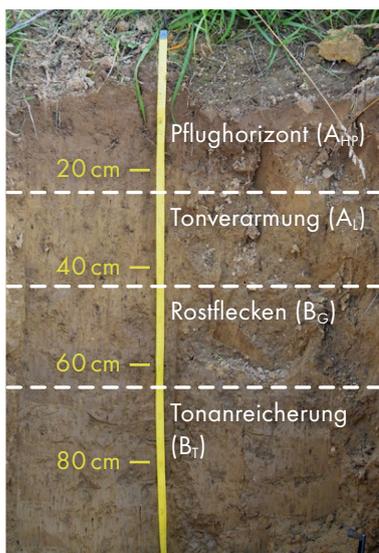
Durch die regelmässigen Überschwemmungen des naheliegenden Bachs Birsig lagerten sich in der Vergangenheit Sedimente unterschiedlicher Korngrößen ab. Die Böden auf den DOK-Versuchsfelder enthalten nur eine geringe Menge Sand, Schluff überwiegt mit 70 %. Der Ton sedimentierte in kleineren Wasseransammlungen, sodass er etwas unregelmässig verteilt ist.

Tabelle 1: Korngrössenzusammensetzung der Böden unter den Verfahren des DOK-Versuchs. Mittelwerte der Gewichtsprozentage und Standardabweichung (SD)

Verfahren	Ton (%)	SD	Schluff (%)	SD	Sand (%)	SD
NOFERT	16,2	2,4	70,7	3,2	11,4	2,3
BIODYN 1	16,8	1,8	69,5	2,2	11,6	1,7
BIOORG 1	14,9	1,7	71,6	2,3	11,7	1,2
CONFYM 1	14,3	1,7	71,7	0,9	12,1	1,2
BIODYN 2	17,1	1,9	69,2	2,1	11,3	2,5
BIOORG 2	15,1	1,5	71,4	2,1	11,4	0,9
CONFYM 2	14,5	1,6	70,9	1,7	12,6	1,5
CONMIN	16,7	2,5	70,0	2,1	11,3	1,2

Der Tongehalt in den DOK-Parzellen liegt im Mittel bei 15,6 % (Median 15,3), die tiefsten Werte liegen bei 12,5 %. In acht Parzellen in der N-W-Ecke des Versuchs erreicht der Tongehalt aber Werte von 20 bis 25 %. Diese Zone mit hohen Tongehalten grenzt sich deutlich von den benachbarten Parzellen ab. Der Einfluss des Tongehalts wird, besonders wenn es um die Bewertung der Verfahrenseffekte auf den Boden geht, in den statistischen Bewertungen berücksichtigt.

Der Boden hat einen kleinen Anteil an Grobporen, weshalb er sich im Frühjahr langsam erwärmt. Er neigt zeitweise zu Staunässe, weshalb im Boden dunkle Flecken zu sehen sind, sogenannte Eisen- und Mangankonkretionen (Pseudogley). Dadurch bedingt ist der Boden nur in kurzen Zeitfenstern bearbeitbar und das mechanische Hacken im Frühjahr und Frühsommer ist anspruchsvoll. Der Boden erlaubt einen kapillaren Wasseraufstieg aus tieferen Bodenschichten, sodass Trockenheit bislang im Sommer kein sehr grosses Problem darstellt.



Bodenprofil im Areal des DOK-Versuchs. Dargestellt sind die Horizonte (Bodenschichten) der entkalkten, tiefgründigen Parabrauerde.



Die Böden der Anbauverfahren CONMIN (links) und BIODYN 2 (rechts) nach einem Starkregen im November 2002. Die Verschlämmung an der Bodenoberfläche war im CONMIN-Verfahren viel ausgeprägter.

Der Versuch

Im DOK-Versuch werden die landwirtschaftlichen Systeme biologisch-dynamisch (**BIODYN**), biologisch-organisch (**BIOORG**) und konventionell (**CONFYM**) miteinander verglichen. In diesen Anbausystemen simuliert der Versuch Systeme mit Ackerbau und Viehhaltung.

Die beiden Biosysteme entsprechen den Richtlinien von Bio Suisse und Demeter. Analog zu den Demeter-Richtlinien werden im Versuch bei BIODYN Feld- und Kompostpräparate eingesetzt und die Sternenkonstellation berücksichtigt. Das konventionelle Verfahren CONFYM entspricht der heutigen integrierten Produktion mit ausgeglichener Nährstoffbilanz und Pflanzenschutz nach ökonomischen Schadschwellen.

Neben den Anbausystemen mit simulierter Viehhaltung gibt es seit der zweiten Fruchtfolgeperiode (1985) ein ausschliesslich mineralisch gedüngtes konventionelles System, das eine viehlose Landwirtschaft repräsentiert (**CONMIN**).

In den Systemen BIODYN, BIOORG und CONFYM werden jeweils zwei Verfahren mit unterschiedlicher Düngeintensität untersucht. Die Düngeintensität orientiert sich an zwei Viehbesatzdichten: 1,4 Düngegrossvieheinheiten (DGVE) entspricht der durchschnittlichen Viehbesatzdichte in der Schweiz, 0,7 entspricht einer solchen bei reduzierter Tierhaltung. Die Hofdünger werden von Betrieben bezogen, die nach dem jeweiligen System wirtschaften. In den konventionellen Systemen werden Mineraldünger gemäss der Schweizerischen Düngungsempfehlung (GRUD) ausgebracht.

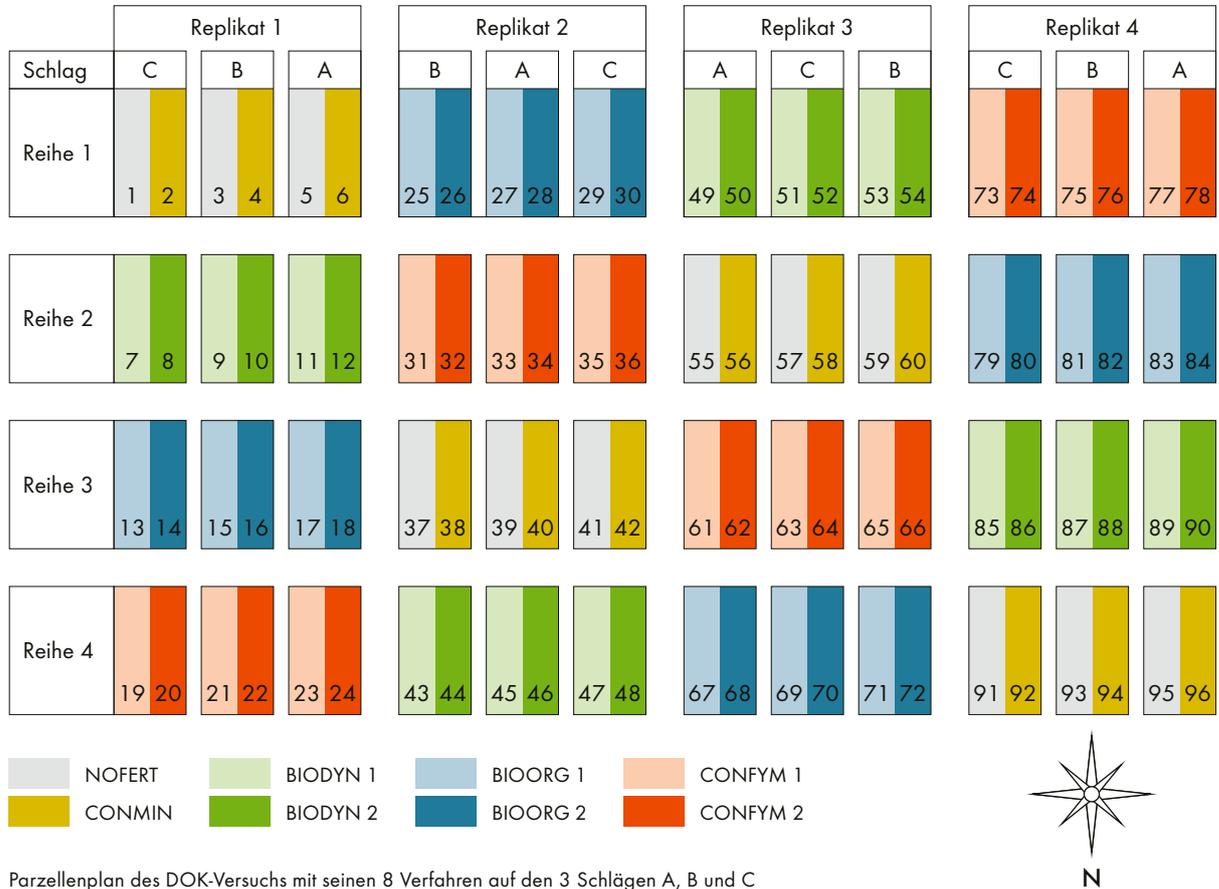
In einem Kontrollverfahren wird seit Beginn des Versuchs nicht gedüngt (**NOFERT**). Hier werden seit Beginn 1978 auch die biodynamischen Feldpräparate 500 und 501 eingesetzt, der Pflanzenschutz entspricht den Massnahmen von BIODYN.



Luftbild der vier Replikate des DOK-Versuchs im Jahr 2017 mit den drei Schlägen: Schlag A Winterweizen 2 mit Ausschnitt für einen Sortenversuch im Randbereich, Schlag B Soja, Schlag C Winterweizen 1. Ausserdem sind Regenausschlussdächer des SoilClim Projekts in ausgewählten Parzellen zu sehen.

Versuchsdesign

Abbildung 4: Parzellenplan



Parzellenplan des DOK-Versuchs mit seinen 8 Verfahren auf den 3 Schlägen A, B und C untergliedert in 4 Reihen und 4 Replikate.

Der Versuch besteht aus 96 Einzelparzellen à 5 × 20 Meter. Die acht Verfahren sind in vier Wiederholungen (Replikate) angelegt. Jedes Verfahren ist in der randomisierten Blockanlage in jeder Reihe und jeder Spalte vertreten. Auf diese Weise kann die Variabilität des Standorts ausgeglichen und in der Statistik berücksichtigt werden.

Ausserdem werden in jedem Jahr drei verschiedene Kulturen der siebenjährigen Fruchtfolge nebeneinander angebaut. Dabei rotiert die Frucht-

folge zeitlich versetzt auf drei parallelen Schlägen: A, B und C. Auf diese Weise lassen sich die wetterbedingten jährlichen Ertragsschwankungen ausgleichen. In jeder Fruchtfolgeperiode können so für jede Kultur und jedes Verfahren die Parzellenerträge von mindestens 12 Anbaujahren (3 Schläge × 4 Replikate) untersucht werden. Das statistische Modell zur Evaluation der Bodenqualität berücksichtigt den Tongehalt in jeder Parzelle, der ein wichtiger Faktor der Standortvariabilität ist.

Düngung

1,4 DGVE entspricht dem Hofdüngeraufkommen eines gemischt wirtschaftenden Schweizer Betriebs und im Folgenden der Düngestufe 2. Die halbe Hofdüngermenge mit 0,7 DGVE (Düngestufe 1) wurde als Kontrollvariante eingeführt und simuliert einen Betrieb mit wenig Vieh. Gülle dient der Bestandesführung der aktuellen Kultur, Mist als langsam fließende Grunddüngung.

Während das biologisch-dynamische System ausschliesslich Hofdünger erhält, werden die biologisch-organischen Parzellen zusätzlich mit geringen Mengen an mineralischem Kali (Patentkali oder Kalimagnesia) versorgt.

Im CONFYM-2-Verfahren werden grössere Mengen an Mineraldünger gegeben, bis die Normdüngung nach GRUD erfüllt ist. Im CONFYM-1-Verfahren ist sowohl die Hofdüngermenge als auch die Mineraldüngermenge reduziert. Das rein mineralisch gedüngte System CONMIN erhält ausschliesslich Mineraldünger bis zur empfohlenen Düngemenge nach Norm, hier gibt es keine unterschiedlichen Düngeufen.

In den konventionellen Systemen wird seit der Einführung der integrierten Produktion im Jahr 1992 der mineralische Stickstoffvorrat im Boden bei der Bemessung der Düngemenge berücksichtigt. Das Ziel ist eine bedarfsorientierte Düngung.

Die vollen Düngeufen der verschiedenen Systeme sind nicht nährstoffäquivalent. Das heisst, die Gesamt-Düngeufen und die im Dünger enthaltenen Nährstoffe variieren zwischen den Systemen je nach üblicher Praxis. Die Düngung unter den Versuchsbedingungen orientiert sich an sogenannten Leitelementen, die in einem Düngeufenplan für jede Fruchtfolgeperiode festgelegt werden. Phosphor (P) spielt dabei eine entscheidende Rolle. Wurde im Vorjahr der Düngeufenplan nicht genau eingehalten, kann er im laufenden Jahr korrigiert werden.

Veränderungen während des Versuchs

In der ersten und zweiten Fruchtfolgeperiode (FFP) lag die Düngegabe in Düngeufe 1 noch bei 0,6 und in der Düngeufe 2 bei 1,2 DGVE. Zu Beginn der dritten FFP wurden die Düngegaben aufgrund des erhöhten Futterpflanzenanteils in der Fruchtfolge auf die oben genannten Werte erhöht.

In der vierten FFP hat der Betrieb für die biologisch-organische Bewirtschaftung gewechselt – durch ein anderes Aufstallungssystem hat sich zu diesem Zeitpunkt das Verhältnis von Mist und Gülle im Hofdünger geändert.

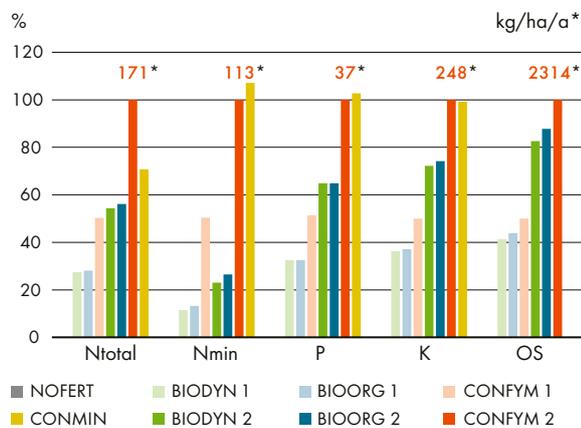
Unterschiedliche Hofdünger-Behandlung

Die Hofdünger in den drei Systemen BIODYN, BIOORG und CONFYM werden gemäss den Anforderungen der jeweiligen Systeme unterschiedlich gelagert und aufbereitet:

- als Mistkompost im BIODYN
- als Rottemist im BIOORG
- als Stapelmist im CONFYM

Die Verluste an organischer Substanz während der Lagerung sind bei Stapelmist am geringsten und nehmen über Rottemist bis zu Mistkompost zu.

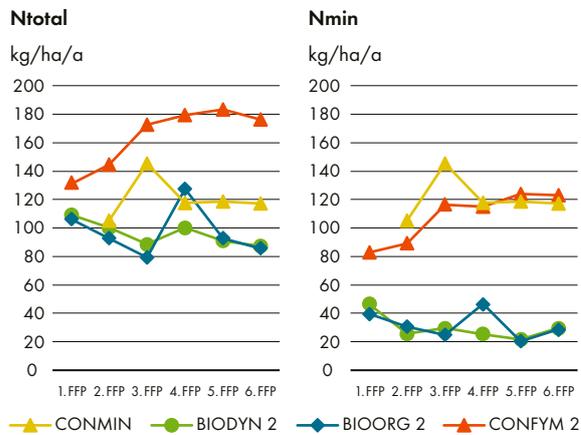
Abbildung 5: Applizierte Mengen an Nährelementen



Applizierte Mengen an Gesamtstickstoff (Ntotal), mineralischem Stickstoff (Nmin als Ammonium und Nitrat in Hof- und Mineraldüngern), Phosphor und Kalium aus organischen und mineralischen Quellen sowie die Menge an organischer Substanz (OS), die mit Mist und Gülle ausgebracht wird. Alle Angaben sind Mittelwerte über die FFP 2-6 und relativ zum CONFYM-2-Verfahren, dessen absolute Mengen in roten Ziffern angegeben sind.

Abbildung 5 zeigt deutlich, dass während der fünf Fruchtfolgeperioden ab 1985 in den beiden Bioverfahren 45 % weniger Gesamtstickstoff (Ntotal), 75 % weniger mineralischer Stickstoff (Nmin), 35 % weniger Phosphor und 27 % weniger Kalium (K) als in CONFYM 2 verwendet worden sind. Die Menge an mit den Hofdüngern zugeführter organischer Substanz war in BIOORG um 12 % und in BIODYN um 17 % geringer als in CONFYM 2. Ursache der unterschiedlichen Werte war die Veränderung im Hofdünger aufgrund der unterschiedlichen Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren.

Abbildung 6: Stickstoffdüngung



Gesamtstickstoff (Ntotal) und mineralischer Stickstoff (Nmin als Ammonium und Nitrat). Die Biosysteme erhalten N ausschliesslich aus Mist und Gülle - in den konventionellen Systemen wird mit Mineraldünger bis zur Normdüngung ergänzt.

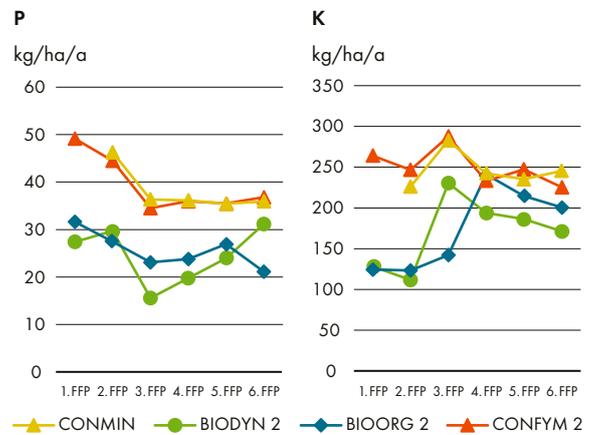
Die Stickstoffzufuhr im CONFYM-System hat deutlich zugenommen (Abbildung 6). Dies liegt darin begründet, dass ab der dritten FFP drei Jahre Futterpflanzen (Klee gras, Mais) mit hohem N-Entzug angebaut wurden und die empfohlenen Düngermengen aufgrund höherer Ertragserwartungen gestiegen sind. Weil in CONFYM der Stickstoff im Hofdünger nach GRUD nur zu 60 % angerechnet wird, ist die Ntotal-Düngung dort mit 171 kg/ha und Jahr deutlich höher als in CONMIN.

Im mineralisch gedüngten CONMIN-System werden im Durchschnitt 50 kg **Stickstoff (N)** weniger gedüngt. Diese Differenz entspricht der nicht berücksichtigten Menge an N im Hofdünger, die auch zu Umweltproblemen durch gasförmige Verluste (Ammoniak und Lachgas) und Auswaschung (Nitrat) führen kann.

In den Biosystemen wird im Durchschnitt 95 kg N pro Hektar gedüngt, wovon aber nur 30 kg mineralisch und somit direkt wirksam sind. Der organische Anteil des Hofdünger-N wird erst durch die Mineralisierung im Boden zu pflanzenverfügbarem Ammonium und Nitrat. Insgesamt ist die N-Zufuhr in den Biosystemen eher stabil.

Phosphor (P) ist ein Pflanzennährstoff, dessen globale Lagerstätten an ihre Grenzen kommen. P-Dünger ist dementsprechend teuer. Im DOK-Versuch erfolgt die P-Düngung der konventionellen Systeme nach Norm, wobei die löslichen Nährstoffe im Boden berücksichtigt werden. Die applizierten Mengen wurden überdies entsprechend den Revisi-

Abbildung 7: Düngung mit Phosphor und Kali



In BIOORG werden neben den Hofdüngern auch zugelassene K-Dünger ausgebracht.

onen der GRUD angepasst. Der Anstieg in BIODYN hängt vermutlich mit den erhöhten P-Gaben über Hofdünger ab FFP drei zusammen.

Kali (K) wird in den konventionellen Systemen bereits seit Beginn des DOK-Versuchs stark gedüngt, weil die löslichen K-Gehalte im Boden tief waren. In BIOORG wird etwas Kalimagnesia gegeben, in BIODYN kommt kein zusätzlicher Kalidünger zum Einsatz. Der Anstieg von Kali in der dritten FFP bei den Bioverfahren kann durch die Anhebung der Hofdüngermengen nur zum Teil erklärt werden. Grundsätzlich enthält Gülle mehr Kali als Mist.

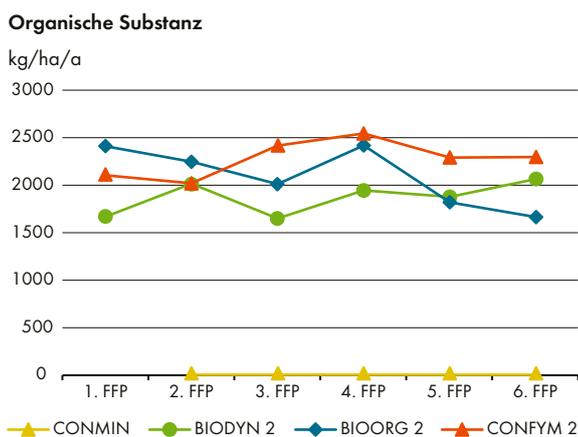


Handelsdünger und Pflanzenschutzmittel, die im konventionellen CONMIN-System zu Winterweizen eingesetzt werden.



DOK-Versuchspartellen mit Weizen und Regenausschlussdächern zur Untersuchung von Trockenheitseffekten auf die Bodenbiodiversität.

Abbildung 8: Zugabe von organischer Substanz



Verwendete Hofdünger sind Mist und Gülle. Ihr Hauptbestandteil neben Wasser ist die organische Substanz und Mineralstoffe. Dargestellt ist, wie viel OS vom Dünger von 1,4 Grossvieheinheiten jährlich je Hektar in den Boden gelangt.

Die Verluste organischer Substanz durch die unterschiedliche Lagerung der Hofdünger in den drei Systemen spiegeln sich auch in den ausgebrachten Düngermengen wider. Im Vergleich zu CONFYM wurde in BIOORG 12 % und in BIODYN 17 % weniger organische Substanz ausgebracht. Besonders die Kompostierung des Mists in BIODYN führt zu einem Verlust an organischer Substanz.

Die Menge an Gülle unterschied sich hingegen kaum. Das geänderte Aufstallungssystem in BIOORG hat in der vierten FFP zu mehr organischer Substanz bei gleichen Nährstoffmengen geführt. In CONFYM nahmen die Mengen schon in der dritten FFP zu.

Fruchtfolge

Die siebenjährige Fruchtfolge mit zwei Jahren Bodenruhe ohne Pflügen unter Klee gras ist typisch für viehhaltende Betriebe in der Schweiz. Die anuellen Kulturen sind Hackfrüchte (Randen, Mais, Kartoffeln, Kohl), Getreide (Weizen, Gerste) und Soja als Körnerleguminose. Zwischenfrüchte werden entweder als Gründüngung oder als Futter (die Biomasse wird abgeführt) genutzt (Tabelle 2). Die Fruchtfolge ist ein Kompromiss zwischen den unterschiedlichen Anbausystemen und wurde nach jeder FFP leicht angepasst.

In jeder FFP wurden Kartoffeln, Winterweizen und Klee gras angebaut. In der Anfangsphase des

Versuchs waren zudem Gerste und Weisskohl Teil der Fruchtfolge. Weisskohl wurde aufgrund der hohen Arbeitsintensität schon in der zweiten FFP (1985) durch Randen ersetzt. Mit Beginn der dritten FFP (1992) wurde anstelle von Gerste ein drittes Jahr Kunstwiese (Klee gras) angebaut, da die getreidebentonte Fruchtfolge in allen Systemen zu Fusskrankheiten führte. Seit 1999 werden Mais und Soja angebaut und die Kunstwiese wieder über zwei Jahre kultiviert. Die Position der Kulturen wurde dann bis 2013 in jeder FFP leicht verändert. Die Gründe für die Veränderungen waren die optimale Stickstoffnutzung in der Fruchtfolge sowie das systemunabhängige Auftreten von Schädlingen, vor allem von Drahtwürmern bei Kartoffeln.

Tabelle 2: Entwicklung der siebengliedrigen Fruchtfolge seit Beginn des Versuchs

Jahr	1. FFP 1978–1984	2. FFP 1985–1991	3. FFP 1992–1998	4. FFP 1999–2005	5. FFP 2006–2012	6. FFP 2013–2019
1	Kartoffel	Kartoffel	Kartoffel	Kartoffel	Silomais	Silomais
	Gründüngung	Gründüngung	Gründüngung			Gründüngung
2	Winterweizen 1	Winterweizen 1	Winterweizen 1	Winterweizen 1	Winterweizen 2	Soja
	Zwischenfutter	Zwischenfutter	Zwischenfutter	Gründüngung	Gründüngung	
3	Weisskohl	Randen	Randen	Soja	Soja	Winterweizen 1
				Gründüngung	Gründüngung	Gründüngung
4	Winterweizen 2	Winterweizen 2	Winterweizen 2	Silomais	Kartoffel	Kartoffel
5	Gerste	Gerste	Klee gras 1	Winterweizen 2	Winterweizen 2	Winterweizen 2
6	Klee gras 1	Klee gras 1	Klee gras 2	Klee gras 1	Klee gras 1	Klee gras 1
7	Klee gras 2	Klee gras 2	Klee gras 3	Klee gras 2	Klee gras 2	Klee gras 2

Zwischenfutter wird abgeführt, Gründüngung verbleibt auf dem Feld und wird eingearbeitet.

Pflanzenschutz

Bis 1992 wurden in den konventionellen Systemen Pestizide weitestgehend nach einem Spritzplan ausgebracht. Mit der dritten Fruchtfolge wurde die integrierte Produktion (IP) eingeführt, bei der Pestizide erst nach Erreichen der ökonomischen Schadschwelle eingesetzt werden. Der Einsatz der Pestizide in den konventionellen Systemen orientierte sich an den jeweils aktuellen Gesetzgebungen und Anwendungsempfehlungen.

In den konventionellen Verfahren wurden jährlich im Durchschnitt 3 kg Wirksubstanz pro Hektar Ackerfläche ausgebracht (Abbildung 9). Dabei machten Fungizide und Herbizide den Hauptanteil aus. Insektizide wurden nur selten und in geringen Mengen ausgebracht. Seit den 1980er-Jahren sind die ausgebrachten Wirkstoffmengen deutlich zurückgegangen, was auch auf die hochwirksamen Pflanzenschutzmittel (PSM) mit sehr geringer Spritzmittelmenge per Anwendung zurückzuführen ist. Im gleichen Zeitraum hat sich die Anzahl Wirkstoffapplikationen verdoppelt (Abbildung 10).

Die Biosysteme nutzen die Möglichkeiten von biologischer Schädlingsregulierung und Präventionsmassnahmen gegen Krankheiten. Im BIODYN-System wird lediglich das biologisch gewonnene Toxin von *Bacillus thuringiensis* (BT), einem Bakterium, als Insektizid gegen den Kartoffelkäfer verwendet.

Kartoffeln

Im Kartoffelanbau rufen die Kraut- und Knollenfäule (*Phytophthora infestans*) und der Kartoffelkäfer (*Leptinotarsa decemlineata*) erhebliche Schäden hervor. In den konventionellen Systemen waren durchschnittlich fünfzehn Wirkstoffbehandlungen im Jahr mit Herbiziden, Insektiziden und Fungiziden nötig, im biologisch-organischen System sieben Insektizidanwendungen und das Fungizid Kupfer, im biologisch-dynamischen vier Behandlungen mit BT-Präparaten.

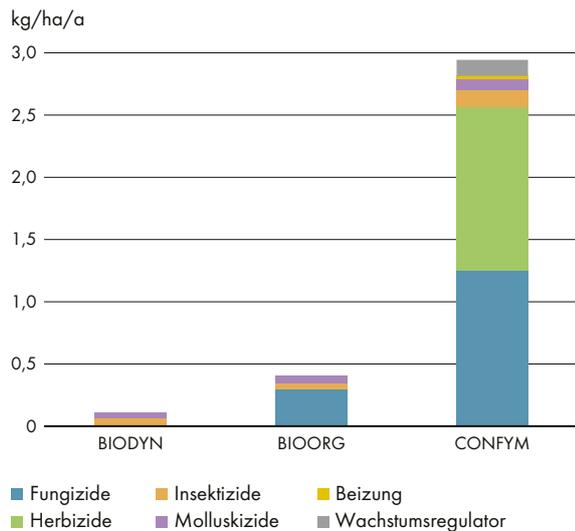
Getreide, Mais und Soja

Konventionelles Getreide wird drei bis vier Mal mit Herbiziden, Fungiziden und einem Halmverkürzer behandelt. Mais und Soja benötigen in der Regel nur eine Herbizidbehandlung und eine Behandlung gegen Schnecken. Der Maiszünsler wird mit Trichogramma-Schlupfwespen reguliert.

Saatgut

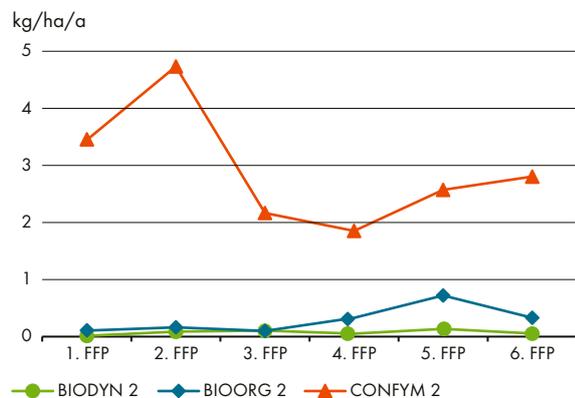
Das Saat- und Pflanzgut in den konventionellen Systemen wurde gebeizt, in den biologischen Systemen nicht. Seit 1998 kommt das Saatgut für die Biosysteme aus biologischer Vermehrung.

Abbildung 9: Wirkstoffmengen der angewendeten Substanzen



Eingesetzte Mengen an Wirkstoff-Aktivsubstanz im Durchschnitt über alle Versuchsjahre in Kilogramm Aktivsubstanz pro Hektar und Jahr. CONMIN erhielt die gleichen Mengen wie CONFYM. Zu berücksichtigen ist, dass in den Kleeergrasjahren keine PSM ausgebracht wurden. Die Durchschnittswerte beinhalten aber auch die Kleeergrasjahre.

Abbildung 10: Zeitliche Entwicklung der angewendeten Pestizidmengen



Durchschnittliche in einer Fruchtfolgeperiode eingesetzte Wirkstoffmengen aller Pflanzenschutzmittel in den drei Hauptverfahren des DOK-Versuchs. Verlauf über 6 Fruchtfolgeperioden. CONMIN erhielt die gleichen Mengen wie CONFYM. Angaben in Kilogramm Aktivsubstanz pro Hektar und Jahr.

Bodenbearbeitung

Der Pflug wird vor Hackfrüchten und Getreide zur Bodenbearbeitung eingesetzt. Die Pflugtiefe war zu Beginn des Versuchs in den Biosystemen mit 15–20 cm etwas geringer als in den konventionellen Systemen mit 20–25 cm. Seit der dritten Fruchtfolge werden alle Systeme einheitlich auf 20 cm Tiefe gepflügt. Pflegemaßnahmen mit Hacke und Striegel, die den Boden oberflächlich bearbeiten, werden in den Biosystemen häufiger durchgeführt. Kartoffeln und Mais werden auch im konventionellen System gehackt.



In allen Anbauverfahren kam der Pflug vor Weizen und Hackfrüchten zum Einsatz.

Tabelle 3: Charakteristika der DOK-Anbausysteme

Anbausystem	NOFERT	BIODYN		BIOORG		CONFYM		CONMIN	
Dünger-Grossvieh-einheiten pro Hektar	-	0,7	1,4	0,7	1,4	0,7	1,4	-	
Düngung									
Hofdünger	-	Mistkompost und Gülle		Rottemist und Gülle		Stapelmist und Gülle		-	
Mineraldünger	-	Gesteinsmehl		Gesteinsmehl, Kalimagnesia		Harnstoff, Ammonium-Nitrat, Calcium-Ammonium-Nitrat, Triple-Superphosphat, Kaliumchlorid			
Pflanzenschutz									
Unkrautkontrolle	Mechanisch durch Striegel und Hacken					Mechanisch und Herbizide			
Pflanzenkrankheiten	-	Indirekte Massnahmen		Indirekte Massnahmen, Kupferpräparate zu Kartoffel		Fungizide			
Schädlinge	Biocontrol (<i>Bacillus thuringiensis</i>), Pflanzenextrakte, vorbeugende Massnahmen					Insektizide, Biocontrol, Schneckenkörner und vorbeugende Massnahmen			
Besonderheiten	Biodynamische Präparate			-		Wachstumsregulatoren			

Ertrag der Kulturen

In den Grafiken und Tabellen des folgenden Kapitels sind die mittleren Erträge einer Fruchtfolgeperiode mit jeweils drei Ertragsjahren und vier Feldreplikaten (n = 12) dargestellt.

Es gilt zu beachten, dass es sich bei der Angabe der Erträge um absolute Trockensubstanz (TS) handelt (100 % TS). In der landwirtschaftlichen Praxis werden die Erträge teilweise mit einer Restfeuchte angegeben. Bei Weizen mit 86 % TS und 14 % Wasser, und bei Soja mit 89 % TS und 11 % Wasser. Das heisst, dass die hier dargestellten Weizenerträge mit dem Faktor 1,16 multipliziert werden müssen, um mit den Ertragsdarstellungen der Praxis vergleichbar zu sein. Bei Soja gilt der Faktor 1,12. Bei Klee-gras werden auch in der Praxis TS-Erträge angegeben, ebenso meist bei Silomais. Bei Kartoffeln werden für die Vermarktung Frischsubstanzenerträge verwendet.

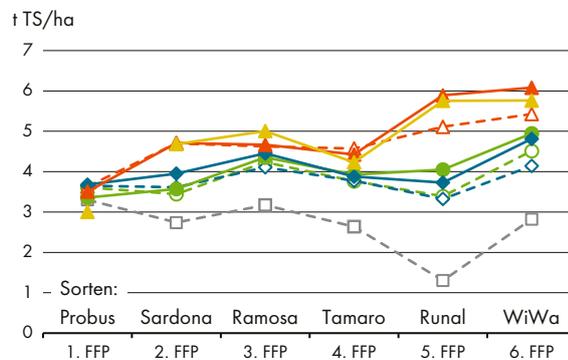
Winterweizen

Kornertrag

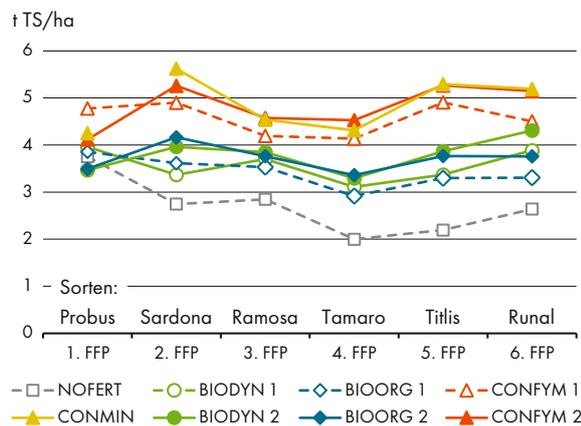
Es wurden immer Brotweizensorten mit sehr guter Backqualität angebaut. In der ersten FFP kamen alle Verfahren auf ähnliche Erträge und profitierten wahrscheinlich noch von der vorherigen Bewirtschaftung. In den konventionellen Verfahren kam es zu Lagerschäden, weshalb die langstrohige Sorte Probus den verabreichten Stickstoff nicht zur Ertragsbildung nutzen konnte. Die Parzellen, auf denen das CONMIN-Verfahren etabliert wurde, blieben in der ersten FFP ungedüngt und zeigten daher diese ungewöhnlich tiefen Erträge. Zwischen 1985 und 2019 waren die Winterweizenerträge in den Bioverfahren im Durchschnitt um 21 % geringer als im konventionellen CONFYM. Im Folgenden werden die Ertragsunterschiede erst ab der zweiten Fruchtfolgeperiode diskutiert.

Abbildung 11: Verlauf der Kornerträge von Winterweizen 1 und Winterweizen 2

Ertrag Winterweizen 1



Ertrag Winterweizen 2



Im besten Fall erreichten die konventionellen Kornerträge sechs Tonnen Trockenmasse pro Hektar. Dies entspricht dem typischen Ertragsniveau in der Region Baselland.

Tabelle 4: Mittelwert der Erträge von Winterweizen 1 und 2 (1985–2019)

	0,7 DGVE				1,4 DGVE			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t TS/ha	2,51	3,68	3,56	4,71	4,01	3,96	5,05	5,04
0,7/1,4		92 %	90 %	93 %	100 %	100 %	100 %	
BIO/CON		77 %		100 %	79 %		100 %	

Die beiden Bioverfahren wie auch die beiden konventionellen Verfahren unterscheiden sich jeweils nur wenig in ihrem Ertragsverlauf (Abbildung 11). Durch den Anbau moderner Züchtungen sind die Erträge aller Anbausysteme gestiegen. In den letzten beiden Fruchtfolgeperioden sind die Erträge im biologisch-dynamischen System höher ausgefallen als im biologisch-organischen. Dies könnte sowohl mit dem Anbau der Sorte Wiwa zusammenhängen, die biologisch-dynamisch gezüchtet wurde, als auch mit der etwas besseren Bodenstruktur und der höheren biologischen Aktivität in BIODYN gegenüber BIOORG. Die Nmin-Gehalte in BIODYN sind zudem im Frühjahr immer etwas höher als in BIOORG. Interessant ist ausserdem, dass im unge düngten Verfahren NOFERT immer noch etwa zwei Tonnen Kornertrag je Hektar gebildet werden.

Winterweizen 1 hat eine günstigere Position als Winterweizen 2 in der Fruchtfolge. Er profitierte in den ersten vier Fruchtfolgeperioden von der günstigen Vorfruchtwirkung der Kartoffeln mit oder ohne Gründüngung. Auch die Nähe zum Klee gras beeinflusste den Ertrag von Weizen 1 wohl positiv.

Im Durchschnitt der beiden Bioverfahren hat Winterweizen 1 18 % und Winterweizen 2 23 % weniger Kornertrag als die beiden konventionellen. Dieser kleine Unterschied kann mit der Position in der Fruchtfolge zusammenhängen. Seit der 6. FFP wird für Winterweizen 1 die oben erwähnte Sorte (Wiwa) verwendet. Für Winterweizen 2 kommt die konventionelle Sorte Runal zum Einsatz. Bis 2015 wurden an beiden Fruchtfolge-Positionen die gleichen Weizensorten angebaut.

In den reduzierten Düngungsstufen sind die Erträge um durchschnittlich 8 % tiefer als bei praxisüblicher Düngung. In diesem Zusammenhang ist bemerkenswert, dass trotz reduzierter Düngemenge im konventionellen Verfahren CONFYM 1 ein höherer Ertrag erreicht wird, als in den Bioverfahren



Mähdrusch des Randbereichs einer Winterweizenparzelle. Nur der Kernbereich der Parzelle wird zur exakten Ertragsermittlung verwendet.

ren mit praxisüblicher Düngung. Dieses Ergebnis ist wahrscheinlich auch auf den effektiveren chemischen Pflanzenschutz und die direkt pflanzenverfügbaren N-Dünger in den konventionellen Verfahren zurückzuführen. Bei reduzierter Düngung nehmen jedoch der Humusgehalt und damit auch die Stickstoff-Vorräte im Boden ab (siehe Kapitel «Nährstoffdynamik»).

Strohertrag

Für die Tierhaltung ist auch der Strohertrag wichtig, da Stroh für die Einstreu verwendet wird und über den Mist den Weg wieder zurück zum Feld findet. Obwohl in den konventionellen Verfahren Halmverkürzer (CCC oder Moddus) eingesetzt wurden, ist der Strohertrag in den Biosystemen 8 bis 10 % tiefer als in den konventionellen. Der Ertragsunterschied beim Stroh ist geringer als beim Korn.

Tabelle 5: Mittelwert der Stroherträge von Winterweizen 1 und 2 (1985–2019)

	0,7 DGVE				1,4 DGVE			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
† TS/ha	4,14	6,17	5,82	6,69	7,20	6,86	8,02	7,55
0,7/1,4		86 %	85 %	83 %	100 %	100 %	100 %	
BIO/CON		92 %		100 %	90 %		100 %	

Ertragsbildende Faktoren

Bei Winterweizen schnitten die ertragsbildenden Faktoren in den konventionellen Verfahren deutlich besser ab als in den biologischen Verfahren: Die Anzahl ährentragender Halme pro m² war mit 571 Halmen in CONFYM 2 deutlich höher als in BIOORG 2 mit 383 Halmen. Das Tausendkorngewicht lag in CONMIN bei 42 g gegenüber 39 g in BIOORG 2.

Produktqualität

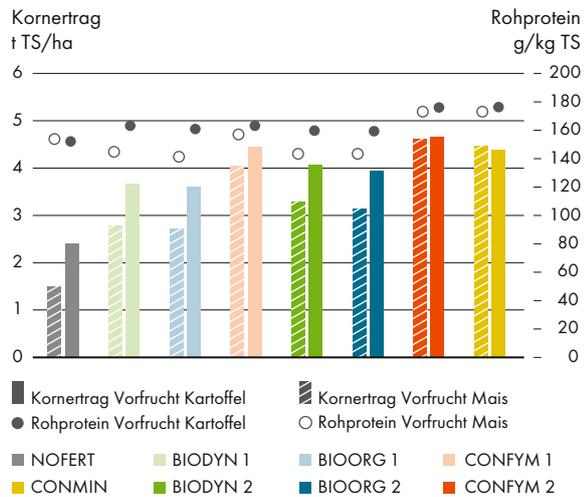
Kenngrößen wie der Gehalt an Mineralstoffen, Kohlenhydraten, Proteinen oder Fettsäuren sind wichtige Merkmale der ernährungsphysiologischen Qualität im Weizen. Zudem stehen technische Qualitätseigenschaften, die zum Beispiel die Backqualität beeinflussen, im Vordergrund. Im DOK-Versuch wurde untersucht, ob und wie Anbausysteme die Qualitätskriterien beeinflussen.

Die höchsten Rohproteingehalte wurden im konventionellen Weizen gemessen (Abbildung 12). Interessanterweise führt der Unterschied von Düngestufe 1 zu Düngestufe 2 in den Bioverfahren zu keiner signifikanten Verbesserung der Rohproteingehalte.

Dagegen hatte die Vorfruchtwirkung von Kartoffeln im Vergleich zu Silomais einen deutlich grösseren Effekt sowohl auf den Kornertrag als auch auf die Rohproteingehalte in den Bioverfahren. In den konventionellen Verfahren hingegen war der Vorfruchteinfluss nicht nachweisbar. Über die ganze Vegetationsperiode wurde der Weizen in den Bioverfahren gleichmässiger mit N versorgt, wenn Kartoffeln (und nicht Mais) die Vorfrucht waren, was sich auch auf den Rohproteingehalt auswirkte. Im Verfahren mit reduzierter Düngung CONFYM 1 wurden deutlich höhere Kornerträge und Rohproteingehalte gemessen als in den biologischen Systemen mit praxisüblicher Düngung (BIOORG 2, BIODYN 2).

Es gab keine signifikanten systembedingten Einflüsse auf die Makro- und Mikronährstoffe, den Aminosäure- und Zuckergehalt oder die Backqualität. Auch das antioxidative Potenzial unterschied sich nicht zwischen den Systemen.

Abbildung 12: Winterweizenerträge und Rohproteingehalte



DOK-Verfahren mit den Vorfrüchten Mais und Kartoffeln. Die Daten zeigen Mittelwerte der Jahre 2003 und 2010.



Auf viele Qualitätseigenschaften von Weizen haben die verschiedenen Verfahren keinen Einfluss.

Mykotoxine

Für die Produktqualität von Weizen spielen Mykotoxine eine wichtige Rolle. Dabei handelt es sich um Trichothecene, die durch Infektionen des Korns mit Fusarium-Pilzen entstehen und schon in geringen Konzentrationen für die Gesundheit von Mensch und Tier schädlich sein können. Von einer Reihe von Mykotoxinen, die analysiert werden, wurden ausschliesslich die Mykotoxine Deoxynivalenol (DON) und Nivalenol (NIV) in allen Anbausystemen ohne verfahrensbedingte Unterschiede in geringen Mengen nachgewiesen. DON wird am häufigsten gebildet und ist etwa zehnmal weniger toxisch als NIV.

Kartoffeln

Gepflanzt wurden vorgekeimte Saatkartoffeln, in den konventionellen Verfahren wurden sie meistens gegen Pilze gebeizt. Seit 2006 werden die Kartoffeln nicht mehr nach Kleegras, sondern nach Soja oder Winterweizen angebaut, sie verzeichnen seitdem in allen Verfahren eine positive Ertragstendenz.

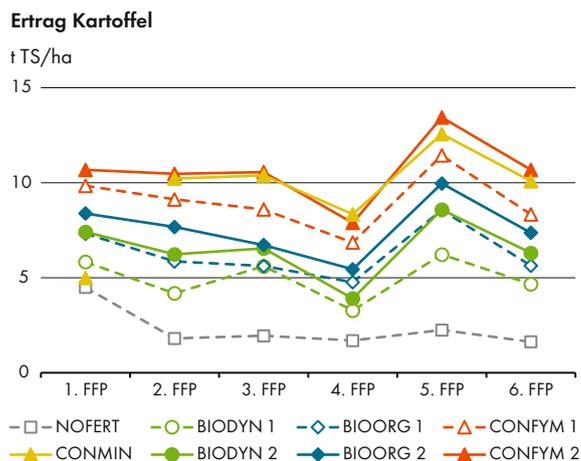
Der Knollenertrag von BIOORG 2 lag durchschnittlich 35 % und der von BIODYN 2 sogar 42 % unter dem von CONFYM 2. Die Kartoffeln in den Bioverfahren zeigen oft einen Kali- und Stickstoffmangel. Die Vegetationszeit der Kartoffeln in BIODYN ist zusätzlich verkürzt, da in diesem Verfahren keine Fungizide zugelassen sind und die Pflanzen daher früher durch Kraut- und Knollenfäule (*Phytophthora infestans*) befallen werden. Um die Knollen zu schützen, wird das Kraut meistens relativ früh abgeschlegelt. Die präventiven Behandlungen mit kupferhaltigen Produkten (Kupferhydroxid, Kupferoxysulfat, Kupfersulfat) erlauben der Pflanze in BIOORG eine etwas längere Vegetationsphase als in BIODYN, wo Kupfer nicht erlaubt ist.



Angehäufelte Kartoffelstauden im DOK-Versuch.

Die erlaubte Menge an Kupfer im Kartoffelanbau beträgt in der Schweiz heute 4 kg pro Hektar und ist damit im Vergleich zu den früheren Raten bedeutend geringer. Kupfer im Boden stellt eine bleibende potenzielle Belastung für Mikroorganismen und Weichtiere dar, daher werden Alternativen gesucht.

Abbildung 13: Verlauf der Knollenerträge



Zu Kartoffeln im CONFYM-2-Verfahren werden 37 % der Mistmenge der gesamten FFP gegeben, in BIOORG 2 nur etwa 25 %. Der Nährstoffinput durch Mist kann in der kurzen Vegetationsperiode der biologischen Systeme nur teilweise umgesetzt werden, weshalb die konventionellen Verfahren mit Mineraldünger besser ernährt sind.

Auch bei den Kartoffeln ist das besonders effiziente Verfahren CONFYM 1 bei reduzierter Düngung hervorzuheben, denn die Erträge sind hier ebenfalls höher als in den Bioverfahren bei praxisüblicher Düngung.

In der dritten FFP wurde auf Kupfer in BIOORG verzichtet, daher sind die Erträge hier auf demselben Niveau wie in BIODYN. In den anderen FFP sind die Erträge in BIOORG meist höher als in BIODYN. Dies unterstreicht, wie wichtig der Pflanzenschutz in dieser sehr empfindlichen Kultur ist.

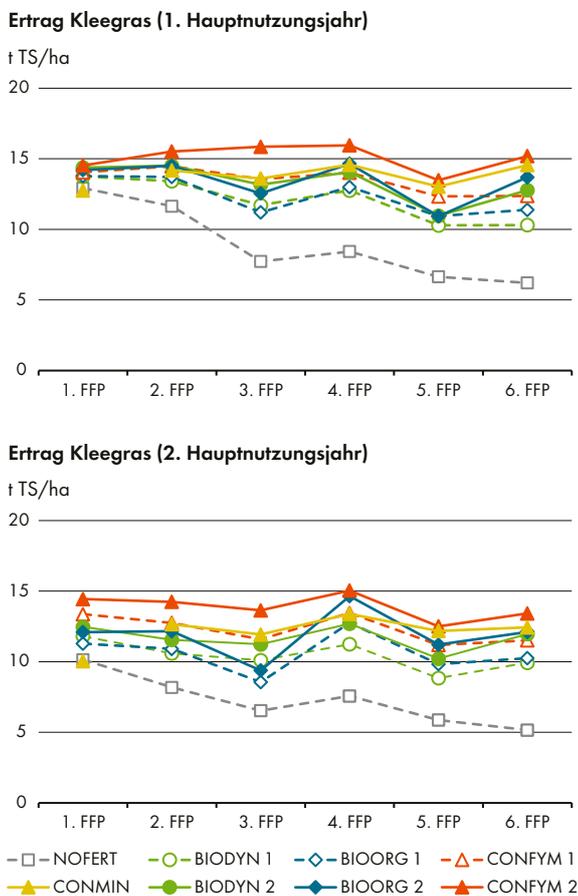
Tabelle 6: Mittelwert der Kartoffelknollenerträge aus 15 Anbaujahren (1985–2019)

		0,7 DGVE			1,4 DGVE			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t TS/ha	1,87	4,79	6,09	8,87	6,32	7,44	10,61	10,32
0,7/1,4		76 %	82 %	84 %	100 %	100 %	100 %	
BIO/CON			61 %	100 %		66 %	100 %	

Kleegras Kunstwiese

Die angezeigten Trockenmasseerträge von Kleegras ergeben sich aus den jeweiligen Summen von bis zu fünf Schnitten pro Jahr für die beiden Hauptnutzungsjahre (Abbildung 14). Die Säuberungsschnitte im Ansaatjahr oder zu Jahresbeginn werden hier nicht berücksichtigt. Kleegras wird im September gesät und erst im dritten Frühjahr nach Ansaat wieder umgebrochen, sodass der Boden über zweieinhalb Jahre nicht gepflügt wird.

Abbildung 14: Verlauf des Kleegrasertrags



Verlauf des Kleegrasertrags im ersten und zweiten Hauptnutzungsjahr als Summe von 4-5 Schnitten pro Jahr.



Zweijährige Kleegras-Mischungen bilden das Rückgrat der siebenjährigen Fruchtfolge im DOK-Versuch. Die Gräser dominieren die konventionellen Kleegrasbestände bereits im zweiten Jahr, während in den Biosystemen der Klee meistens länger erhalten bleibt.

Der Ertragsunterschied zwischen den biologischen und den konventionellen Systemen war im ersten Hauptnutzungsjahr auf gleicher Düngungsstufe mit 10 bis 11 % relativ gering. CONFYM 2 hatte den höchsten durchschnittlichen Ertrag. Die beiden Bioverfahren bei reduzierter Düngung hatten 19 % und das ungedüngte Verfahren 40 % weniger Ertrag als CONFYM 2 (Tabelle 7).

Im zweiten Hauptnutzungsjahr waren die Erträge im Durchschnitt aller Verfahren um 12 % tiefer als im ersten Jahr. Die relativ kleinen Ertragsunterschiede zwischen biologischen und konventionellen Anbauverfahren können mit dem Klee in der Mischung erklärt werden, welcher in den Biosystemen mehr Stickstoff über Knöllchenbakterien aus der Luft fixiert. Zudem spielen die lange Wachstumsperiode des Kleegrases und die intensive Durchwurzelung des Bodens durch diese Mischungen eine Rolle. Die Fixierleistung des Klees in der Mischung betrug 178 bis 300 kg N pro Hektar und Jahr. Zudem waren die Wurzeln des Kleegrases gut mit Mykorrhizapilzen kolonisiert. Mykorrhizapilze helfen dabei, Nährstoffe aufzunehmen.

Tabelle 7: Mittelwert der Kleegraserträge aus 30 Ertragsjahren je Verfahren

	0,7 DGVE				1,4 DGVE			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t TS/ha	7,40	10,92	11,25	12,72	12,31	12,58	14,48	13,25
0,7/1,4		89 %	89 %	88 %	100 %	100 %	100 %	
BIO/CON		87 %		100 %	90 %		100 %	

Mais

In der vierten Fruchtfolgeperiode wurde Mais in den DOK-Versuch eingeführt, weil er in der landwirtschaftlichen Praxis als Raufutterquelle für die Rinder eine immer wichtigere Rolle spielte.

Mit bis zu 20 Tonnen Trockenmasse je Hektar ist der Maisertrag dem der Kunstwiese deutlich überlegen (Abbildung 15), der Mais ist jedoch als Futterquelle weniger vielfältig.

Bei praxisüblicher Düngung waren die Maiserträge der biologischen Verfahren 11 und 15 % tiefer als in CONFYM 2. Bei reduzierter Düngung betrug der Unterschied zu CONFYM 1 noch 10 %. Auf den ungedüngten Flächen in NOFERT wuchs nur noch halb so viel. Beim Mais kann der geringe Ertragsunterschied zwischen den konventionellen und den Biosystemen damit erklärt werden, dass Mais eine lange Wachstumsperiode hat und den aus dem Bodenvorrat und den Hofdüngern mineralisierten Stickstoff bis in den Herbst aufnehmen kann.

Bis jetzt waren auch das Krankheits- und Schädlingsaufkommen im Mais gering. Der Maiszünsler wird in allen Systemen mit Trichogramma-Schlupfwespen reguliert.

Abbildung 15: Verlauf des Silomaisertrags

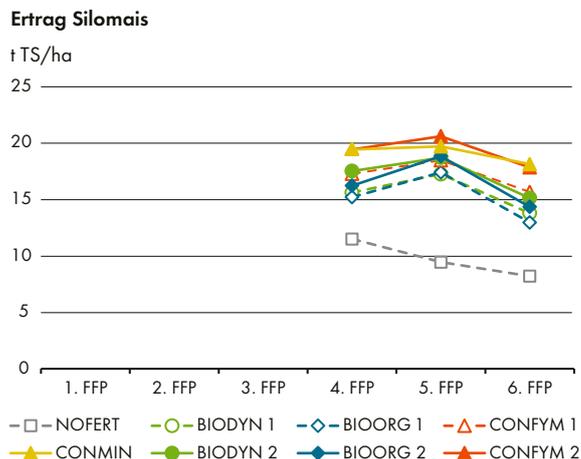


Tabelle 8: Mittelwert der Maiserträge aus 9 Ertragsjahren je Verfahren

		0,7 DGVE			1,4 DGVE			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t TS/ha	9,74	15,57	15,21	17,15	17,14	16,48	19,31	19,12
0,7/1,4		91 %	92 %	89 %	100 %	100 %	100 %	
BIO/CON		90 %		100 %	87 %		100 %	



Der Silomais auf den Versuchspartellen wird jeweils im Spätsommer geerntet.

Soja

Soja wurde genau wie Mais in der vierten Fruchtfolgeperiode eingeführt. Der Züchtungsfortschritt erlaubte den Anbau von kältetoleranten Sorten auch in nördlicheren Klimagebieten. Zudem ist Soja sowohl für die menschliche Ernährung als auch als Tierfutter ein gefragtes Produkt. Soja ist durch die Symbiose mit *Bradyrhizobium japonicum* weitestgehend autark in Bezug auf Stickstoff, weshalb sie auch für die Biofruchtfolge gut geeignet ist. Das Bakterium muss bei der Saat mitgegeben werden, denn es kommt in den Schweizer Böden nicht natürlicherweise vor. Die Stickstoffversorgung stellt daher für Soja im Gegensatz zu den anderen Kulturen der Fruchtfolge kein limitierendes Element dar. Daneben ist der Druck von Schädlingen und Krankheiten bei Soja immer noch gering.

Begünstigt durch diese Faktoren erzielt Soja in den biologischen wie in den konventionellen Systemen gleiche Erträge (Abbildung 16). Eine Stickstoffdüngung wurde in keinem der Verfahren durchgeführt. Alle Anbauverfahren mit praxisüblicher Düngung haben vergleichbare Erträge, während bei reduzierter Düngung das CONFYM-1-Verfahren leicht bessere Erträge erzielt als die beiden Bioverfahren der Düngestufe 1 (Tabelle 9). Dies ist ein Hinweis darauf, dass Phosphor und auch Kalium bei reduzierter Düngung wachstumslimitierende Elemente sind. Eine gute P-Versorgung ist essentiell für eine optimale biologische N-Fixierung.



Sojapflanze in der Blüte.

Abbildung 16: Verlauf des Kornertrags von Soja

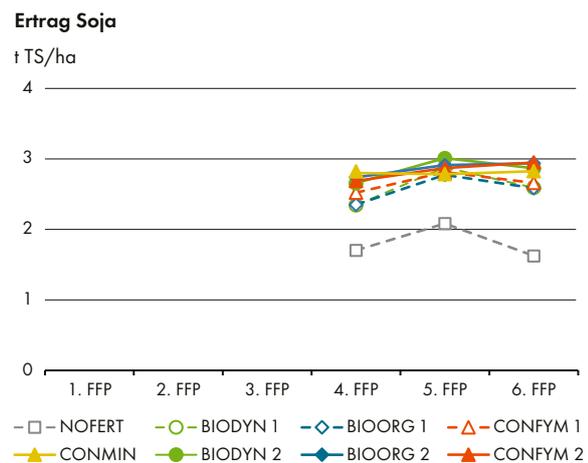


Tabelle 9: Mittelwert der Sojaerträge aus 9 Ertragsjahren je Verfahren

	0,7 DGVE				1,4 DGVE			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t TS/ha	1,80	2,61	2,57	2,67	2,85	2,86	2,84	2,81
0,7/1,4		92%	90%	94%	100%	100%	100%	
BIO/CON		97%		100%	101%		100%	

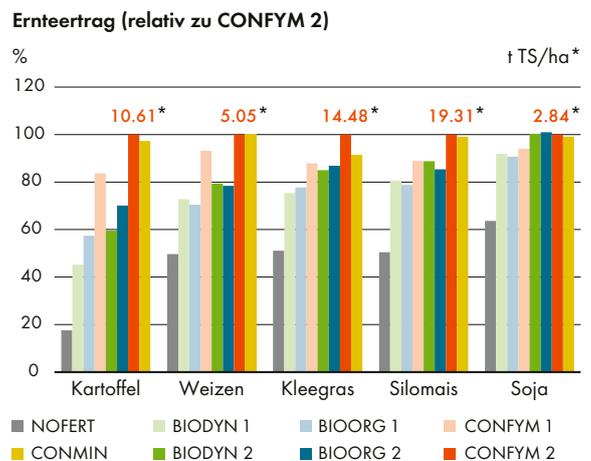


Jedes Jahr werden im DOK-Versuch drei Kulturen angebaut, 2023 waren es Mais, Kartoffeln und Soja.

Kulturenvergleich

Der Vergleich der Erträge in Abbildung 17 zeigt recht deutlich die unterschiedliche Sensitivität der Kulturen gegenüber dem Anbauverfahren. Soja scheint, im Gegensatz zur Kartoffel, von der Wahl des Verfahrens ziemlich unbeeindruckt zu sein. Neben der Limitierung durch Stickstoff und Kalium spielen bei Kartoffeln Krankheiten und Schädlinge eine grosse Rolle für den Ertrag, während Soja als neu eingeführte Kultur in unserem Klima damit noch kaum Probleme hat. Die niedrigeren Erträge bei der reduzierten Düngungsstufe auch bei Leguminosen zeigen, dass mit 0,7 DGVE/ha in den Bioverfahren die P- und K-Versorgung auch in einem fruchtbaren Boden knapp wird, weil keine oder wenige Ergänzungsdünger eingesetzt werden. Langfristig sind die Bioverfahren deshalb auf erlaubte mineralische oder organische Handelsdünger angewiesen, oder greifen zurück auf Recyclingdünger wie Grüngutkompost, feste oder flüssige Gärrückstände.

Abbildung 17: Durchschnittlicher Ertrag aller Hauptkulturen



Durchschnittlicher Ertrag im Vergleich zum Verfahren CONFYM 2 aus der zweiten bis sechsten FFP, Mais und Soja nur aus der vierten bis sechsten.

Auf den Punkt gebracht: Ertrag der Kulturen

Die Biosysteme erzielten im Vergleich zu den konventionellen geringere Erträge bei gleichzeitig niedrigerem Einsatz von Nährstoffen und Pflanzenschutzmitteln. Soja ist unabhängig von der Stickstoffnachlieferung aus dem Boden und bildet eine Ausnahme: Die Erträge waren gleich hoch. Beim Klee gras war der Ertragsunterschied gering aber bei den Kartoffeln sehr hoch. Interessant ist, dass bei halber Düngungsintensität die Erträge im konventionellen System CONFYM höher waren als in den Biosystemen mit praxisüblicher Düngung. Das ist ein Hinweis darauf, welchen Einfluss der Pflanzenschutz und die leichtlöslichen Nährstoffe auf die Erträge haben, vor allem bei Kartoffeln und Weizen. Vorfrucht, Gründüngungen und auf den biologischen Landbau abgestimmte Züchtungsziele können das Ertragspotenzial für den Bioanbau noch weiter steigern.

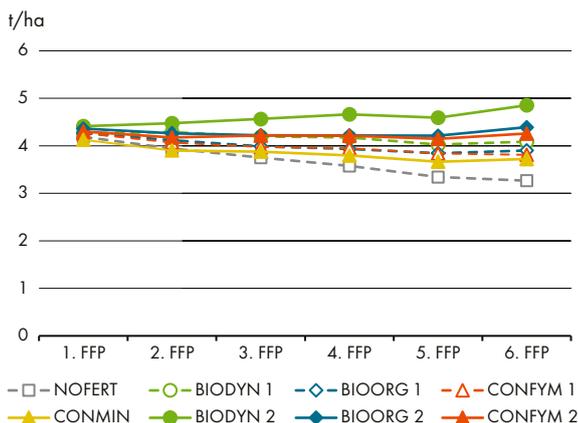
Nährstoffdynamik

Stickstoff

Der grösste Teil des Stickstoffs im Boden liegt in organischer Form vor. Der mineralische N ist für die Pflanzenernährung sehr relevant, da er direkt verfügbar ist. Im Mittel aller Verfahren betrug der Bodengehalt von Ntotal in den oberen 20 cm 1,6 g pro kg Boden. In der Bodenschicht von 30 bis 50 cm Tiefe war der Ntotal-Gehalt nur noch ungefähr halb so hoch.

Das C/N-Verhältnis der organischen Bodensubstanz veränderte sich über den DOK-Versuchszeitraum kaum. Der Mittelwert lag konstant bei $9 \pm 0,11$ und zeigte keine Verfahrenseffekte.

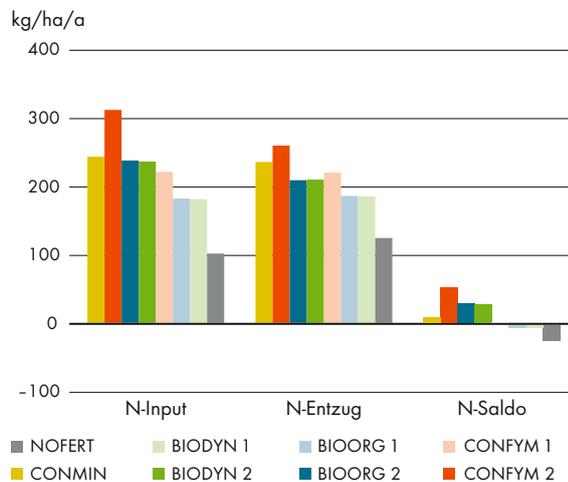
Abbildung 18: Gesamtstickstoffvorrat im Boden



N-Vorrat in den obersten 20 cm des Bodens. Mittelwert der Messungen während jeder Fruchtfolgeperiode. Die Daten wurden errechnet aus den Ntotal-Gehalten unter Berücksichtigung der Lagerungsdichte des Bodens, gemessen in der ersten FFP.

Pro Hektar wurden in 0 bis 20 cm Bodentiefe 3,2 bis 4,9 Tonnen N-Vorrat gemessen. Im Verfahren BIODYN 2 nahm der N-Vorrat um 9 kg jährlich zu (Abbildung 18). In den Verfahren BIOORG 2 und CONFYM 2 waren die N-Vorräte dieser Bodenschicht über die Zeit konstant. In allen anderen Verfahren sind die N-Vorräte gesunken, um bis zu 20 kg jährlich in der ungedüngten Kontrolle. Die Ergebnisse zeigen, dass in den Verfahren mit reduzierter Düngung der N-Vorrat im Boden nicht aufrechterhalten werden konnte. Das heisst die Stickstoffnutzung in diesen Verfahren ist nicht nachhaltig.

Abbildung 19: Stickstoff-Fracht und -Saldo



N-Bilanz mit Zufuhr aus Düngung, Deposition, Saatgut und N-Fixierung aus der Atmosphäre sowie Entzug durch Abfuhr des Ernteguts. Mittelwert aus fünf Fruchtfolgeperioden zwischen 1985 und 2019.

Für die Zeit von 1985 bis 2019 wurden Bodenoberflächenbilanzen errechnet. Diese stellen die N-Zufuhr dem N-Entzug durch das Erntegut gegenüber. Die Zufuhrgrössen von Stickstoff sind:

- Düngung
- Symbiotische N₂-Fixierung
- N-Deposition
- N im Saatgut

In den Verfahren mit praxisüblicher Düngung war der Saldo zwischen Zufuhr und Entzug positiv und lag bei einem Überschuss von 23 kg (BIODYN 2 und BIOORG 2) bis 46 kg (CONFYM 2) Stickstoff pro Hektar und Jahr (Abbildung 19). Im rein mineralisch gedüngten CONMIN-System war die Bilanz ausgeglichen. Die Verfahren mit reduzierter Düngung wiesen jährliche Defizite zwischen 5 und 10 kg Stickstoff pro Hektar auf. Im nicht gedüngten Verfahren NOFERT betrug das Defizit 31 kg pro Hektar und Jahr (Tabelle 10).

Stickstoffverluste durch Auswaschung

Die negativen N-Salden bei reduzierter und fehlender Düngung zeigen, dass mehr N aus der organischen Bodensubstanz freigesetzt als wieder eingebaut wird. Die N-Vorräte haben jedoch bei praxisüblicher Düngung weniger zugenommen als aufgrund der N-Saldi zu erwarten gewesen wäre. In CONFYM 1 und CONMIN hat der N-Vorrat dagegen mehr abgenommen, als aufgrund der Negativsaldi zu erwarten gewesen wäre.

Diese Abweichungen sind dadurch erklärbar, dass Ammoniakverluste bei der Ausbringung, Denitrifikationsverluste oder Nitratauswaschung in der Bodenoberflächenbilanz nicht berücksichtigt sind. Die Summe dieser Verluste beträgt bei praxisüblicher Düngung 12 bis 47 kg pro Hektar und Jahr.

Die Veränderungen der N-Vorräte in den tieferen Bodenschichten wurden erst später untersucht: 2019 und 2020 wurden Bodenproben aus 30 bis 50 cm Tiefe entnommen. Die für diese Schicht berechneten N-Vorräte zeigten deutlich geringere Unterschiede zwischen den Systemen als in 0 bis 20 cm Bodentiefe. Der Effekt der fehlenden Düngung war lediglich in NOFERT noch in 30 bis 50 cm Tiefe zu erkennen.

Effiziente Stickstoffnutzung

Aus der Bodenoberflächenbilanz lässt sich auch eine Stickstoff-Nutzungseffizienz (NUE) ableiten: Diese gibt Hinweise darauf, wie viel des zugeführten N von den Pflanzen aufgenommen wird. Eine NUE über 100 % bedeutet, dass mehr N entzogen

als zugeführt wird und legt daher die Vermutung nahe, dass N aus der organischen Bodensubstanz (Humus) freigesetzt wird. Für die Verfahren mit praxisüblicher Düngung und CONMIN betrug die NUE zwischen 85 und 100 % (Tabelle 10). Die NUE bezieht sich hier auf die Gesamtheit der N-Zufuhr, zeigt jedoch, dass sowohl Hofdünger- als auch Mineraldünger und der biologisch fixierte Stickstoff im DOK-Versuch effizient genutzt wurden.

Bindung von atmosphärischem Stickstoff

Leguminosen gehen mit Rhizobien eine Symbiose ein: In sichtbaren Knöllchen an der Wurzel wandeln die Bakterien molekularen Luftstickstoff (N₂) in Ammonium um, das die Pflanze verwerten kann, um Proteine zu bilden. Die symbiotische N₂-Fixierung war die grösste Quelle an N in allen Systemen, ausser in den mineralisch gedüngten Verfahren CONFYM 2 und CONMIN. Die Verfahren mit reduzierter Düngung zeigten eine ähnliche Fixierleistung wie die mit praxisüblicher Düngung. In CONMIN war die Fixierleistung dagegen deutlich geringer. Am meisten N wurde durch den Klee der Kunstwiesen fixiert, gefolgt von Sojabohnen und den Zwischenfrüchten.

Für die N-Fixierung durch Rhizobien wird eine gute Versorgung des Bodens mit Phosphor, Kalium und Spurenelementen benötigt. Im ungedüngten Verfahren hat die N₂-Fixierung über die Zeit abgenommen, was höchstwahrscheinlich auf die abnehmenden Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor und Kalium in diesen Böden zurückzuführen ist.

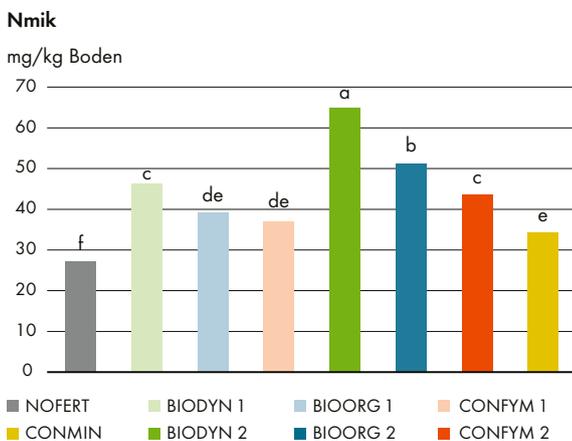
Tabelle 10: Stickstoffeintrag und -entzug in den DOK-Verfahren. Mittelwert aus den fünf Fruchtfolgeperioden zwischen 1985 und 2019.

Angaben in kg/ha/a	Dünger	Symbiotische Fixierung	Deposition und Saatgut	Entzug	Saldo	Boden-Vorratsänderung	Nutzungseffizienz
NOFERT	0	75	21	128	-31,1	-26,2	133 %
BIODYN 1	47	112	21	189	-8,7	-9,1	105 %
BIOORG 1	48	111	21	190	-9,6	-10,0	106 %
CONFYM 1	85	112	21	223	-4,5	-11,2	102 %
BIODYN 2	93	122	21	214	22,9	9,3	91 %
BIOORG 2	96	119	21	213	23,7	1,2	90 %
CONFYM 2	171	117	21	264	45,9	-0,7	85 %
CONMIN	121	99	21	240	2,1	-10,0	99 %

Stickstoff aus Mikroben

Die Mikroorganismen des Bodens können viel Stickstoff in ihrer Biomasse (Nmik) speichern. Abbildung 20 zeigt Nmik-Gehalte im Boden. Unter Berücksichtigung des Bodenvolumens und der Lagerungsdichte des Bodens ergeben sich im BIODYN-2-Verfahren bis zu 150 kg Nmik pro Hektar. Die mikrobielle Biomasse dient im Boden als temporärer Speicher für N, der nach dem Absterben der Mikroorganismen, beispielsweise durch Frost oder Austrocknung, bei genügend Bodenfeuchte wieder frei wird und den Pflanzen zur Verfügung steht.

Abbildung 20: Mikrobielle Biomasse



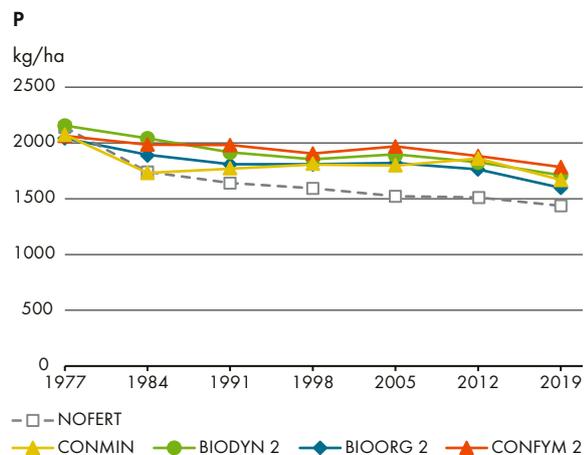
Mikrobiell gebundener Stickstoff in den acht Verfahren des DOK-Versuchs. Mittelwert aus Analysen aller Parzellen im Frühjahr 1998, 2006, 2012 und 2019.

Wiederholte Messungen der mikrobiellen Biomasse am Ende der letzten vier Fruchtfolgeperioden zeigen deutlich mehr mikrobiell gebundenen Stickstoff im BIODYN-2-Verfahren im Vergleich zu BIOORG 2 und noch deutlicher zu CONFYM 2. Das CONMIN-Verfahren zeigte ähnliche Werte wie die Verfahren mit reduzierter Düngung. Das NOFERT-Verfahren wies die niedrigsten Gehalte an Nmik auf.

Phosphor

Vor der Etablierung des DOK-Versuchs im Jahr 1977 wurden im Schlag C die Phosphorvorräte jeder Parzelle erhoben: Die P-Vorräte in den obersten 20 cm des Bodens betragen zu diesem Zeitpunkt um die 2100 kg/ha (Abbildung 21). Der Boden war also gut mit P versorgt.

Abbildung 21: Gesamtphosphorvorrat bis 20 cm



Phosphorvorrat (P) in der Bodenschicht von 0 bis 20 cm Tiefe im zeitlichen Verlauf über sechs Fruchtfolgeperioden bei differenzierter Bewirtschaftung in Schlag C (n = 4).



Der Mist wird auf den DOK-Parzellen von Hand ausgebracht.

In allen Anbausystemen ist seither ein abnehmender Trend zu beobachten, während sich der Vorrat in CONMIN (nach seiner Etablierung 1984; zuvor NOFERT) relativ konstant verhält. Die Abnahme des P-Vorrats in NOFERT betrug fast 20 %, während die Bioverfahren im Durchschnitt 5 % geringere P-Vorräte als CONFYM 2 aufwiesen.

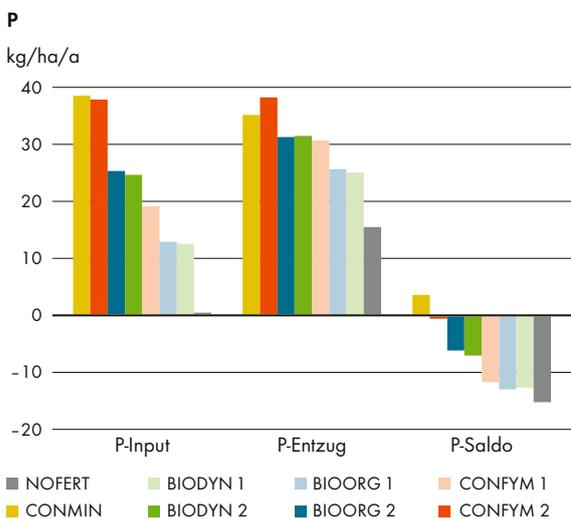
Phosphorbilanz

Die Phosphorbilanz berücksichtigt die Zufuhr durch Dünger und Saatgut und den Entzug durch das Erntegut (Abbildung 22). Im Verfahren CONFYM 2 lag die Zufuhr bei durchschnittlich 40 kg P pro Hektar und Jahr. In den Verfahren BIODYN 2 und BIOORG 2 lag sie um circa 38 % niedriger, bei 25 bis 26 kg P pro Hektar und Jahr. Zwischen den Verfahren mit reduzierter Düngung sind die Verhältnisse ähnlich, aber auf einem tieferen Niveau.

Der Entzug von P durch das Erntegut war in den Bioverfahren mit praxisüblicher Düngung mit 32 kg nur um 16 % geringer als in CONFYM 2 mit 38 kg P pro Hektar und Jahr. Das weist darauf hin, dass P aus der Düngung in den Biosystemen effizienter genutzt wird. Gleichzeitig kommt es jedoch zu einem kontinuierlichen Abbau der P-Vorräte im Boden aller Systeme mit Ausnahme von CONMIN.

Wegen der geringen Löslichkeit von Phosphor profitierten vor allem die Kulturen in der ersten FFP vom anfänglich hohen P-Vorrat. Gleichzeitig konnten bereits zu Beginn des DOK-Versuchs systemspezifische Unterschiede in der P-Verfügbarkeit ausgemacht werden (Abbildung 23).

Abbildung 22: Phosphor-Fracht und -Saldo



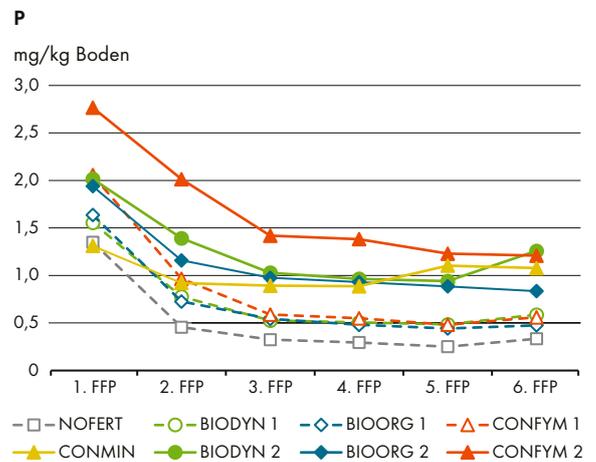
Phosphorbilanz aus der Zufuhr durch Düngung und Saatgut und dem Entzug durch Abfuhr des Ernteguts. Mittelwert aus den fünf Fruchtfolgeperioden zwischen 1985 und 2019.

Das Anbauverfahren CONFYM 2 weist durch die Düngung mit leicht verfügbarem Mineraldünger eine höhere P-Verfügbarkeit auf als BIODYN 2 und BIOORG 2. Legt man die aktuellen Empfehlungen zur Düngung der GRUD zugrunde, so war in den Anbau-

verfahren CONFYM 2 und BIODYN 2 nach 42 Jahren noch «genügend» P verfügbar (Abbildung 23).

Das Anbauverfahren BIOORG 2 sowie alle Verfahren mit reduzierter Düngung wiesen jedoch bereits spätestens seit der vierten FFP eine «mässige» Versorgung auf. In der landwirtschaftlichen Praxis wird eine mögliche Ertragsminderung üblicherweise durch eine zusätzliche Düngung ausgeglichen. Ursachen der abnehmenden Gehalte an löslichem Phosphor sind die negativen P-Saldi, die schnelle Festlegung und die Auswaschung in tiefere Bodenschichten.

Abbildung 23: Löslicher Phosphor



Lösliche Phosphorgehalte des Bodens in Bodenproben nach der Ernte. Mittelwerte aus jährlichen (1978-2006, 2008-2010) und zweijährlichen (2010-2018) Erhebungen pro Parzelle, CO₂-Methode.

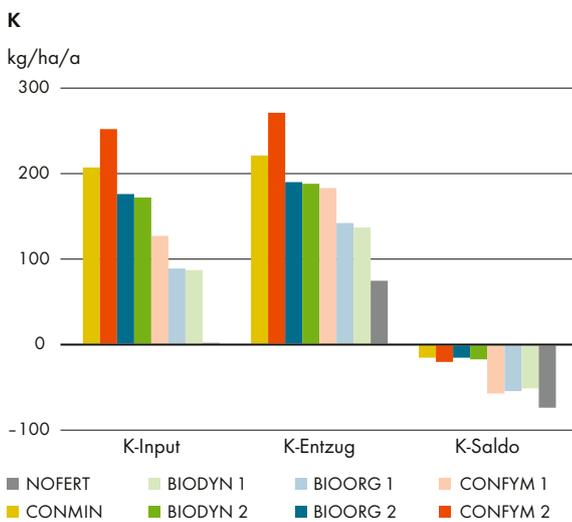


Aufgrund von kühler Witterung nach der Saat waren in den biologischen Verfahren mit reduzierter Düngung am Mais P-Mangelsymptome sichtbar.

Kalium

Die Kaliumbilanz wird ebenfalls aus der Differenz zwischen Zufuhr durch Düngung und Saatgut und Entzug durch das Erntegut ermittelt. Die höchste K-Zufuhr erhielt das Anbauverfahren CONFYM 2 mit 251 kg K pro Hektar und Jahr. Der Entzug war in allen Anbauverfahren höher als die Zufuhr, was in einer negativen Bilanz in allen Verfahren resultierte (Abbildung 24).

Abbildung 24: Kalium-Fracht und -Saldo

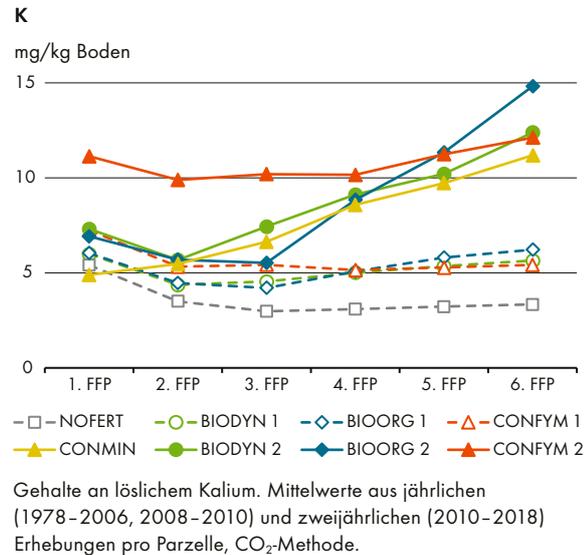


Kaliumbilanz aus der Zufuhr durch Düngung und Saatgut und dem Entzug durch Abfuhr des Ernteguts. Mittelwert aus den fünf Fruchtfolgeperioden zwischen 1985 und 2019.

Die Verfügbarkeit von Kalium zeigt eine klare Differenzierung zwischen den Anbausystemen und den Düngestufen (Abbildung 25). Auffällig ist die Zunahme der K-Verfügbarkeit in allen Anbauverfahren mit praxisüblicher Düngung und im CONMIN-Verfahren, in dem die Düngung seit den 1990er-Jahren präzise dosierbar ist. In diesem Zeitraum nahm die Kalium-Zufuhr in den Bioverfahren teilweise merklich zu, der Entzug stieg aber nicht im gleichen Masse an.

Dennoch sind alle Anbausysteme aktuell in der Versorgungsklasse «mässig» einzuordnen. In der landwirtschaftlichen Praxis wäre eine erhöhte K-Düngung empfohlen. Das nicht gedüngte Kontrollverfahren NOFERT ist bereits seit Mitte der 1980er-Jahre in der Versorgungsklasse «arm». In mehreren Studien wurde im NOFERT-Verfahren eine Limitierung des Pflanzenwachstums durch die verminderte Kaliumverfügbarkeit nachgewiesen.

Abbildung 25: Lösliches Kalium



Gehalte an löslichem Kalium. Mittelwerte aus jährlichen (1978–2006, 2008–2010) und zweijährlichen (2010–2018) Erhebungen pro Parzelle, CO₂-Methode.

Nährstoff-Einträge über Wurzeln und Stickstoff-Transfer

Kohlenstoff- und Stickstoffeinträge über Wurzeln bilden die Hauptquelle für den Erhalt und den Aufbau der organischen Bodensubstanz (OBS). Wurzeleinträge bestehen aus den Wurzeln und den Stoffen, die von den Wurzeln über die Wachstumsperiode der Pflanze in den Boden abgegeben werden. Diese werden als Rhizodeposition bezeichnet und umfassen Substanzen wie lösliche Wurzelexsudate und Mucigel (Schleimschicht auf der Oberfläche von Wurzeln), aber auch abgelöste Wurzelzellen, Wurzelhaare und Feinwurzeln, die im Boden schnell von den Mikroorganismen abgebaut werden. Die Summe der Einträge wird als unterirdischer Kohlenstoff- und Stickstoffeintrag bezeichnet.

Kohlenstoffeinträge

Wissenschaftliche Modelle, welche die Kohlenstoffeinträge (C) in Böden abschätzen und die Grundlage für die internationalen Klimaberichte sind, gingen bisher davon aus, dass sich unterirdische C-Einträge proportional zur oberirdischen Biomasse verhalten: Je höher der Ertrag einer Kultur ist, desto mehr C wird unterirdisch in den Boden eingetragen. Im Umkehrschluss würde das heissen, dass in konventionellen Anbausystemen mehr C in den Boden eingetragen wird als in biologischen Systemen. Ergebnisse aus dem DOK-Versuch konnten diese Annahme für Winterweizen und Mais widerlegen.

Sie zeigen, dass die unterirdischen Einträge weitgehend unabhängig von der oberirdischen Biomasseproduktion sind und dass biologische Systeme trotz geringerer Erträge tendenziell sogar etwas höhere unterirdische C-Einträge aufweisen. Der Anteil der unterirdischen C-Einträge an der gesamten C-Assimilation betrug zwischen 18 und 26 %. Dabei war die Rhizodeposition für die unterirdischen C-Einträge von elementarer Bedeutung und hatte wiederum an den unterirdischen C-Einträgen einen Anteil von 57 bis 63 % bei Mais und 54 bis 58 % bei Winterweizen (Abbildung 26).

Stickstoff-Transfer in der Klee-graswiese

C- und N-Einträge sind gleichermassen elementar für den Erhalt oder den Aufbau der OBS. Im DOK-Versuch war das C/N-Verhältnis der OBS relativ konstant bei circa neun. Das heisst pro kg C werden rund 0,11 kg N langfristig gebunden. Das ist ein vergleichsweise guter Wert, damit steht ausreichend N für die Kulturpflanzen zur Verfügung.

Am Beispiel der Klee-graswiese im DOK lässt sich zeigen, wie sich die unterirdischen Wurzeleinträge des Klees auf die biologische N₂-Fixierung des gesamten Gemenges auswirken. Beim Klee verhielten sich die unterirdischen N-Einträge, im Gegensatz zu C in Mais und Weizen, proportional zur oberirdischen N-Assimilation. Es fällt auf, dass im ersten Nutzungsjahr der in den Wurzeln gebundene N und die N-Rhizodeposition über die Vegetationsperiode zunehmen. Im zweiten Nutzungsjahr nimmt der Wurzel-N wieder ab, aber die Einträge über Rhizodeposition steigen deutlich an. Das spricht für einen sehr grossen Wurzelumsatz, der durch häufige Schnittnutzung und die Alterung des Klees begründet ist.

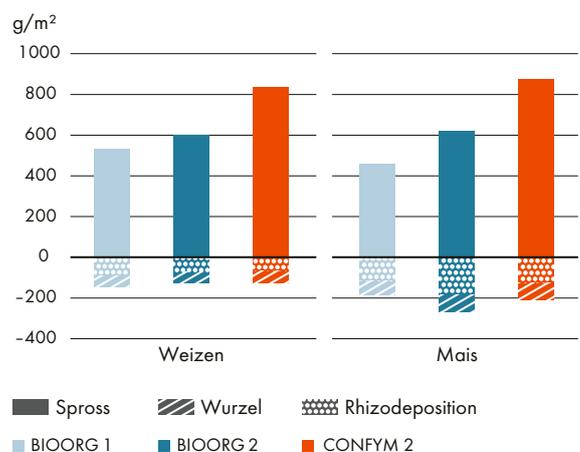
Die DOK-Verfahren unterschieden sich deutlich in der N-Assimilation, allerdings war der Anteil des unterirdischen N immer konstant und betrug rund 29 % des Gesamt-N. Der Anteil der Rhizodeposi-

tion am unterirdischen N stieg vom Ende des ersten Hauptnutzungsjahres bis zum Ende des zweiten Hauptnutzungsjahres von rund 35 % auf 75 %.

Der Grasanteil des Klee-grases profitierte direkt von den N-Einträgen über die Rhizodeposition des Klees. So konnte in zwei unabhängigen DOK-Studien gezeigt werden, dass in biologischen Systemen rund 40 % des vom Gras aufgenommenen N vom Klee stammen und damit wiederum überwiegend aus der biologischen N₂-Fixierung kommen.

Die Berücksichtigung der unterirdischen N-Einträge und des N-Transfers von Klee zu Gras hat einen wesentlichen Einfluss auf die Schätzung der fixierten N-Menge in Klee-graswiesen. Diese liegt nämlich deutlich tiefer, wenn nur der oberirdische Aufwuchs zugrunde gelegt wird. So konnte in BIOORG 2 2007 im Vergleich zu herkömmlichen Schätzverfahren die 1,8-fache Menge fixierten Luftstickstoffs ermittelt werden.

Abbildung 26: Verteilung der Assimilate in Spross, Wurzel und Rhizodeposition bei Weizen und Mais



Vergleich der Verfahren BIOORG 1, BIOORG 2 und CONFYM 2.

Auf den Punkt gebracht: Nährstoffdynamik

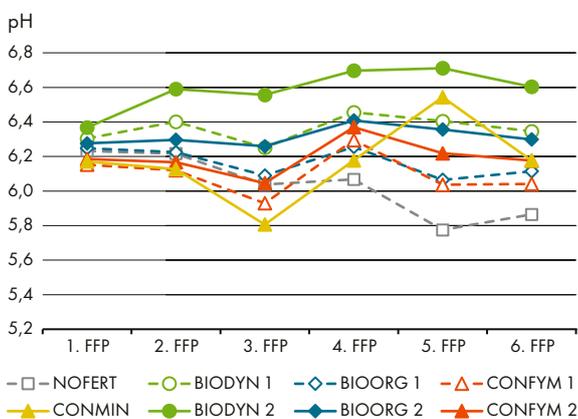
Der Stickstoffvorrat in den oberen 20 cm des Bodens nahm, ähnlich wie der organische Kohlenstoffvorrat, ausschliesslich im BIODYN-2-Verfahren zu. In BIOORG 2 und CONFYM 2 waren die Vorräte konstant. Keine oder reduzierte Hofdüngergaben führten zur Abnahme der Stickstoffvorräte. Die Fixierung von Luftstickstoff durch die Symbiose von Leguminosen mit Rhizobien machte in allen Systemen einen sehr hohen Anteil der gesamten Stickstoffversorgung aus, war aber in den Systemen ohne Hofdünger (CONMIN und NOFERT) deutlich reduziert. Die Phosphorvorräte nahmen in allen Systemen ab, aufgrund der eingeschränkten Düngung in den Biosystemen stärker als in den konventionellen. Bisher sind mit Ausnahme von NOFERT nur selten Mangelsymptome aufgetreten, was auf eine effiziente Phosphornutzung in den Biosystemen hinweist. Die Kaliumversorgung weist in allen Verfahren einen negativen Bilanzsaldo auf, die Kaliumverfügbarkeit zeigt allerdings in den letzten drei Fruchtfolgeperioden einen positiven Trend.

Bodenqualität

pH-Wert

In den biologischen Systemen hielt sich der pH-Wert des Bodens über die gesamte Versuchsdauer auf einem stabilen Niveau zwischen 6,6 und 6,3. In den konventionellen Systemen sank der pH-Wert im Laufe der ersten 25 Jahre auf Werte unter 6, die nach GRUD für diesen Bodentyp als kritisch betrachtet werden. Diese Entwicklung ist auf den versauernden Effekt von Mineraldüngern zurückzuführen.

Abbildung 27: Verlauf der Bodenreaktion



Die Verfahren CONFYM und CONMIN wurden in den Jahren 1999-2005 gekalkt (n = 12).

Die Erhaltung eines pH-Wertes über 6 ist wichtig für die Pflanzenernährung, die biologische Aktivität und die Bodenstruktur. Um den pH-Wert in den konventionellen Verfahren wieder anzuheben, wurden die Böden zur Sanierung zu Beginn der vierten FFP 1999 mit fünf Tonnen CaO-Äquivalenten pro Hektar gekalkt sowie mit basisch wirkendem Kalkammonsalpeter gedüngt. Der Erfolg dieser Massnahme zeigt sich im pH-Anstieg in den konventionellen Systemen (Abbildung 27). CONMIN erhielt eine zusätzliche Kalkung, weil hier der pH-Wert weiterhin niedriger war als der in CONFYM. Der Trend zur Versauerung scheint sich aber nach der Kalkung wieder fortzusetzen.

Bodenstruktur

Bodenaggregate

Aggregate im Boden werden durch das Zusammenlagern von mineralischen Tonteilchen und organischen Partikeln gebildet. Sie werden durch Bodenorganismen mit Hyphen und Biofilmen stabilisiert. So bilden sich relativ feste Strukturen, die sich im Wasser nicht lösen. Die Ausprägung der Aggregate ist ein Indikator für die Strukturstabilität des Bodens.

Ein Boden mit mehr wasserstabilen Bodenaggregaten ist gekrümelt, verschlämmt weniger, und ist durch eine bessere Wasserinfiltration stärker vor Erosion geschützt. Er erlaubt eine bessere Durchlüftung und Sauerstoffversorgung der Wurzeln. Der relativ strukturschwache Lössboden des DOK-Versuchs neigt dazu zu verschlämmen. Die Böden der Bioverfahren verschlämmen weniger stark.

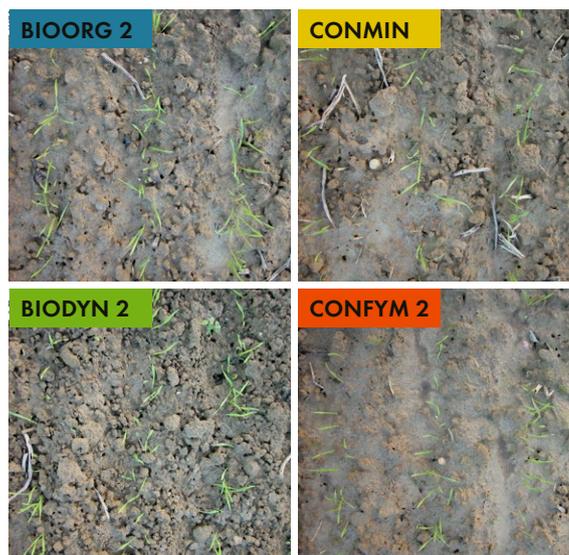
Interessanterweise zeigt die Aggregatstabilität eine starke Saisonalität (Tabelle 11). Besonders im Sommer, bei trockenem Boden, war die Aggregatstabilität im Lössboden in allen Verfahren gering. Die beiden Biosysteme hatten dabei noch den höchsten Anteil stabiler Aggregate. Dies kann damit zusammenhängen, dass hier mehr Mikroorganismen vorkommen und in BIODYN auch mehr Humus, was die Aggregatbildung fördert. Im Frühjahr waren die Unterschiede kleiner. Unter feuchten Bedingungen bleiben die Pilzhyphen und Biofilme der Bakterien als «Klebstoffe» wirksam.

Tabelle 11: Anteil wasserstabiler Aggregate in Böden des DOK-Versuchs

	Anteil stabiler Aggregate	Signifikanz
BIODYN 2	50,1 %	a
BIOORG 2	44,2 %	ab
CONFYM 2	38,4 %	b
CONMIN	38,4 %	b
Gesamtdurchschnitt über alle Verfahren		
März 2000	55,3 %	a
März 2003	48,2 %	b
Juli 2003	24,8 %	c

Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichte des Bodens im DOK-Versuch ist hoch, da der Lössboden vorwiegend aus feineren Schluffpartikeln besteht. Durch biologische Verbauung zum Beispiel mit Hilfe von Regenwürmern und Feinwurzeln kann dieser Boden dennoch ein System von feinen und groben Poren bilden. Mit Bodenbearbeitung lässt er sich temporär auflockern. Durch den Einfluss der Fruchtfolge und der Bodenbearbeitung verändert sich die Lagerungsdichte im Laufe einer Vegetationsperiode. Die Lagerungsdichten unterschieden sich zwischen den Anbausystemen nur geringfügig, wobei eine Veränderung über ein Zehntel bei dieser Messgrösse schon relevant sein kann. Letztendlich bleibt der Boden, bedingt durch das Ausgangsmaterial, arm an Grobporen, neigt zu Staunässe und erwärmt sich langsam.



Die Aggregatstabilität beeinflusst die Tendenz der Böden zu verschlämmen.

Tabelle 12: Lagerungsdichte in den Böden des DOK-Versuchs in kg/dm³

Stufe	Lagerungsdichte 1. FFP	SD	Lagerungsdichte 3. FFP	SD
NOFERT	1,32	0,046	1,26	0,035
BIODYN 1	1,33	0,043	1,20	0,039
BIOORG 1	1,32	0,039	1,23	0,029
CONFYM 1	1,33	0,023	1,22	0,070
BIODYN 2	1,31	0,047	1,20	0,044
BIOORG 2	1,32	0,040	1,22	0,046
CONFYM 2	1,32	0,039	1,22	0,027
CONMIN	1,31	0,057	1,25	0,066
Mittelwert	1,32		1,22	

Bodenkohlenstoff

In den Böden ist global mehr Kohlenstoff gespeichert als in der pflanzlichen Biomasse der Erde und im Kohlendioxid (CO₂) der Atmosphäre zusammen. Sie spielen daher eine wichtige Rolle in der Diskussion um den Klimawandel, denn besonders die oft an Humus verarmten Ackerböden haben ein grosses Potenzial Humus aufzubauen und damit CO₂ aus der Atmosphäre einzuspeichern.

Organischer Kohlenstoff

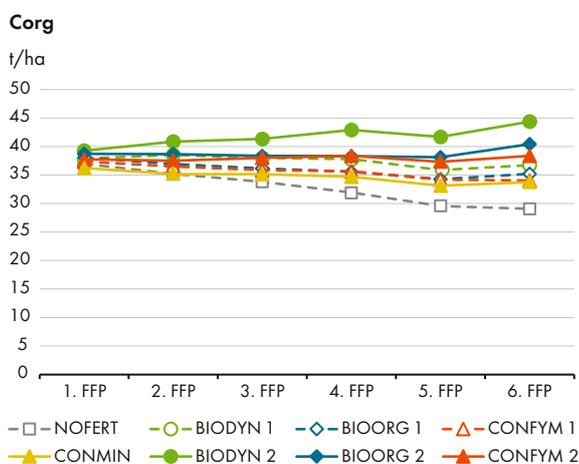
Die organische Bodensubstanz (Humus) wird aus den Rückständen der pflanzlichen und tierischen Biomasse gebildet, die im Boden umgesetzt wor-

den sind. Sie besteht im Durchschnitt aus 58 % C. Zur Quantifizierung der OBS wird daher meistens der organische Kohlenstoffgehalt (Corg) gemessen (OBS = 1,725 × Corg). Die OBS ist der am häufigsten verwendete Bodenindikator zur Analyse der Qualität eines Bodens für die Bewirtschaftung.

Im DOK-Versuch wurden jährlich nach der Ernte Bodenproben aus einer Tiefe von 0–20 cm gezogen und archiviert. Ein Grossteil dieser Proben über die gesamte Versuchsperiode wurden nach Ende der sechsten FFP einheitlich analysiert. Damit konnten Einflussfaktoren durch wechselndes Laborpersonal, neue Geräte und Methoden ausgeklammert und die tatsächliche Entwicklung dargestellt werden.

Die neuen Analysen ergaben folgende Ergebnisse: Der organische Kohlenstoff (Corg) ist im BIODYN-2-Verfahren deutlich am höchsten (Abbildung 28). Zudem war in diesem Verfahren statistisch gesichert ein positiver Trend feststellbar. In den Verfahren BIOORG 2 und CONFYM 2 blieben die Gehalte konstant – die leichte Zunahme hier liess sich statistisch nicht absichern. In allen Verfahren mit reduzierter Düngung und in CONMIN nahmen die Gehalte an Corg ab. Die deutlichste Abnahme war erwartungsgemäss in NOFERT zu verzeichnen.

Abbildung 28: Bodenkohlenstoffvorrat



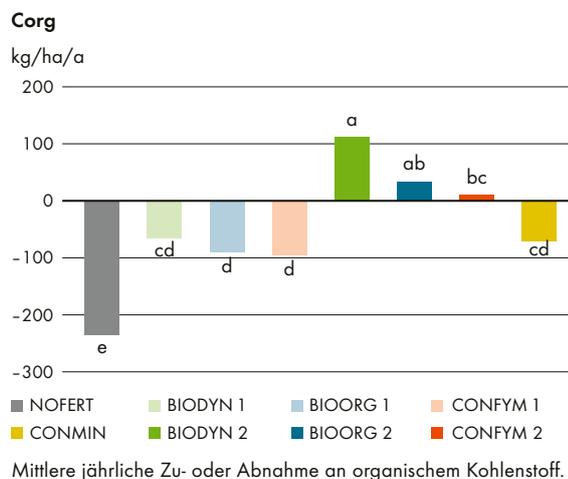
Kohlenstoffvorrat in den obersten 20 cm des Bodens der acht Anbauverfahren (n = 12). Diese Daten wurden errechnet aus den Corg-Gehalten und der Lagerungsdichte des Bodens in der ersten FFP. Die Umrechnung von Corg zu OBS erfolgt durch Multiplikation mit dem Faktor 1,725 (OBS = 1,725 × Corg).

Veränderungen im Kohlenstoffvorrat

Der Kohlenstoffvorrat bezeichnet die Menge an Kohlenstoff, die im Boden einer definierten Fläche vorhanden ist. Für den DOK-Versuch wurde er für die oberste Bodenschicht bis 20 cm Tiefe pro Hektar berechnet (Abbildung 28). Dabei wurde die Lagerungsdichte aus einer Messung in der ersten FFP zugrunde gelegt, als diese Messgrösse noch nicht von den Anbauverfahren beeinflusst war.

Zwischen der ersten und der sechsten FFP gab es eine deutliche Zunahme der Corg-Vorräte in Höhe von 12 % in BIODYN 2 und gleichbleibende Vorräte in BIOORG 2 und CONFYM 2. Die Verfahren mit reduzierter Düngung haben in diesem Vergleich 4 % (BIODYN 1) bis 9 % (BIOORG 1, CONFYM 1 und CONMIN) verloren. Das ungedüngte Verfahren NOFERT hat im Vergleich zum Kohlenstoff-Vorrat der ersten FFP 22 % verloren.

Abbildung 29: Kohlenstoffvorratsänderung im Boden



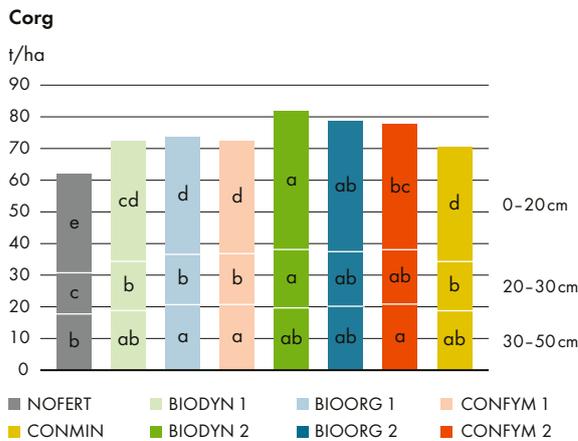
Mittlere jährliche Zu- oder Abnahme an organischem Kohlenstoff.

Aus der zeitlichen Dynamik der C-Vorräte lassen sich die mittleren jährlichen Zuwachs- oder Verlustraten ableiten (Abbildung 29). Nur die Anbauverfahren mit praxisüblicher Düngung konnten den Vorrat an Corg vermehren oder halten. Alle Verfahren mit reduzierter Düngung sowie CONMIN hatten Verluste von bis zu 100 kg je Hektar jährlich. Bei NOFERT betragen die Verluste 234 kg Corg jährlich.

In der obersten Bodenschicht von 0–20 cm waren die Unterschiede der Verfahren in Hinblick auf Corg am deutlichsten. In dieser Schicht befindet sich die Hauptwurzelmasse und es werden Hofdünger, Gründüngungen und Ernterückstände eingemischt. Die intensivsten Umsetzungsprozesse der organischen Bodensubstanz finden hier statt. Sie können durch Bodenbearbeitung, aber auch durch Mineraldünger und Wurzelausscheidungen stimuliert werden. Ein weiterer Teil des Corg ist in tieferen Bodenschichten gespeichert. Der Gehalt an Corg nimmt mit der Tiefe ab, weil weniger frische organische Substanz über Wurzeln oder Hofdünger zugeführt wird. Mit zunehmender Tiefe wird auch der Verfahrenseinfluss immer geringer; in 30 bis 50 cm Tiefe ist er nur noch im NOFERT-Verfahren erkennbar.

Mit 81 Tonnen pro Hektar bis in 50 cm Tiefe, gemessen in 2019/20, erreichte das BIODYN-2-Verfahren den höchsten Vorrat an Corg. In BIOORG 2 betrug er 80,25 und in CONFYM 2 78,9 t/ha. CONMIN wiederum hatte fast neun Tonnen weniger Corg als CONFYM 2. Diese beiden Verfahren erhielten die Normdüngung und produzierten auch ähnliche Mengen an Ernterückständen, sodass der Unterschied von neun Tonnen als Effekt der organischen Düngung über 35 Jahre (CONMIN war die ersten sieben Jahre ungedüngt) interpretiert werden kann.

Abbildung 30: Organischer Kohlenstoffvorrat



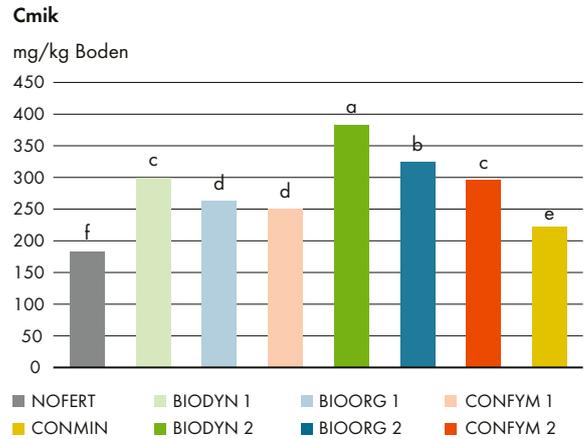
Kohlenstoffvorrat in Bodenschichten bis 50 cm Tiefe nach 42 Jahren differenzierter Bewirtschaftung. Die Unterschiede der Verfahren nehmen mit der Tiefe ab. Proben von 2019 nach Winterweizen und unter Klee gras und 2020 nach Winterweizen; n = 12.

Zusammenfassend ergibt sich, dass nur Verfahren mit praxisüblicher Hofdüngung den Corg (Humusgehalt) im Boden halten konnten, und dass die Kompostierung von Mist in BIODYN 2 sogar in einer Zunahme von Humus über 42 Jahre resultierte. Trotz hoher Erträge verlor das mineralisch gedüngte konventionelle System CONMIN Corg, was angesichts der humusmehrenden Klee graswiesen und der angebauten Zwischenfrüchte bemerkenswert ist. Aber auch die Verfahren der Düngestufe 1 verloren über die Zeit Corg. Reduzierte Bodenbearbeitung und der Einsatz von Grüngutkompost sind ergänzende Massnahmen zum Humusaufbau.

Mikrobielle Biomasse

Die mikrobielle Biomasse setzt sich zusammen aus mikroskopisch kleinen Lebewesen im Boden, zu denen Bakterien, Archaeen, Mikroalgen und manche Pilze gehören. Sie ist der lebende Anteil der organischen Bodensubstanz. Der mikrobielle Kohlenstoff macht 1 bis 3 % des Bodenkohlenstoffs aus. In diesem Dossier ist die mikrobielle Biomasse als mikrobiell gebundener Kohlenstoff (Cmik) (Abbildung 31) und im Kapitel «Nährstoffdynamik» als mikrobieller Stickstoff (Nmik) dargestellt (Abbildung 20).

Abbildung 31: Mikrobielle Biomasse



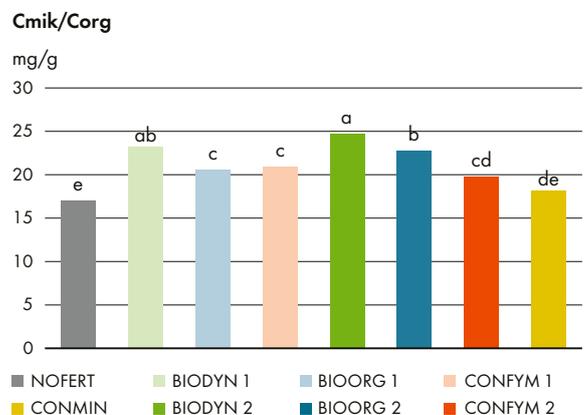
Mikrobiell gebundener Kohlenstoff in den acht Verfahren des DOK-Versuchs. Mittelwert aus Analysen aller Parzellen im Frühjahr 1998, 2006, 2012 und 2019.

In beiden Düngestufen wies das BIODYN-System jeweils die höchste mikrobielle Biomasse auf. CONMIN und NOFERT hatten dagegen die niedrigsten mikrobiellen Biomassegehalte.

Verhältnis Cmik zu Corg

Der Anteil des mikrobiellen am organischen Kohlenstoff wird als Zeigerwert für die Qualität der organischen Substanz verwendet. Dieser Quotient zeigt an, wie gut die Bedingungen für mikrobielles Wachstum im Boden sind und gilt auch als frühzeitiger Indikator für einen steigenden Humusgehalt nach einer Bewirtschaftungsänderung (Abbildung 32).

Abbildung 32: Cmik/Corg-Verhältnis

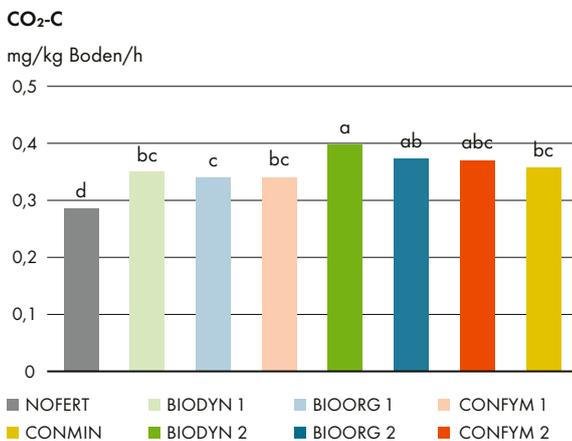


Anteil von Cmik an Corg. Dieser Quotient zeigt an, wie gut sich Böden mit hohem Gehalt an organischer Substanz als Lebensraum für Mikroorganismen eignen.

Bodenatmung

Die Mikroorganismen des Bodens ernähren sich von totem organischen Material und bauen es bis zu seinen mineralischen Grundbausteinen und CO₂ ab. Dieser Prozess ist für den Nährstoffkreislauf von zentraler Bedeutung. Die Bodenatmung ist neben der mikrobiellen Biomasse einer der aussagekräftigsten Bodenparameter. Sie wird als Basal-atmung bezeichnet, wenn sie unter standardisierten Bedingungen im Labor bestimmt wird. Die CO₂-Entwicklung ist ein Mass für die Aktivität von Bodenorganismen, das auch von der Menge an leicht verfügbaren C-Quellen abhängt (Abbildung 33).

Abbildung 33: Bodenatmung

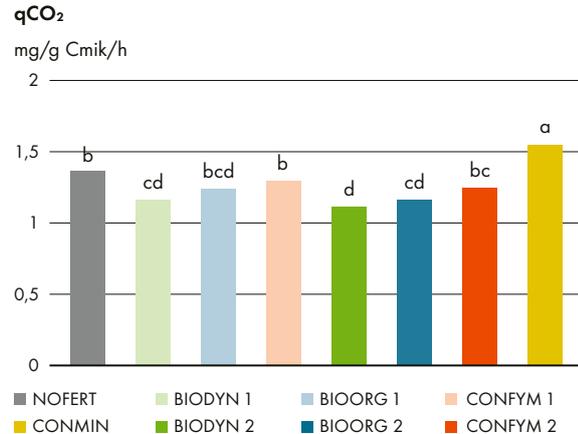


Basal-atmung in den Böden des DOK-Versuchs. Daten aus der Analyse von Bodenproben aus dem Jahr 2019. Ein hoher Wert steht für eine hohe Aktivität der Bodenorganismen.

Metabolischer Quotient

Die Menge an CO₂, die von Mikroorganismen im Boden benötigt wird, um ihre Biomasse aufrechtzuerhalten, gibt Aufschluss darüber, wie gut ihre Lebensbedingungen sind. Die dazugehörige Messgrösse ist der metabolische Quotient qCO₂. Je mehr die Mikroorganismen atmen, desto mehr Energie verbrauchen sie für den Erhalt ihres Stoffwechsels. Ein niedriger Wert zeigt an, dass die Gesellschaft der Mikroorganismen die verfügbare Energie effizient umsetzt.

Abbildung 34: Metabolischer Quotient



Metabolischer Quotient für CO₂ in den Böden des DOK-Versuchs. Daten aus der Analyse von Bodenproben aus dem Jahr 2019.

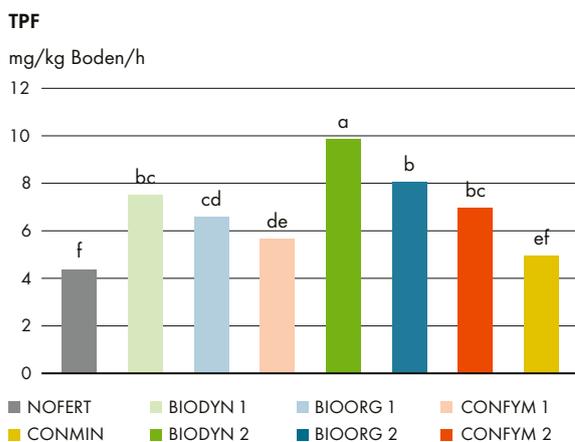
Trotz ihrer hohen Basal-atmung (Abbildung 33) setzt die mikrobielle Bodengemeinschaft in BIODYN die verfügbare Energie effektiver um. Sie verbraucht 16 % weniger Energie pro Einheit Biomasse für ihren Erhaltungsbedarf als die mikrobielle Gemeinschaft in CONFYM (Abbildung 34). Das CONMIN-Verfahren weist den höchsten metabolischen Quotienten auf. Das bedeutet, dass die Mikroorganismen im BIODYN-System die besten Lebensbedingungen vorfinden und in CONMIN am meisten gestresst sind.

Bodenenzyme

Dehydrogenasen

Enzyme aus der Gruppe der Dehydrogenasen spielen eine wichtige Rolle im Energiestoffwechsel der Mikroorganismen. Sie sind innerhalb der Zelle aktiv und dienen als Indikator für deren Stoffwechselaktivität.

Abbildung 35:
Aktivität der Dehydrogenasen



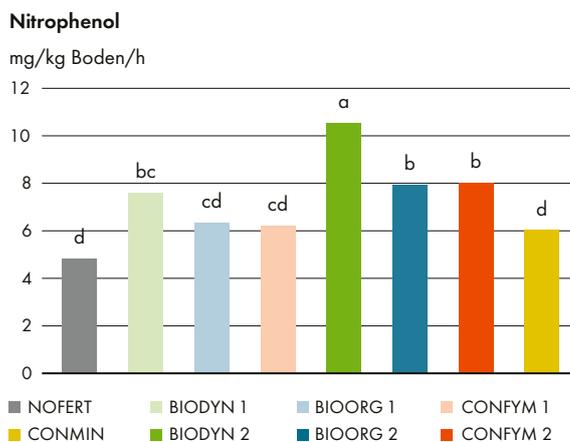
Aktivität der Dehydrogenasen in den Böden des DOK-Versuchs. Daten aus der Analyse von Bodenproben aus 2016. Je höher der Wert, desto mehr Dehydrogenase-Enzyme sind im Boden aktiv.

Die hohe Aktivität der Dehydrogenasen in den BIODYN-Verfahren zeigt, dass deutlich mehr Mikroorganismen im Boden vorhanden sind als in den Böden der anderen Verfahren. Sie kann aber auch bedeuten, dass zusätzlich die Aktivität pro Einheit Mikroorganismen höher ist.

Phosphatasen

Enzyme aus der Klasse der Phosphatasen werden von Pflanzen und Mikroorganismen ausgestossen, um organische Phosphorverbindungen aufzuspalten. Weil die Konzentration an gelöstem P im Bodenwasser sehr gering ist, kann die enzymatische Aufspaltung organischer P-Verbindungen einen Beitrag zur Pflanzenernährung leisten.

Abbildung 36: Aktivität der alkalischen Phosphomonoesterasen



Aktivität der alkalischen Phosphomonoesterasen im DOK-Versuch. Daten aus der Analyse von Bodenproben aus 2019. Je höher der Wert, desto mehr Phosphatase-Enzyme sind im Boden aktiv.

Die Phosphataseaktivität ist sehr stark von den Anbausystemen abhängig. Die hohe Aktivität der Phosphatasen im BIODYN-System zeigt ein hohes Potenzial, organische Phosphorverbindungen aufzuspalten, wodurch den Pflanzen freigesetztes P zur Verfügung steht.

Auf den Punkt gebracht: Bodenqualität

Nach 20 Jahren konventioneller Bewirtschaftung war der pH-Wert der Böden so weit gesunken, dass er durch Kalkung korrigiert werden musste. Die Böden der Biosysteme zeigten eine geringere Verschlammungsneigung und bessere Strukturstabilität als die der konventionellen Systeme. In den Verfahren mit praxisüblicher Düngung und Hofdünger waren die organischen Kohlenstoffgehalte und -vorräte konstant. Ohne organischen Dünger oder mit reduzierter Düngung haben die Böden organischen Kohlenstoff verloren. Mit der Mistkompostanwendung erreichte das BIODYN-2-Verfahren signifikant höhere organische Kohlenstoffgehalte als alle anderen Verfahren. Die mikrobielle Biomasse, ihre Aktivität und Effizienz war in den Biosystemen deutlich höher als in den konventionellen. Alle Indikatoren für Bodenfruchtbarkeit zeigten in den Biosystemen und besonders im BIODYN-System bessere Werte. Die Bodenfruchtbarkeit von BIODYN bei reduzierter Düngung erreichte oder überstieg die von CONFYM bei praxisüblicher Düngung.

Biodiversität

In mehreren Bereichen hat menschliches Handeln und Wirtschaften zu einer Überschreitung der Belastungsgrenzen unseres Planeten geführt. Dies gilt besonders für den Verlust von Biodiversität.

Der DOK-Versuch mit seinen 100 m² grossen Parzellen erlaubt nur Aussagen über Häufigkeit und Aktivität von Arten, die sich auf dieser Fläche aufhalten. Je nach Grösse und Mobilität haben die Organismen einen grösseren Aktionsradius als die Dimensionen einer einzelnen Parzelle.

Ein Schwerpunkt im DOK-Versuch waren deshalb Regenwürmer, Mikroorganismen und die Beikrautvegetation. Doch erstaunlicherweise traten auch bei Bodentieren, welche hauptsächlich auf dem Boden leben (epigäische Arthropoden), grosse Verfahrenseffekte auf, obwohl diese Organismen täglich beachtliche Distanzen zurücklegen können.

Bei der Analyse der Ackerbegleitflora ist aufgrund der Samenverbreitung auch eine Beeinflussung der benachbarten Parzellen zu erwarten.

Ackerbegleitflora

Als Folge der spezifischen Bewirtschaftung der DOK-Verfahren hat sich die Population der Begleitflora verändert. Jede Kultur hat ihre besondere Begleitflora und jede Jahreszeit bringt andere Pflanzen im Acker in den Vordergrund. Deshalb ist die Analyse des Samenvorrats eine interessante Methode, die Aufschluss über das Aufkommen der Begleitflora auch über längere Zeiträume gibt.

Tabelle 13: Anzahl der Samen und Anzahl der Pflanzenarten

	Samenvorrat			
	Arten		Samen/m ²	
BIODYN 2	42	114 %	14 413	233 %
BIOORG 2	40	108 %	19 622	317 %
CONFYM 2	37	100 %	6 195	100 %
CONMIN	33	89 %	8 404	136 %
NOFERT	44	119 %	69 468	1121 %

Die Beikrautflora erfüllt im Ökosystem wichtige Aufgaben: Sie bietet Unterschlupf und Nahrung für Nützlinge, sie schützt den Boden vor Verschläm- mung und Erosion und dient auch dazu, nach der Ernte den mineralisierten Stickstoff aufzunehmen und so vor Auswaschung zu schützen. Ausserdem gelangen über ihre Wurzelexsudate und Wurzeln auch Kohlenstoffverbindungen in den Boden.



Klatschmohn in den Winterweizenparzellen des DOK-Versuchs.

Die Beikräuter sind ein wichtiger Bestandteil der Biodiversität in den oft eintönigen Ackerlandschaften und wichtige Zwischenwirte für Wurzelsymbiosepilze (Mykorrhiza).

Allerdings besteht durch den hohen Samenvorrat auch ein beachtliches Risiko für eine Verunkrautung der Kulturpflanzen. Im Rahmen der Fruchtfolge, die mit zwei Jahren Klee gras viele Unkräuter unterdrückt, konnten Hacke und Striegel die Konkurrenz der Beikrautflora in den Biosystemen in Grenzen halten. Eine Ausnahme bildet Soja: Hier werden in den Bioparzellen Unkräuter regelmässig auch von Hand gejätet (circa 25 h/ha).

Durch den Verzicht auf Herbizide und durch weniger dichte Pflanzenbestände fanden sich in biologisch bewirtschafteten Parzellen mehr Arten als in konventionellen Parzellen. Bezogen auf die Anzahl keimfähiger Samen je Flächeneinheit haben Bioparzellen zwei- bis dreimal mehr Vorrat im Boden als konventionelle Parzellen. In den Biosystemen hat sich demnach ein Samenvorrat gebildet, den man im Auge behalten muss.

Bodentiere

Regenwürmer

Sie sind die bekanntesten Tiere unter den Wirbellosen, die im Boden leben. Der Lebensraum der tiefgrabenden Arten reicht in den tiefgründigen Lössböden des DOK-Versuchs bis in eine Tiefe von etwa einem Meter. Dort finden sich Wohnhöhlen, in die sich der Wurm zurückzieht, wenn es an der Oberfläche zu trocken oder zu kalt wird.

Regenwürmer lassen sich anhand ihres bevorzugten Lebensraums in ökologische Gruppen einordnen:

- Epigäische Arten wohnen unter der Bodenoberfläche, wo sie sich vorwiegend von Tierausscheidungen und abgestorbenem Pflanzenmaterial ernähren. Zum Schutz vor UV-Strahlung sind sie dunkel gefärbt.
- Endogäische Arten leben im oberen Bereich des Mineralbodens. Sie sind bleich und fast transparent, da sie selten an die Oberfläche kommen.
- Anözische Formen sind vertikalgrabend und suchen auch tiefere Bodenschichten von einem Meter und mehr auf. Diese Arten fördern die Durchmischung der Mineralerde mit dem Humus und ziehen Pflanzenrückstände und Mist in den Boden ein.



Die Erhebung von Regenwürmern mit Handauslese oder Austreibung ist aufwendig und aufgrund ihrer Aktivität nur im Frühling oder Herbst sinnvoll.

Die Biomasse der Regenwürmer im DOK-Versuch wird dominiert von den anözischen Spezies, die relativ gross sind und daher in Bezug auf ihre Anzahl hinter den relativ kleinen, endogäischen Arten zurückbleiben. Die Methodik für die Datenerhebung mit Austreibung, Handauslese und Bestimmung der Tiere ist sehr aufwendig. Ausserdem werden dadurch die DOK-Parzellen stark gestört. Deshalb konnten diese Untersuchungen nur für einen Teil der Verfahren durchgeführt werden. Das Vorkommen von Regenwürmern schwankt sowohl im Jahres- als auch im Tagesverlauf sehr und ist stark von Feuchte und Temperatur abhängig.

Tabelle 14: Anzahl und Biomasse von Regenwürmern in den DOK-Parzellen zwischen 1990 und 1991 sowie zwischen 2001 und 2005

	Regenwürmer 1990, 1991				Regenwürmer 2001–2005			
	Anzahl (Ind./m ²)		Biomasse (g/m ²)		Anzahl (Ind./m ²)		Biomasse (g/m ²)	
BIODYN 2	302	138 %	192	124 %	234	90 %	183	89 %
BIOORG 2	463	211 %	228	148 %	247	95 %	180	88 %
CONFYM 2	219	100 %	154	100 %	259	100 %	205	100 %
CONMIN	145	66 %	118	77 %	190	73 %	166	81 %
NOFERT	208	95 %	137	89 %	164	63 %	142	69 %

Die Regenwurmuntersuchungen von 2001–2005 fanden mit einer vereinfachten Methode, die tiefgrabende (anözische) Regenwürmer weniger gut erfasst und nach einer Fruchtfolgephase mit 3 Jahren Kleegrass statt. Untersuchungen mit der früheren Methodik und mit 2 Jahren Kleegrass aus dem Jahr 2024 bestätigen erneut die Daten von 1990–1991: deutlich mehr Regenwürmer in den Bioböden als in den konventionellen.

Bis 1998 wurden in den konventionellen Systemen noch Pflanzenschutzmittel eingesetzt, die für Regenwürmer sehr toxisch waren (Carbendazim, Dinoseb, Methiocarb). Die frühen Untersuchungen zeigen daher eine deutlich geringere Anzahl und Biomasse der Regenwürmer in diesen Verfahren. Der Wechsel zur integrierten Produktion mit dem Beginn der dritten Fruchtfolge und das Aus für viele

der alten, sehr giftigen Mittel ist die wahrscheinlichste Erklärung dafür, dass sich die Regenwurm-Populationen in CONFYM und CONMIN erholen konnten. Auf der anderen Seite hatten die Kalkung zwischen 1999 und 2005 und der Wechsel zu basisch wirkenden Stickstoffdüngern möglicherweise auch einen positiven Einfluss auf das Habitat der Regenwürmer.

Laufkäfer und Kurzflügler

Die Familien der Laufkäfer und Kurzflügler gehören zu den Käfern. Viele ihrer Arten sind noch nicht detailliert erforscht. Der Wissensstand über die Autoökologie bei den Laufkäfern ist grösser als bei den Kurzflüglern. Die Aktivitätsdichte dieser Tiere wird mit Hilfe von Lebendfallen im Feldboden ermittelt. Da die Tiere sehr mobil sind, lassen sie sich einer kleinen Fläche nicht direkt zuordnen. Die Häufigkeit, mit der sie eine Parzelle besuchen, ist aber anhand der Fangzahlen gut abschätzbar.



Gefräßige Grosslaufkäfer fressen das bis zu 2,5-Fache ihres Eigengewichtes pro Tag.

Tabelle 15: Häufigkeit von Laufkäfern und Kurzflüglern in Winterweizenparzellen

	Laufkäfer Individuen						Kurzflügler Individuen					
	1988		1990		1991		1988		1990		1991	
BIODYN 2	208	a	72	a	60	a	42	a	58	a	20	a
BIOORG 2	156	ab	75	a	57	a	44	a	50	a	17	a
CONFYM 2	89	b	46	b	31	a	20	b	33	b	15	a

Die Häufigkeiten dieser beiden Tiergruppen sind in den Bioparzellen im Durchschnitt der Jahre rund doppelt so hoch wie in den konventionellen Parzellen. Laufkäfer, die Wärme und Trockenheit lieben und solche, die sich vorwiegend von Samen ernähren, wurden häufiger in Bioflächen nachgewiesen. Die räuberisch lebenden Käfer sind im Acker wichtig bei der Regulierung von Schädlingen wie Läuse. Sie sind bereits bei tieferen Temperaturen im Frühjahr aktiv, wenn Marienkäfer bei der Schädlingsregulierung noch wenig effektiv sind.

Tabelle 16: Dichte von Spinnen in Individuen pro m²

	Netzbildende Spinnen		Räuberische Spinnen	
BIODYN 2	2,5	a	7,4	a
BIOORG 2	1,8	ab	7,3	a
CONFYM 2	1,2	b	3,4	b
CONMIN	1,0	b	4,5	b

Die Biosysteme weisen eine signifikant höhere Dichte von Spinnen auf. Die räuberischen Spinnen kommen in den Bioparzellen fast doppelt so häufig vor wie in den konventionell bewirtschafteten Parzellen.



Eine Netzspinne in einer DOK-Weizenparzelle.

Nematoden

Nematoden oder auch Fadenwürmer stellen einen der artenreichsten und weitverbreitetsten Tierstämme dar. Durch die morphologischen Spezialisierungen einzelner Nematodenarten sind sie in der Lage, die unterschiedlichsten ökologischen Nischen zu besetzen. Sie spielen eine Schlüsselrolle bei der Regulierung von biogeochemischen Kreisläufen und Ökosystemprozessen. Beispiele dafür sind die Mineralisierung und der Aufbau organischer Bodensubstanz.

Einzelne Arten können allerdings, auch durch ihre parasitäre Lebensweise, Schäden bei Kulturpflanzen hervorrufen. Aufgrund ihrer hohen Diversität kann die Zusammensetzung der Nematodengemeinschaft als wichtiger Indikator für die ökologischen Umweltbedingungen herangezogen werden.



Nematoden sind unter dem Mikroskop gut zu erkennen.

Tabelle 17: Anzahl von Nematoden in Individuen pro m²

	Bacterivore		Herbivore		Fungivore		Omnivore	
BIODYN 2	17,5	a	27,2	a	0,4	b	4,5	a
BIOORG 2	16,2	ab	28,1	a	0,5	ab	5,2	a
CONFYM 2	19,3	a	24,8	a	0,9	a	4,8	a
CONMIN	9,5	bc	16,8	b	0,9	a	2,3	b

Untersuchungen im DOK-Versuch zeigen, dass sowohl die Artenzahl als auch die Biomasse der Nematoden stark von der organischen Düngung abhängt. Nematoden, deren bevorzugte Nahrungsquellen Bakterien und Pflanzenreste sind, kommen in den organisch gedüngten Verfahren deutlich häufiger vor. Nematoden, die von Pilzen leben, sind in den mineralisch gedüngten Verfahren häufiger zu finden. Zwischen den Verfahren mit organischen Düngern konnte kaum ein Unterschied festgestellt werden.

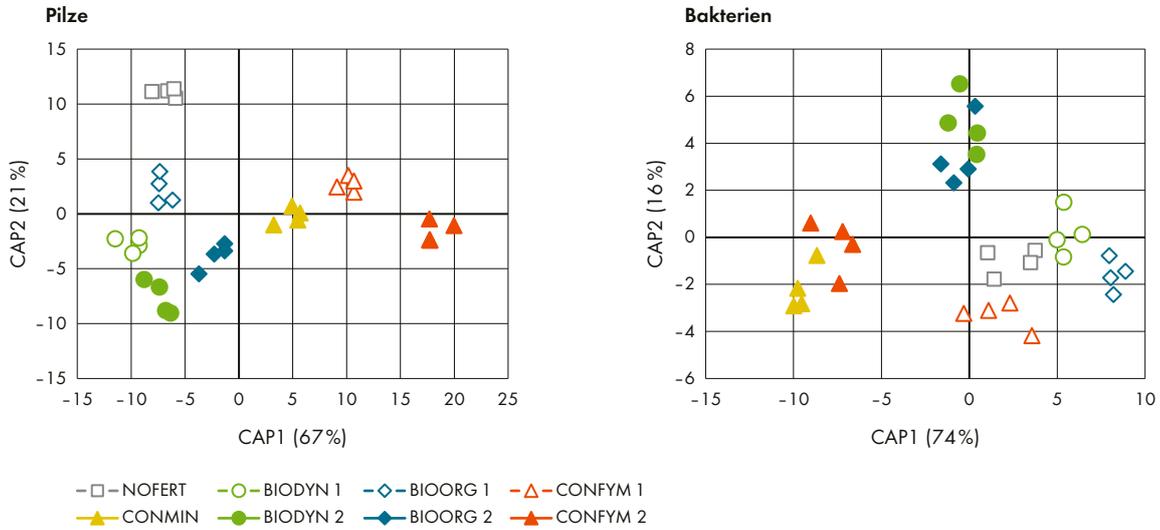
Mikrobielle Vielfalt

Bakterien und Pilze sind äusserst anpassungsfähige Organismen, die im Boden eine grosse Vielfalt aufweisen und die kleinsten Lebensräume im Porenraum des Bodens besiedeln. Sie können auf Basis ihrer Genetik, ihres Erscheinungsbildes sowie ihrer Funktionalität beschrieben werden. Viele der Pilze

und Bakterien leben im Zusammenspiel mit anderen Mikroorganismen und bilden Gemeinschaften, in denen sich die verschiedenen Stoffwechselwege und Lebensweisen gegenseitig unterstützen.

Wichtige Bodeneigenschaften, die sich auf die mikrobielle Vielfalt im Boden auswirken, sind unter anderem der pH-Wert, der Bodenkohlenstoff und die Bodentextur. Im DOK-Versuch zeigt sich für jedes Verfahren eine individuell ausgeprägte Gemeinschaftsstruktur von Bodenpilzen und Bakterien (Abbildung 37). Die Bodenpilze zeigen eine höhere Sensitivität gegenüber den landwirtschaftlichen Anbausystemen. Das wird durch die enge Gruppierung der halb und voll gedüngten Verfahren der drei Systeme BIODYN, BIOORG und CONFYM sichtbar (Abbildung 37). Die Bakterien wiederum werden vor allem durch die Düngintensität beeinflusst, wie die enge Gruppierung der halb gedüngten Verfahren zusammen mit der nicht gedüngten Kontrolle zeigt.

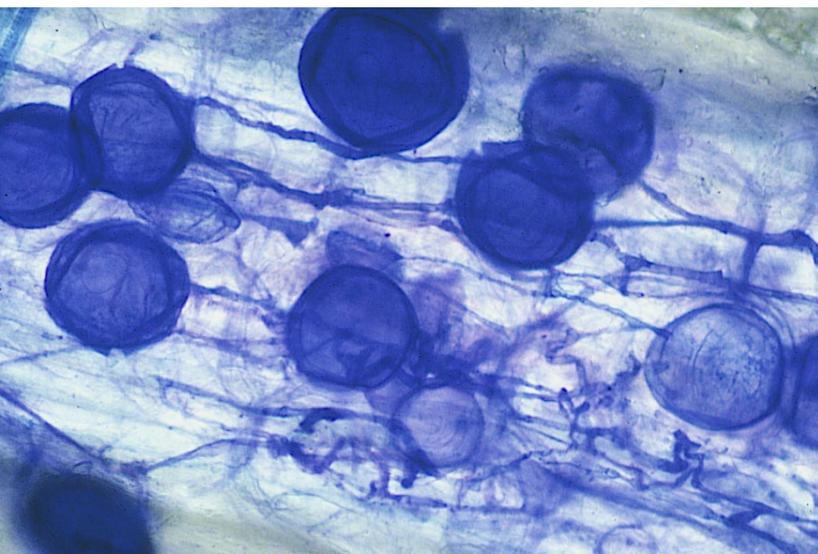
Abbildung 37: Gemeinschaftsstruktur der Bodenpilze und Bodenbakterien



Gemeinschaftsstruktur der Bodenpilze (links) und Bodenbakterien (rechts) in den Verfahren des DOK-Versuchs. Die Grafik zeigt Ähnlichkeiten der Bodenmikroben, die anhand von Markergenen identifiziert worden sind. Jeder Punkt entspricht der Gemeinschaftsstruktur einer Feldparzelle (Schlag C). Je näher die Punkte, desto ähnlicher die Struktur. Je weiter auseinander die Punkte liegen, desto unterschiedlicher ist die Gemeinschaftsstruktur.



Beikräuter in den Weizenparzellen können den Boden vor Auswaschung schützen.



Symbiose zwischen Mykorrhizapilz und Leguminose: Zu sehen sind Reserveorgane des Pilzes (Vesikel) und Hyphen innerhalb der Wurzelrinde.

Für viele Ökosystemdienstleistungen des Bodens ist die stoffwechselbedingte Aktivität von Pilzen und Bakterien ausschlaggebend. Pilze und Bakterien sorgen also im Umkehrschluss für fruchtbare Böden mit hoher Speicherkapazität.

Über symbiotisch lebende Pilze, die Mykorrhiza, können Kulturpflanzen den Einzugsradius für Nährstoffe und Wasser im Boden um ein Vielfaches erweitern und so ihre Versorgung sichern. Die sogenannte Endomykorrhiza an der Wurzelrinde ist relativ unspezifisch und kann mehrere Pflanzen-

familien und Gattungen besiedeln. Dadurch werden die Pilze auch zu Brückenbildnern zwischen dem Wurzelgeflecht verschiedener Pflanzenarten im Boden; selbst krautige und verholzte Pflanzen werden über Pilzfäden (Hyphen) verbunden und tauschen so Kohlenhydrate und Mineralstoffe aus.

Im DOK-Versuch konnte vor allem in den biologischen und im ungedüngten Verfahren eine hohe Kolonialisierung der Kulturpflanzen mit Mykorrhizapilzen nachgewiesen werden. Die Verfahren mit Mineraldüngung zeigten einen deutlichen Rückgang der symbiotischen Aktivität zwischen Pilz und Kulturpflanze. Dies kann mit dem Rückgang der Diversität der Mykorrhizagemeinschaften zusammenhängen.

In einem Experiment zur Simulation von Trockenheit im DOK-Versuch wurde ein Anstieg des Mykorrhizavorkommens in einem biologischen gegenüber einem konventionellen System nachgewiesen, während andere biologische Indikatoren im Boden unbeeinflusst blieben. Im BIODYN-System waren Mykorrhizapilze bei Trockenheit dreimal häufiger als im konventionellen System CONMIN. Auswirkungen auf den Wasserhaushalt der Pflanzen werden in einem aktuellen Projekt untersucht. Nicht alle Kulturpflanzen sind auf die Symbiosepilze angewiesen. Allerdings verstärkt sich ohne Mykorrhiza die Abhängigkeit der Kulturpflanze von löslichen Düngern und Pflanzenschutz. Langfristig führt eine verringerte Aktivität der Bodenmikroorganismen zu einem Verlust an Bodenstruktur und Bodenqualität.

Auf den Punkt gebracht: Biodiversität

Die Größe der Versuchspartellen im DOK-Versuch schränkt die Auswahl von Arten und Biodiversitätsindikatoren ein. Die pflanzliche Vielfalt in den Biosystemen wies mehr Arten und zwei- bis dreimal so viele keimfähige Samen auf als in den konventionellen Systemen. Laufkäfer, Kurzflügler und Spinnen kamen in den Biopartellen rund doppelt so häufig vor wie in den konventionellen. Organische Düngung wirkt sich positiv auf die Anzahl und Artenzusammensetzung der Nematoden aus, welche Bakterien und Pflanzen fressen. Nematoden, die sich vornehmlich von Pilzen ernähren, kamen im CONMIN-System vermehrt vor. Bodenpilze und Bakterien sind in den einzelnen Verfahren sehr unterschiedlich zusammengesetzt: Bakterien wurden stärker durch die Düngeintensität, Pilze stärker durch die Systemunterschiede beeinflusst. Mykorrhiza-Pilze an Kulturpflanzen wurden in den biologischen und im nicht gedüngten Verfahren häufiger nachgewiesen. Ihre Masse stieg unter Trockenstress an, am stärksten in BIODYN.

Klimawandel

Der landwirtschaftliche Sektor ist für circa 14 % der Schweizer Treibhausgasemissionen verantwortlich und trägt so wesentlich zum Klimawandel bei. Gleichzeitig ist die Landwirtschaft aber auch stark vom Klimawandel betroffen. Die globalen Treibhausgasemissionen steigen und auch für Mitteleuropa werden deutlich erhöhte Wahrscheinlichkeiten von Sommertrockenheit gepaart mit heftigen Unwettern prognostiziert. Die Landwirtschaft muss deshalb sowohl Klimaminderungsstrategien zur Reduktion von Treibhausgasen als auch Klimaanpassungsstrategien zur Steigerung der Widerstandsfähigkeit gegenüber instabilen Witterungsbedingungen entwickeln.

Klimaanpassung durch Humusaufbau

Massnahmen, die zu einer verbesserten Anpassung der Landwirtschaft an die Folgen des Klimawandels führen, dienen oft auch der Verbesserung von Bodenqualität und Biodiversität.

Ein Beispiel sind Methoden zum Humusaufbau. Durch den Aufbau und die Stabilisierung von Humus wird der Atmosphäre Kohlenstoff entzogen und die Bodenqualität gesteigert. Im DOK-Versuch wird die Entwicklung der Humusgehalte seit über 40 Jahren beobachtet. Dabei konnte festgestellt werden, dass nur mit organischer Düngung der Humusgehalt stabil gehalten oder erhöht werden konnte. Besonders deutlich ist der Humusaufbau

im biologisch-dynamischen Verfahren ausgeprägt, obwohl die hier ausgebrachte Menge an organischem Dünger als Mistkompost am geringsten war (siehe Kapitel «Der Versuch»). Trotz der Verluste von Kohlenstoff und Stickstoff während des Kompostierungsprozesses scheint die Qualität des ausgebrachten Düngers der ausschlaggebende Faktor für die Stabilität des Kohlenstoffs im Boden zu sein. Durch den Aufbau von Bodenkohlenstoff kann die Anwendung biologischer Systeme eine Strategie zur Minderung der Klimaeffekte und zur Klimaanpassung sein. Die Zunahme an Bodenkohlenstoff erfolgt jedoch sehr langsam.

Vergleich der Treibhausgasemissionen

Als wichtigste Treibhausgase aus der Landwirtschaft sind Kohlenstoffdioxid (CO_2), Lachgas (N_2O) und Methan (CH_4) zu nennen. Diese Gase werden in CO_2 -Äquivalente umgerechnet, um ihre Klimawirkung zu bewerten: Lachgas hat den Faktor 300 und Methan den Faktor 28. Lachgas verbleibt länger in der Atmosphäre und hat eine 300-mal stärkere Klimawirkung.

Aufgrund der hohen Klimawirksamkeit von N_2O spielen im Ackerbau mit gut durchlüfteten Böden die stickstoffbedingten Treibhausgasemissionen die entscheidende Rolle für die Klimabewertung. Ab 2012 wurden während 571 Tagen unter Klee gras, Mais und Gründüngung die Emissionen



Hagelschaden in den Maisparzellen des DOK-Versuchs im Jahr 2022.

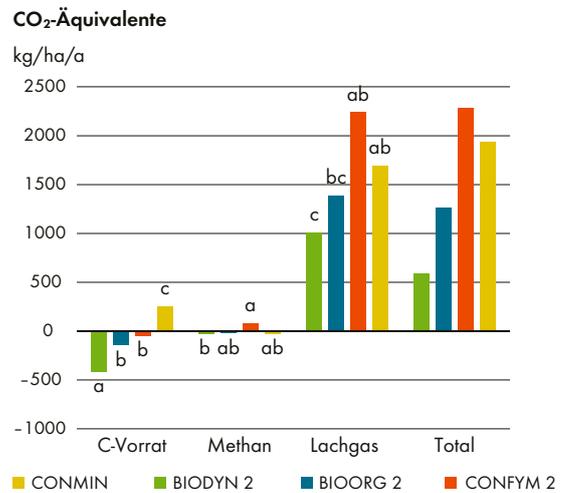
von N₂O und CH₄ gemessen und mit der mittleren Änderungsrate der Bodenkohlenstoffvorräte verglichen (Abbildung 38). Die höchsten N₂O-Emissionen wurden im konventionellen Verfahren mit Hofdünger und mineralischer Düngung gemessen. Die grosse Stickstoffgabe im Mais war hier wohl der ausschlaggebende Faktor für die hohe Klimawirkung des Verfahrens während der Messperiode. Der Verzicht auf mineralischen Stickstoff, ein stabiler Boden-pH sowie eine gute Bodenstruktur sind wichtige Faktoren, die zur Minimierung der N₂O-Emissionen in den biologischen Systemen beitragen.

Bemerkenswert hierbei ist, dass die steigenden Kohlenstoffvorräte im biologisch-dynamischen Verfahren zusammen mit den niedrigsten N₂O-Emissionen beobachtet wurden. Dieses Resultat zeigt, dass steigende Bodenkohlenstoffgehalte bei angepasster Düngungsstrategie nicht zu erhöhten N₂O-Emissionen führen müssen. Bezogen auf die Fläche wurden in BIOORG 2 44 % und in BIODYN 2 63 % weniger Treibhausgasemissionen gemessen als im konventionellen Verfahren, jeweils bei praxisüblicher Düngung.

Resilienz gegen Trockenstress

Wie sich Anbausysteme unter Trockenstress verhalten, ist eine wichtige Frage für die Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel. Im experimentellen Vergleich hatte die vielfältigere bakterielle Gemeinschaft im Boden von BIOORG 2 zur Folge, dass sich der Trockenstress weniger stark auf die Protease-Aktivität und N-Mineralisierung auswirken konnte als in CONMIN. Als Resultat konnten sich die Pflanzen in BIOORG 2 unter Trockenstress deutlich besser entwickeln.

Abbildung 38: Klimawirkung der Böden des DOK-Versuchs



CO₂-Äquivalente aus den voll gedüngten Anbausystemen, dargestellt für die Veränderungen des organischen Kohlenstoffs im Boden (OBS, Humus) über alle 42 Jahre und die Lachgas- und Methanemissionen aus einer fast zweijährigen Messkampagne unter Klee gras, Mais und Gründüngung in der sechsten FFP.

Aktuelle Studien aus dem DOK zeigen, dass die Verdunstung direkt aus dem Boden in den Anbausystemen nahezu gleich ist und auch die Tiefe, aus der die Pflanzen ihr Wasser beziehen. Die Bodenfeuchte in der Wurzelzone war in den Biosystemen jedoch deutlich höher und die Pflanzen konnten das Wasser effizienter nutzen. Die Ergebnisse legen nahe, dass biologische Anbausysteme Vorteile in der agronomischen Wassernutzungseffizienz haben und resilienter gegenüber Trockenstress sind. Dies wird in zwei grossen laufenden Projekten vertieft untersucht.

Auf den Punkt gebracht: Klimawandel

Von den verschiedenen Anbausystemen speicherte ausschliesslich das biodynamische Verfahren mit praxisüblicher Düngung zusätzlichen organischen Kohlenstoff im Boden. Im BIODYN-System wurden ausserdem die geringsten Lachgasemissionen gemessen. Die hohen Emissionsraten in CONFYM 2 und CONMIN sind auf eine hohe Stickstoffdüngung zurückzuführen. Insgesamt lagen die Treibhausgasemissionen in BIODYN 63 % und in BIOORG 44 % pro Flächeneinheit unter denen von CONFYM, jeweils bei praxisüblicher Düngung. In Trockenphasen bleibt die vielfältigere Bakteriengemeinschaft in biologisch bewirtschafteten Parzellen länger aktiv, was sich positiv auf die Stickstoffmineralisierung und damit auf das Pflanzenwachstum auswirken kann.

Dank

Der langfristigen Förderung des Versuchs durch das Schweizer Bundesamt für Landwirtschaft BLW, dem unermüdlichen Einsatz der Versuchsleitenden von FiBL und Agroscope, der Tatkraft der Feldteams sowie der Treue der bäuerlichen Beratergruppe ist es zu verdanken, dass der Versuch sechs Fruchtfolgeperioden zu jeweils sieben Jahren überdauert hat und weiterhin Antworten und neue Fragestellungen zu Projekten der Agrar- und Umweltforschung liefert. Der Versuch wird von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern intensiv für Projekte des Schweizerischen Nationalfonds, der Europäischen Kommission, des Bundesamtes für Umwelt und vieler weiterer geldgebender Institutionen genutzt.

Dank für die grosszügige finanzielle Unterstützung

- Bundesamt für Landwirtschaft BLW
- Bundesamt für Umwelt BAFU
- Schweizerischer Nationalfonds
- Coop Fonds für Nachhaltigkeit
- Europäische Kommission

Dank für die partnerschaftliche Zusammenarbeit

- Agroscope
- ETH Zürich
- Uni Basel

Dank für die Verpachtung der wertvollen landwirtschaftlichen Versuchsflächen

- Agrico Genossenschaft, Birsmatthof, Therwil
- Familie Stamm, Oberwil

Dank an die Mitarbeiter*innen von Agroscope und FiBL

Leitung DOK-Versuch, Agroscope

- Jean-Marc Besson[†]
- David Dubois
- Padruot Fried
- Jochen Mayer

Feldequipe und Datenmanagement, Agroscope

- Ernst Brack
- Shiva Ghiasi
- Lucie Gunst
- Werner Jossi
- Victor Lehmann
- Ernst Spiess
- Werner Stauffer
- Hansueli Zbinden

Leitung DOK-Versuch, FiBL

- Paul Mäder
- Urs Niggli
- Henri Suter[†]
- Hartmut Vogtmann

Feldequipe und Datenmanagement, FiBL

- Thomas Alföldi
- Franz Augstburger
- Robert Frei
- Adrian Lustenberger
- Paul Mäder
- Frédéric Perrochet
- Moritz Sauter
- Andreas Schmutz
- Roland Widmer
- Marcel Züllig

Dank an die beratenden Landwirte, Mitglieder der DOK-Begleitgruppe

- Fritz Baumgartner[†], Gründer
- Daniel Böhler
- Ruedi Frey[†], Gründer
- Matthias Hünerfauth
- Andreas Ineichen
- Herman Lutke Schipholt
- Emil Meier[†]
- Hans Miesch[†]
- Christian Müller
- Hans Oswald[†]
- Benno Otter
- Rainer Sax
- Werner Scheidegger
- Urs Sprecher
- Niklaus Steiner
- Ruedi Ulrich
- Samuel Vogel
- Andreas Würsch
- Niklaus Wynistorf[†]

Dank an die mittragenden Personen

- Vittorio Delucchi[†]
- Günter Kahnt
- Susanna Küffer Heer
- Philippe Matile[†]
- Michael Rist[†]
- Hans-Rudolf Roth[†]

Dank an alle beteiligten Wissenschaftler*innen und Mitarbeiter*innen in Feld und Labor für ihre wertvolle Forschungsarbeit

[†] inzwischen verstorben

Publikationen aus dem DOK-Versuch (peer reviewed)

Wissenschaftliche Publikationen

1. Arncken, C. M., Mäder, P., Mayer, J., & Weibel, F. P. (2012). Sensory, yield and quality differences between organically and conventionally grown winter wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 92, 2819-2825.
2. Autret, B., Mary, B., Strullu, L., Chlebowski, F., Mäder, P., Mayer, J., Olesen, J. E., & Beaudoin, N. (2020). Long-term modelling of crop yield, nitrogen losses and GHG balance in organic cropping systems. *Science of the Total Environment* 710, 134597.
3. Bai, Z., Caspari, T., Gonzalez, M. R., Batjes, N. H., Mäder, P., Bünemann, E. K., De Goede, R., Brussaard, L., Xu, M., Ferreira, C. S. S., Reintam, E., Fan, H., Mihelič, R., Glavan, M., & Tóth, Z. (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.
4. Berchtold, A., Besson, J. M., & Feller, U. (1993). Effects of fertilization levels in two farming systems on senescence and nutrient contents in potato leaves. *Plant and Soil* 154(1), 81-88.
5. Besson, J. M., Spiess, E., & Niggli, U. (1995). N uptake in relation to N application during two crop rotations in the DOC field trial. *Biological agriculture & horticulture* 11(1-4), 69-75.
6. Birkhofer, K., Bezemer, T. M., Bloem, J., Bonkowski, M., Christensen, S., Dubois, D., Ekelund, F., Fliessbach, A., Gunst, L., Hedlund, K., Mader, P., Mikola, J., Robin, C., Setälä, H., Tatin-Froux, F., Van Der Putten, W. H., & Scheu, S. (2008). Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: Implications for soil quality, biological control and productivity. *Soil Biology & Biochemistry* 40(9), 2297-2308.
7. Birkhofer, K., Fliessbach, A., Wise, D. H., & Scheu, S. (2008). Generalist predators in organically and conventionally managed grass-clover fields: implications for conservation biological control. *Annals of Applied Biology* 153(2), 271-280.
8. Birkhofer, K., Fliessbach, A., Wise, D. H., & Scheu, S. (2011). Arthropod food webs in organic and conventional wheat farming systems of an agricultural long-term experiment: a stable isotope approach. *Agricultural and Forest Entomology* 13(2), 197-204.
9. Birkhofer, K., Fliessbach, A., Gavín-Centol, M. P., Hedlund, K., Ingimarsdóttir, M., Jørgensen, H. B., Kozjek, K., Meyer, S., Montserrat, M., Moreno, S. S., Laraño, J. M., Scheu, S., Serrano-Carnero, D., Truu, J., & Kundel, D. (2021). Conventional agriculture and not drought alters relationships between soil biota and functions. *Scientific Reports* 11(1), 23975.
10. Bongiorno, G., Bünemann, E. K., Oguejiolor, C. U., Meier, J., Gort, G., Comans, R., Mäder, P., Brussaard, L., & De Goede, R. (2019). 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.
11. Bongiorno, G., Postma, J., Bünemann, E. K., Brussaard, L., De Goede, R. G. M., Mäder, P., Tamm, L., & Thuerig, B. (2019). Soil suppressiveness to *Pythium ultimum* in ten European long-term field experiments and its relation with soil parameters. *Soil Biology & Biochemistry* 133, 174-187.
12. Bongiorno, G., Bodenhausen, N., Bünemann, E. K., Brussaard, L., Geisen, S., Mäder, P., Quist, C. W., Walser, J.-C., & De Goede, R. G. M. (2019). Reduced tillage, but not organic matter input, increased nematode diversity and food web stability in European long-term field experiments. *Molecular Ecology* 28(22), 4987-5005.
13. Bongiorno, G., Bünemann, E. K., Brussaard, L., Mäder, P., Oguejiolor, C. U., & De Goede, R. G. M. (2020). Soil management intensity shifts microbial catabolic profiles across a range of European long-term field experiments. *Applied Soil Ecology* 154, 103596.
14. Bonte, A., Neuweger, H., Goesmann, A., Thonar, C., Mäder, P., Langenkämper, G., & Niehaus, K. (2014). Metabolite profiling on wheat grain to enable a distinction of samples from organic and conventional farming systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 94(13), 2605-2612.
15. Bosshard, C., Frossard, E., Dubois, D., Mäder, P., Manolov, I., & Oberson, A. (2008). Incorporation of nitrogen-15-labeled amendments into physically separated soil organic matter fractions. *Soil Science Society of America Journal* 72(4), 949-959.
16. Bosshard, C., Sørensen, P., Frossard, E., Dubois, D., Mäder, P., Nanzer, S., & Oberson, A. (2009). Nitrogen use efficiency of 15 N-labelled sheep manure and mineral fertiliser applied to microplots in long-term organic and conventional cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 83(3), 271-287.
17. Brock, C., Fliessbach, A., Oberholzer, H.-R., Schulz, F., Wiesinger, K., Reinicke, F., Koch, W., Pallutt, B., Dittman, B., Zimmer, J., Hülsbergen, K.-J., & Leithold, G. (2011). Relation between soil organic matter and yield levels of nonlegume crops in organic and conventional farming systems. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174(4), 568-575.
18. Brock, C., Hoyer, U., Leithold, G., & Hülsbergen, K.-J. (2012). The humus balance model (HU-MOD): a simple tool for the assessment of management change impact on soil organic matter levels in arable soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 92(3), 239-254.
19. Chalker-Scott, L. (2013). The science behind biodynamic preparations: A literature review. *Horttechnology* 23(6), 814-819.
20. Chowdhury, S. P., Babin, D., Sandmann, M., Jacquiod, S., Sommermann, L., Sørensen, S. J., Fliessbach, A., Mäder, P., Geistlinger, J., Smalla, K., Rothballer, M., & Grosch, R. (2019). Effect of long-term organic and mineral fertilization strategies on rhizosphere microbiota assemblage and performance of lettuce. *Environmental Microbiology*.
21. Dubois, D., Scherrer, C., Gunst, L., Jossi, W., & Stauffer, W. (1998). Effect of different farming systems on the weed seed bank in the long term-trials Chaiblen and DOK. *Journal of Plant Diseases and Protection (Special issue XVI)*, 67-74.
22. Dos Reis Martins, M., Necpalova, M., Ammann, C., Buchmann, N., Calanca, P., Flechard, C. R., Hartman, M. D., Krauss, M., Le Roy, P., Mäder, P., Maier, R., Morvan, T., Nicolardot, B., Skinner, C., Six, J., & Keel, S. G. (2022). Modeling N₂O emissions of complex cropland management in Western Europe using DayCent: Performance and scope for improvement. *European Journal of Agronomy* 141, 126613.
23. Esperschütz, J., Gatteringer, A., Mäder, P., Schloter, M., & Fliessbach, A. (2007). Response of soil microbial biomass and community structures to conventional and organic farming systems under identical crop rotations. *FEMS Microbiology Ecology* 61(1), 26-37.
24. Fliessbach, A., & Mäder, P. (2000). Microbial biomass and size-density fractions differ between soils of organic and conventional agricultural systems. *Soil Biology & Biochemistry* 32(6), 757-768.

25. Fliessbach, A., & Mäder, P. (2004). Short- and long-term effects on soil microorganisms of two potato pesticide spraying sequences with either glufosinate or dinoseb as defoliants. *Biology and Fertility of Soils* 40(4), 268-276.
26. Fliessbach, A., Imhof, D., Brunner, T., & Wüthrich, C. (1999). Tiefenverteilung und zeitliche Dynamik der mikrobiellen Biomasse in biologisch und konventionell bewirtschafteten Böden. *Regio Basiliensis* 3(40), 253-263.
27. Fliessbach, A., Mäder, P., & Niggli, U. (2000). Mineralization and microbial assimilation of 14 C-labeled straw in soils of organic and conventional agricultural systems. *Soil Biology & Biochemistry* 32(8-9), 1131-1139.
28. Fliessbach, A., Messmer, M., Nietlisbach, B., Infante, V., & Mäder, P. (2012). Effects of conventionally bred and *Bacillus thuringiensis* (Bt) maize varieties on soil microbial biomass and activity. *Biology and Fertility of Soils* 48(3), 315-324.
29. Fliessbach, A., Nietlisbach, B., Messmer, M., Rodríguez-Romero, A.-S., & Mäder, P. (2013). Microbial response of soils with organic and conventional management history to the cultivation of *Bacillus thuringiensis* (Bt)-maize under climate chamber conditions. *Biology and Fertility of Soils* 49(7), 829-837.
30. Fliessbach, A., Oberholzer, H.-R., Gunst, L., & Mäder, P. (2007). Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118, 273-284.
31. Fliessbach, A., Winkler, M., Lutz, M. P., Oberholzer, H.-R., & Mäder, P. (2009). Soil amendment with *Pseudomonas fluorescens* CHA0: lasting effects on soil biological properties in soils low in microbial biomass and activity. *Microbial Ecology* 57(4), 611-623.
32. Frossard, E., Buchmann, N., Bünemann, E. K., Kiba, D. I., Lompo, F., Oberson, A., Tamburini, F., Traore, O.Y.A. (2016). Soil properties and not inputs control carbon : nitrogen : phosphorus ratios in cropped soils in the long term. *SOIL* 2, 83-99
33. Fuchs, J. G., Fliessbach, A., Mäder, P., Weibel, F. P., Tamm, L., Mayer, J., & Schleiss, K. (2014). Effects of compost on soil fertility parameters in short-, mid- and long-term field experiments. *Acta Horticulturae* 1018, 39-46.
34. García-Palacios, P., Gattinger, A., Bracht-Jørgensen, H., Brussaard, L., Carvalho, F., Castro, H., Clément, J.-C., De Deyn, G., D'Hertefeldt, T., Foulquier, A., Hedlund, K., Lavorel, S., Legay, N., Lori, M., Mäder, P., Martínez-García, L. B., Martins Da Silva, P., Muller, A., Nascimento, E., Reis, F., Symanczik, S., Paulo Sousa, J., & Milla, R. (2018). Crop traits drive soil carbon sequestration under organic farming. *Journal of Applied Ecology* 55(5), 2496-2505.
35. Gasser, M., Hammelehle, A., Oberson, A., Frossard, E., & Mayer, J. (2015). Quantitative evidence of overestimated rhizodeposition using N-15 leaf-labelling. *Soil Biology & Biochemistry* 85, 10-20.
36. Gattinger, A., Muller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fliessbach, A., Buchmann, N., Mäder, P., Stolze, M., Smith, P., Scialabba, N. E.-H., & Niggli, U. (2012). Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(44), 18226-18231.
37. Grüter, R., Costerousse, B., Mayer, J., Mäder, P., Thonar, C., Frossard, E., Schulin, R., & Tandy, S. (2019). Long-term organic matter application reduces cadmium but not zinc concentrations in wheat. *Science of the Total Environment* 669, 608-620.
38. Hammelehle, A., Oberson, A., Lüscher, A., Mäder, P., & Mayer, J. (2018). Above- and belowground nitrogen distribution of a red clover-perennial ryegrass sward along a soil nutrient availability gradient established by organic and conventional cropping systems. *Plant and Soil* 425(1), 507-525.
39. Hartmann, M., & Widmer, F., (2006). Community structure analyses are more sensitive to differences in soil bacterial communities than anonymous diversity indices. *Applied and Environmental Microbiology* 72(12), 7804-7812.
40. Hartmann, M., Fliessbach, A., Oberholzer, H.-R., & Widmer, F. (2006). Ranking the magnitude of crop and farming system effects on soil microbial biomass and genetic structure of bacterial communities. *FEMS Microbiology Ecology* 57, 378-388.
41. Hartmann, M., Frey, B., Kölliker, R., & Widmer, F. (2005). Semi-automated genetic analyses of soil microbial communities: comparison of T-RFLP and RISA based on descriptive and discriminative statistical approaches. *Journal of Microbiological Methods* 61, 349- 360.
42. Hartmann, M., Frey, B., Mayer, J., Mäder, P., & Widmer, F. (2015). Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *The ISME Journal* 9, 1177.
43. Haubert, D., Birkhofer, K., Fliessbach, A., Gehre, M., Scheu, S., & Russ, L. (2009). Trophic structure and major trophic links in conventional versus organic farming systems as indicated by carbon stable isotope ratios of fatty acids. *Oikos* 118(10), 1579-1589.
44. Heger, T. J., Straub, F., & Mitchell, E. A. D. (2012). Impact of farming practices on soil diatoms and testate amoebae: A pilot study in the DOK-trial at Therwil, Switzerland. *European Journal of Soil Biology* 49(0), 31-36.
45. Hijri, I., Sykorova, Z., Oehl, F., Ineichen, K., Mäder, P., Wiemken, A., & Redecker, D. (2006). Communities of arbuscular mycorrhizal fungi in arable soils are not necessarily low in diversity. *Molecular Ecology* 15, 2277-2289.
46. Hildermann, I., Messmer, M., Dubois, D., Boller, T., Wiemken, A., & Mäder, P. (2010). Nutrient use efficiency and arbuscular mycorrhizal root colonisation of winter wheat cultivars in different farming systems of the DOK long-term trial. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 90(12), 2027-2038.
47. Hildermann, I., Thommen, A., Dubois, D., Boller, T., Wiemken, A., & Mäder, P. (2009). Yield and baking quality of winter wheat cultivars in different farming systems of the DOK long-term trial. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 89(14), 2477-2491.
48. Hirte, J., Leifeld, J., Abiven, S., & Mayer, J. (2018). Maize and wheat root biomass, vertical distribution, and size class as affected by fertilization intensity in two long-term field trials. *Field Crops Research* 216, 197-208.
49. Hirte, J., Leifeld, J., Abiven, S., Oberholzer, H.-R., Hammelehle, A., & Mayer, J. (2017). Overestimation of crop root biomass in field experiments due to extraneous organic matter. *Frontiers in Plant Science* 8(284).
50. Jaffuel, G., Mäder, P., Blanco-Perez, R., Chiriboga, X., Fliessbach, A., Turlings, T. C. J., & Campos-Herrera, R. (2016). Prevalence and activity of entomopathogenic nematodes and their antagonists in soils that are subject to different agricultural practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 230, 329-340.
51. Joergensen, R., Mäder, P., & Fliessbach, A. (2010). Long-term effects of organic farming on fungal and bacterial residues in relation to microbial energy metabolism. *Biology and Fertility of Soils* 46, 303-307.
52. Kahl, J., Busscher, N., Mergardt, G., Mäder, P., Torp, T., & Ploeger, A. (2015). Differentiation of organic and non-organic winter wheat cultivars from a controlled field trial by crystallization patterns. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 95(1), 53-58.

53. Keel, S. G., Anken, T., Büchi, L., Chervet, A., Fliessbach, A., Flisch, R., Huguenin-Elie, O., Mäder, P., Mayer, J., Sinaj, S., Sturny, W., Wüst-Galley, C., Zihlmann, U., & Leifeld, J. (2019). Loss of soil organic carbon in Swiss long-term agricultural experiments over a wide range of management practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 286, 106654.
54. Keller, M., Oberson, A., Annaheim, K. E., Tamburini, F., Mäder, P., Mayer, J., Frossard, E., & Bünemann, E. K. (2012). Phosphorus forms and enzymatic hydrolyzability of organic phosphorus in soils after 30 years of organic and conventional farming. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 175(3), 385-393.
55. Kessler, N., Bonte, A., Albaum, S. P., Mäder, P., Messmer, M., Goesmann, A., Niehaus, K., Langenkämper, G., & Nattkemper, T. W. (2015). Learning to classify organic and conventional wheat – a machine learning driven approach using the MeltDB 2.0 metabolomics analysis platform. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 3, 35.
56. Knapp, S., Gunst, L., Mäder, P., Ghiasi, S., & Mayer, J. (2023). Organic cropping systems maintain yields but have lower yield levels and yield stability than conventional systems – Results from the DOK trial in Switzerland. *Field Crops Research* 302, 109072.
57. Kozjek, K., Kundel, D., Kushwaha, S. K., Olsson, P. A., Ahrén, D., Fliessbach, A., Birkhofer, K., & Hedlund, K. (2021). Long-term agricultural management impacts arbuscular mycorrhizal fungi more than short-term experimental drought. *Applied Soil Ecology* 168, 104140.
58. Krause, H. M., Thonar, C., Eschenbach, W., Well, R., Mader, P., Behrens, S., Kappler, A., & Gättinger, A. (2017). Long term farming systems affect soils potential for N₂O production and reduction processes under denitrifying conditions. *Soil Biology & Biochemistry* 114, 31-41.
59. Krause, H.-M., Stehle, B., Mayer, J., Mayer, M., Steffens, M., Mäder, P., & Fliessbach, A. (2022). Biological soil quality and soil organic carbon change in biodynamic, organic, and conventional farming systems after 42 years. *Agronomy for Sustainable Development* 42(6), 117.
60. Krause, H.-M., Stehle, B., Mayer, J., Mayer, M., Steffens, M., Mäder, P., & Fliessbach, A. (2022). Soil organic carbon over 42 years of organic and conventional farming and biological soil quality in year 42 of the DOK long-term field experiment. *PANGAEA*. DOI 10.1594/PANGAEA.948567
61. Kundel, D., Bodenhausen, N., Jørgensen, H. B., Truu, J., Birkhofer, K., Hedlund, K., Mäder, P., & Fliessbach, A. (2020). Effects of simulated drought on biological soil quality, microbial diversity and yields under long-term conventional and organic agriculture. *FEMS Microbiology Ecology* 96(12).
62. Kundel, D., Lori, M., Fliessbach, A., Van Kleunen, M., Meyer, S., & Mäder, P. (2021). Drought Effects on Nitrogen Provisioning in Different Agricultural Systems: Insights Gained and Lessons Learned from a Field Experiment. *Nitrogen* 2(1), 1-17.
63. Kundel, D., Meyer, S., Birkhofer, H., Fliessbach, A., Mäder, P., Scheu, S., Van Kleunen, M., & Birkhofer, K. (2018). Design and manual to construct rainout-shelters for climate change experiments in agroecosystems. *Frontiers in Environmental Science* 6(14).
64. Langenkämper, G., Zörb, C., Seifert, M., Mäder, P., Fretzdorff, B., & Betsche, T. (2006). Nutritional quality of organic and conventional wheat. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 80, 150-154.
65. Langmeier, M., Frossard, E., Kreuzer, M., Mäder, P., Dubois, D., & Oberson, A. (2002). Nitrogen fertilizer value of cattle manure applied on soils originating from organic and conventional farming systems. *Agronomie* 22, 789-800.
66. Leifeld, J., Reiser, R., & Oberholzer, H. R. (2009). Consequences of conventional versus organic farming on soil carbon: Results from a 27-year field experiment. *Agronomy Journal* 101(5), 1204-1218.
67. Lori, M., Piton, G., Symanczik, S., Legay, N., Brussaard, L., Jaenicke, S., Nascimento, E., Reis, F., Sousa, J. P., Mäder, P., Gättinger, A., Clément, J.-C., & Foulquier, A. (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* 10(1), 7296.
68. Lori, M., Symanczik, S., Mäder, P., Efosa, N., Jaenicke, S., Buegger, F., Tresch, S., Goesmann, A., & Gättinger, A. (2018). Distinct nitrogen provisioning from organic amendments in soil as influenced by farming system and water regime. *Frontiers in Environmental Science* 6(40).
69. Lori, M., Symanczik, S., Mäder, P., De Deyn, G., & Gättinger, A. (2017). Organic farming enhances soil microbial abundance and activity – A meta-analysis and meta-regression. *PLOS ONE* 12(7), e0180442.
70. Lori, M., Hartmann, M., Kundel, D., Mayer, J., Mueller, R.C., Mäder, P., Krause H.-M. (2023). Soil microbial communities are sensitive to differences in fertilization intensity in organic and conventional farming systems. *FEMS Microbiology Ecology* 99 (6).
71. Mäder, P., & Berner, A. (2012). Development of reduced tillage systems in organic farming in Europe. *Renewable Agriculture and Food Systems* 27(Special Issue 01), 7-11.
72. Mäder, P., Alfvöldi, T., Niggli, U., Besson, J.-M., & Dubois, D. (1997). Der Wert des DOK-Versuches unter den Aspekten moderner agrarwissenschaftlicher Forschung. *Archiv für Acker-, Pflanzenbau und Bodenkunde* 42, 279-301.
73. Mäder, P., Edenhofer, S., Boller, T., Wiemken, A., & Niggli, U. (2000). Arbuscular mycorrhizae in a long-term field trial comparing low-input (organic, biological) and high-input (conventional) farming systems in a crop rotation. *Biology and Fertility of Soils* 31, 150-156.
74. Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., & Niggli, U. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* 296, 1694-1697.
75. Mäder, P., Hahn, D., Dubois, D., Gunst, L., Alfvöldi, T., Bergmann, H., Oehme, M., Amadó, R., Schneider, H., Graf, U., Velimirov, A., Fliessbach, A., & Niggli, U. (2007). Wheat quality in organic and conventional farming: Results of a 21-year old field experiment. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 87(10), 1826-1835.
76. Mäder, P., Kaiser, F., Adholeya, A., Singh, R., Uppal, H. S., Sharma, A. K., Srivastava, R., Sahai, V., Aragno, M., Wiemken, A., Johri, B. N., & Fried, P. M. (2011). Inoculation of root microorganisms for sustainable wheat-rice and wheat-black gram rotations in India. *Soil Biology and Biochemistry* 43(3), 609-619.
77. Mäder, P., Pfiffner, L., Niggli, U., Balzer, U., Balzer, F., Plochberger, K., Velimirov, A., & Besson, J.-M. (1993). Effect of three farming systems (bio-dynamic, bio-organic, conventional) on yield and quality of beetroot (*Beta vulgaris L. var. esculenta L.*) in a seven year crop rotation. *Acta Horticulturae* 339, 11-31.
78. Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., & Niggli, U. (2002). The Ins and Outs of Organic Farming. FiBL response to the letter of Goklany in *Science* Vol 298. *Science* 298(5600), 1889-1890.
79. Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., & Niggli, U. (2002). Organic Farming and Energy Efficiency. FiBL response to the letter of Zoehl in *Science* Vol 298. *Science* 298(5600), 1891-1891.

80. Marinari, S., Liburdi, K., Fliessbach, A., & Kalbitz, K. (2010). Effects of organic management on water-extractable organic matter and C mineralization in European arable soils. *Soil & Tillage Research* 106(2), 211-217.
81. Mayer, J., Gunst, L., Mäder, P., Samson, M.-F., Carcea, M., Narducci, V., Thomsen, I. K., & Dubois, D. (2015). Productivity, quality and sustainability of winter wheat under long-term conventional and organic management in Switzerland. *European Journal of Agronomy* 65(0), 27-39.
82. Mayer, M., Krause, H.-M., Fliessbach, A., Mäder, P., & Steffens, M. (2022). Fertilizer quality and labile soil organic matter fractions are vital for organic carbon sequestration in temperate arable soils within a long-term trial in Switzerland. *Geoderma* 426, 116080.
83. Mosimann, C., Oberhansli, T., Ziegler, D., Nassal, D., Kandler, E., Boller, T., Mader, P., & Thonar, C. (2017). Tracing of two *Pseudomonas* strains in the root and rhizoplane of maize, as related to their plant growth-promoting effect in contrasting soils. *Frontiers in Microbiology* 7, 14.
84. Necpalova, M., Lee, J., Skinner, C., Büchi, L., Wittwer, R., Gattinger, A., Van Der Heijden, M., Mäder, P., Charles, R., Berner, A., Mayer, J., & Six, J. (2018). Potentials to mitigate greenhouse gas emissions from Swiss agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 265, 84-102.
85. Nemecek, T., Dubois, D., Huguenin-Elie, O., & Gaillard, G. (2006). Life cycle assessment of Swiss organic farming systems. *Aspects of Applied Biology* 79, 15-18.
86. Nemecek, T., Dubois, D., Huguenin-Elie, O., & Gaillard, G. (2011). Life cycle assessment of Swiss farming systems: I. Integrated and organic farming. *Agricultural Systems* 104(3), 217-232.
87. Nemecek, T., Huguenin-Elie, O., Dubois, D., Gaillard, G., Schaller, B., & Chervet, A. (2011). Life cycle assessment of Swiss farming systems: II. Extensive and intensive production. *Agricultural Systems* 104(3), 233-245.
88. Oberson, A., Besson, J. M., Maire, N., & Sticher, H. (1996). Microbiological processes in soil organic phosphorus transformations in conventional and biological cropping systems. *Biology and Fertility of Soils* 21(3), 138-148.
89. Oberson, A., Fardeau, J.-C., Besson, J.-M., & Sticher, H. (1993). Soil phosphorus dynamics in cropping systems managed according to conventional and biological methods. *Biology and Fertility of Soils* 16, 111-117.
90. Oberson, A., Frossard, E., Bühlmann, C., Mayer, J., Mäder, P., & Lüscher, A. (2013). Nitrogen fixation and transfer in grass-clover leys under organic and conventional cropping systems. *Plant and Soil* 371(1), 237-255.
91. Oberson, A., Nanzer, S., Bosshard, C., Dubois, D., Mäder, P., & Frossard, E. (2007). Symbiotic N-2 fixation by soybean in organic and conventional cropping systems estimated by N-15 dilution and N-15 natural abundance. *Plant and Soil* 290(1-2), 69-83.
92. Oberson, A., Tagmann, H., Langmeier, M., Dubois, D., Mäder, P., & Frossard, E. (2010). Fresh and residual phosphorus uptake by ryegrass from soils with different fertilization histories. *Plant and Soil* 334(1), 391-407.
93. Oberson, A., Jarosch, K. A., Frossard, E., Hammelehle, A., Fliessbach, A., Mäder, P., Mayer, J. (2024): Higher than expected: Nitrogen flows, budgets, and use efficiencies over 35 years of organic and conventional cropping. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 362, 108802.
94. Oehl, F., Frossard, E., Fliessbach, A., Dubois, D., & Oberson, A. (2004). Basal organic phosphorus mineralization in soils under different farming systems. *Soil Biology & Biochemistry* 36, 667-675.
95. Oehl, F., Oberson, A., Probst, M., Fliessbach, A., Roth, H. R., & Frossard, E. (2001). Kinetics of microbial phosphorus uptake in cultivated soils. *Biology and Fertility of Soils* 34(1), 31-41.
96. Oehl, F., Oberson, A., Sinaj, S., & Frossard, E. (2001). Organic phosphorus mineralization studies using isotopic dilution techniques. *Soil Science Society of America Journal* 65, 780-787.
97. Oehl, F., Oberson, A., Tagmann, H. U., Besson, J.-M., Dubois, D., Mäder, P., Roth, H.-R., & Frossard, E. (2002). Phosphorus budget and phosphorus availability in soils under organic and conventional farming. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 62, 25-35.
98. Oehl, F., Sieverding, E., Ineichen, K., Mäder, P., Boller, T., & Wiemken, A. (2003). Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of central Europe. *Applied and Environmental Microbiology* 69(5), 2816-2824.
99. Oehl, F., Sieverding, E., Ineichen, K., Mäder, P., Wiemken, A., & Boller, T. (2009). Distinct sporulation dynamics of arbuscular mycorrhizal fungal communities from different agroecosystems in long-term microcosms. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 134, 257-268.
100. Oehl, F., Sieverding, E., Mäder, P., Dubois, D., Ineichen, K., Boller, T., & Wiemken, A. (2004). Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia* 138, 574-583.
101. Pesaro, M., & Widmer, F. (2006). Identification and specific detection of a novel Pseudomonadaceae cluster associated with soils from winter wheat plots of a long-term agricultural field experiment. *Applied and Environmental Microbiology* 72(1), 37-43.
102. Pfiffner, L., & Luka, H. (2007). Earthworm populations in two low-input cereal farming systems. *Applied Soil Ecology* 37(3), 184-191.
103. Pfiffner, L., & Luka, H. (2000). Overwintering of arthropods in soils of arable fields and adjacent semi-natural habitats. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 78, 215-222.
104. Pfiffner, L., & Mäder, P. (1997). Effects of biodynamic, organic and conventional production systems on earthworm populations. *Biological Agriculture and Horticulture – Entomological Research in Organic Agriculture* 15, 3-10.
105. Pfiffner, L., Besson, J., & Niggli, U. (1995). DOK-Versuch: Vergleichende Langzeituntersuchungen in den drei Anbausystemen biologisch-dynamisch, organisch-biologisch und konventionell. III. Boden: Untersuchungen über die epigäische Nutzarthropoden, insbesondere auf die Laufkäfer (Col. Carabidae), in Winterweizenparzellen. *Schweiz. Landw. Forsch. Sonderheft* 1: 1-15.
106. Pfiffner, L., & Niggli, U. (1996). Effects of bio-dynamic, organic and conventional farming on ground beetles (Col. Carabidae) and other epigeic arthropods in winter wheat. *Biological Agriculture and Horticulture* 12: 353-364.
107. Pfiffner, L. (1993). Long-term effects of biological and conventional farming on earthworm populations. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 156(3), 259-265.
108. Rotches-Ribalta, R., Armengot, L., Mäder, P., Mayer, J., & Sans, F. X. (2017). Long-term management affects the community composition of arable soil seedbanks. *Weed Science* 65(1), 73-82.
109. Schärer, M.-L., Dietrich, L., Kundel, D., Mäder, P., & Kahmen, A. (2022). Reduced plant water use can explain higher soil moisture in organic compared to conventional farming systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 332, 107915.
110. Scheifele, M., Hobi, A., Buegger, F., Gattinger, A., Schulin, R., Boller, T., & Mäder, P. (2017). Impact of pyrochar and hydrochar on soybean (*Glycine max L.*) root nodulation and biological nitrogen fixation. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 180(2), 199-211.

111. Schneider, S., Hartmann, M., Enkerli, J., & Widmer, F. (2010). Fungal community structure in soils of conventional and organic farming systems. *Fungal Ecology* 3(3), 215-224.
112. Siegrist, S., Schaub, D., Pfiffner, L., & Mäder, P. (1998). Does organic agriculture reduce soil erodibility? The results of a long-term field study on loess in Switzerland. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 69, 253-264.
113. Simpson, R.J., Oberson, A., Culvenor, R.A., Ryan, M.H., Veneklaas, E.J., Lambers, H., Lynch, J.P., Ryan, P.R., Delhaize, E., Smith, F.A., Smith, S.E., Harvey, P.R., Richardson, A.E. 2011. Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. *Plant Soil* 349, 89-120.
114. Skinner, C., Gattinger, A., Krauss, M., Krause, H.-M., Mayer, J., Van Der Heijden, M. G. A., & Mäder, P. (2019). The impact of long-term organic farming on soil-derived greenhouse gas emissions. *Scientific Reports* 9(1), 1702.
115. Skinner, C., Gattinger, A., Muller, A., Mäder, P., Fliessbach, A., Stolze, M., Ruser, R., & Niggli, U. (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.
116. Stracke, B. A., Eitel, J., Watzl, B., Mäder, P., & Rüfer, C. E. (2009). Influence of the production method on phytochemical concentrations in whole wheat (*Triticum aestivum* L.): A comparative study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57(21), 10116-10121.
117. Schwalb, S. A., Li, S., Hemkemeyer, M., Heinze, S., Joergensen, R. G., Mayer, J., Mäder, P., & Wichern, F. (2023). Long-term differences in fertilisation type change the bacteria:archaea:fungi ratios and reveal a heterogeneous response of the soil microbial ionome in a Haplic Luvisol. *Soil Biology and Biochemistry* 177, 108892.
118. Tamm, L., Thürig, B., Bruns, C., Fuchs, J. G., Köpke, U., Laustela, M., Leifert, C., Mahlberg, N., Nietlispach, B., Schmidt, C., Weber, F., & Fliessbach, A. (2010). Soil type, management history, and soil amendments influence the development of soil-borne (*Rhizoctonia solani*, *Pythium ultimum*) and air-borne (*Phytophthora infestans*, *Hyaloperonospora parasitica*) diseases. *European Journal of Plant Pathology* 127(4), 465-481.
119. Tamm, L., Thürig, B., Fliessbach, A., Goltlieb, A. E., Karavani, S., & Cohen, Y. (2011). Elicitors and soil management to induce resistance against fungal plant diseases. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 58(3-4), 131-137.
120. Thuerig, B., Fliessbach, A., Berger, N., Fuchs, J. G., Kraus, N., Mahlberg, N., Nietlispach, B., & Tamm, L. (2009). Re-establishment of suppressiveness to soil- and air-borne diseases by re-inoculation of soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry* 41(10), 2153-2161.
121. Widmer, F., Rasche, F., Hartmann, M., & Fliessbach, A. (2006). Community structures and substrate utilization of bacteria in soils from organic and conventional farming systems of the DOK long-term field experiment. *Applied Soil Ecology* 33(3), 294-307.
122. Woese, K., Lange, D., Boess, C., & Bogl, K. W. (1997). A comparison of organically and conventionally grown foods - Results of a review of the relevant literature. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 74(3), 281-293.
123. Zörb, C., Langenkämper, G., Betsche, T., Neehaus, K., & Barsch, A. (2006). Metabolite profiling of wheat grains (*Triticum aestivum* L.) from organic and conventional agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54(21), 8301-8306.
124. Zörb, C., Niehaus, K., Barsch, A., Betsche, T., & Langenkämper, G. (2009). Levels of compounds and metabolites in wheat ears and grains in organic and conventional agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57(20), 9555-9562.

Buchkapitel

1. FAC, & FiBL, (Eds) (1995). DOK-Versuch: vergleichende Langzeit-Untersuchungen in den drei Anbausystemen biologisch-Dynamisch, Organisch-biologisch und Konventionell. Bern: Bundesamt für Landwirtschaft (BLW).
2. Fliessbach, A., Eyhorn, F., Mäder, P., Rentsch, D., & Hany, R. (2001). DOK long-term farming systems trial: Microbial biomass, activity and diversity affect the decomposition of plant residues. In *Sustainable Management of Soil Organic Matter* Eds R. M. Rees, B. C. Ball, C. D. Campbell & C. A. Watson, pp. 363-369. London: CABI.
3. Fliessbach, A., & Mäder, P. (1997). Carbon source utilization by microbial communities in soils under organic and conventional farming practice. In *Microbial Communities – Functional versus Structural Approaches* Eds H. Insam & A. Rangger, pp. 109-120. Berlin: Springer.
4. Frey, B., Brunner, I., Christie, P., Wiemken, A., & Mäder, P. (1998). The use of polytetrafluoroethylene (PTFE) hydrophobic membranes to study transport of ¹⁵N by mycorrhizal hyphae. In *Mycorrhiza Manual* (Ed A. Varma), pp. 151-158. Heidelberg: Springer.
5. Frossard, E., Bünemann, E.K., Gunst, L., Oberson, A., Schärer, M., Tamburini, F. (2016). Fate of fertilizer P in soils the organic pathway. In: Schnug, E., De Kok, L.J. (Eds.), *Phosphorus in agriculture: 100% zero*. Springer Dordrecht, pp. 41-61.
6. Fuchs, J. G., Fliessbach, A., Mäder, P., Weibel, F. P., Tamm, L., Mayer, J., & Schleiss, K. (2014). Effects of compost on soil fertility parameters in short-, mid- and long-term field experiments. In *International Symposium on Organic Matter Management and Compost Use in Horticulture* Eds J. Biala, R. Prange & M. Raviv, pp. 39-46.
7. Krause, H.-M., Fliessbach, A., Mayer, J., & Mäder, P. (2020). Chapter 2 - Implementation and management of the DOK long-term system comparison trial. In *Long-Term Farming Systems Research* Eds G. S. Bhullar & A. Riar, pp. 37-51. Academic Press.
8. Mayer, J., & Mäder, P. (2016). Langzeitversuche - Eine Analyse der Ertragsentwicklung. In *Forschung im Ökologischen Landbau* Eds B. Freyer pp.421-445 Stuttgart VTB.
9. Mäder, P. (1997). Erhöhte bodenmikrobiologische Aktivität durch ökologischen Landbau. In *Naturschutz durch ökologischen Landbau. Ökologische Konzepte* 95 Eds H. Weiger & H. Willer, pp. 49-72. Bad Dürkheim: Deukalion, Stiftung Ökologie und Landbau.
10. Mäder, P., Alföldi, T., Fliessbach, A., Pfiffner, L., & Niggli, U. (1999). Agricultural and ecological performance of cropping systems compared in a long-term field trial. In *Nutrient Disequilibria in Agroecosystems* Eds E. M. A. Smaling, O. Oenema & L. O. Fesco, pp. 247-264. London, Amsterdam: CABI.
11. Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Jossi, W., Widmer, F., Oberson, A., Frossard, E., Oehl, F., Wiemken, A., Gattinger, A., & Niggli, U. (2006). The DOK experiment (Switzerland). In *Long-term field experiments in organic farming* Eds J. Raupp, C. Pekrun, M. Oltmanns & U. Köpke, pp. 41-58. Bonn: Koester.
12. Oberson, A., Pypers, P., Bünemann, E., Frossard, E. (2011). Management impacts on biological phosphorus cycling in cropped soils In: Bünemann, E., Oberson, A., Frossard, E. (Eds.), *Phosphorus in action - Biological processes in soil phosphorus cycling*. Springer Soil Biology Series, pp. 431-458.
13. Pfiffner, L., & Armengot L. (2019). Biodiversity as a prerequisite of sustainable organic farming. In : Köpke, U. (Ed.), *Improving organic crop cultivation*, Chapter 16 : 401-433. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK (ISBN: 978-1-78676-184-2; www.bdsublishing.com).

Abkürzungen und Erläuterungen

a	Jahr	Metagenomik	Genetisches Material wird direkt aus Umweltproben extrahiert, sequenziert und analysiert
Arthropode	Gliederfüsser: Insekten, Tausendfüsser, Krebstiere, Spinnentiere		
bakterivor	Ernährt sich von Bakterien	n	Stichprobenumfang
Basalatmung	Bodenatmung unter Standardbedingungen	N	Stickstoff
BIODYN	DOK-Verfahren nach biologisch-dynamischen Grundsätzen	N ₂	Molekularer Luftstickstoff
BIOORG	DOK-Verfahren nach biologisch-organischen Grundsätzen	N ₂ O	Lachgas
Bodenatmung	Von Mikroorganismen emittiertes CO ₂	NFP	Nationales Schweizer Forschungsprogramm
BT	<i>Bacillus thuringiensis</i> , BT-Präparate enthalten Sporen oder Toxine des Bakteriums	NIR	Nahinfrarotspektroskopie
C	Kohlenstoff	NIV	Nivalenol, ein Mykotoxin
CaO	Brantkalk, chemisch Calciumoxid	Nmik	Mikrobiell gebundener Stickstoff
CH ₄	Methan	Nmin	Mineralischer Stickstoff aus Ammonium und Nitrat
Cmik	Mikrobiell gebundener Kohlenstoff	NMR	«nuclear magnetic resonance» = Kernspinresonanzspektroskopie
Cmik/Corg	Verhältnis von mikrobiellem Kohlenstoff zu organischem Kohlenstoff	Ntotal	Gesamter Stickstoff
C/N	Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff	NOFERT	DOK-Verfahren ohne Düngung
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	NUE	Stickstoff-Nutzungseffizienz
Corg	Organischer Kohlenstoff	OBS	Organische Bodensubstanz = Humus = 1,725 × Corg
CONFYM	DOK-Verfahren «conventional with farm yard manure» = konventionell mit Hofdünger	omnivor	Allesfressend
CONMIN	DOK-Verfahren konventionell mit ausschliesslich Mineraldünger	OS	Organische Substanz
Dehydrogenase	Enzymgruppe in der Atmungskette der Mikroorganismen	P	Phosphor
DGVE	Düנגegrossvieheinheit. 1 DGVE entspricht der jährlichen Ausscheidung von 105 kg N und 15 kg P ₂ O ₅	P ₂ O ₅	Diphosphorpentoxid
DOK	Dynamisch, Organisch, Konventionell. Kurzform für den DOK-Versuch mit biologisch-dynamischen, biologisch-organischen und konventionellen Anbausystemen	Parzelle	Einzelne Fläche mit einem Verfahren in der DOK-Versuchsanlage
DON	Deoxynivalenol, ein Mykotoxin	PLFA	Phospholipid Fettsäure- und Etherlipidmuster
Düngung	Hofdünger im DOK-Versuch reduziert = 1 = 0,7 DGVE praxisüblich = 2 = 1,4 DGVE	PSM	Pflanzenschutzmittel
FFP	Fruchtfolgeperiode, im DOK-Versuch FFP 1: 1978–84; FFP 2: 1985–91; FFP 3: 1992–98; FFP 4: 1999–2005; FFP 5: 2006–12; FFP 6: 2013–19	qCO ₂	Metabolischer Quotient: Ein niedriger Wert zeigt an, dass die Gesellschaft der Mikroorganismen die verfügbare Energie effizient umsetzt
fungivor	Ernährt sich von Pilzen	Rande	Rote Bete
GRUD	Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (2017)	Replikat	Wiederholungen der Versuchseinheiten
herbivor	Ernährt sich von Pflanzen	RFLP	Restriktionsfragmentlängen-polymorphismus
IP	Integrierte Produktion	Rhizodeposition	Wurzeinträge aus Wurzeln und durch Wurzeln abgegebene Stoffe in den Boden
K	Kalium	Schlag	Kulturen werden im DOK-Versuch in drei Schlägen zeitlich versetzt angebaut: A, B, C
Metabolit	Produkt aus enzymkatalysierten Reaktionen	SD	Standardabweichung
		SIMS	Sekundärionen-Massenspektrometrie
		SNF	Schweizerischer Nationalfonds
		t	Tonnen
		TPF	Triphenylformazan, Indikatorfarbstoff
		TS	Trockensubstanz
		15N	Stabiles Isotop des Stickstoffs
		32P, 33P	Radioaktive Isotope von Phosphor



Impressum

Herausgebende Institution

Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL
Ackerstrasse 113, Postfach 219, 5070 Frick, Schweiz
Tel. +41 (0)62 865 72 72
info.suisse@fibl.org, fibl.org

In Zusammenarbeit mit Agroscope und der ETH Zürich

Autorinnen und Autoren: Andreas Fliessbach, Hans-Martin Krause (beide FiBL Schweiz),
Klaus Jarosch, Jochen Mayer (beide Agroscope), Astrid Oberson (ETH Zürich), Paul Mäder (FiBL Schweiz)

Durchsicht: Lukas Pfiffner, Else Bünemann-König (beide FiBL Schweiz)

Redaktion: Vanessa Gabel, Simona Moosmann (beide FiBL Schweiz)

Gestaltung: Brigitta Maurer (FiBL Schweiz)

Fotos: Thomas Alfeldi (FiBL Schweiz): S. 16, 22, 32; Andreas Fliessbach (FiBL Schweiz): S. 1, 2, 6, 8, 12, 18, 24,
37, 39 (2); Tibor Fuchs: Titelbild, S. 9; Dominika Kundel (FiBL Schweiz): S. 13, 19, 41; Adrian Lustenberger:
S.27,43; Paul Mäder (FiBL Schweiz): S. 21, 42; Simona Moosmann (FiBL Schweiz): S. 8, 23, 38; Lukas Pfiffner
(FiBL Schweiz): S. 39 (1); FiBL: S. 20, 28, 52; Wikimedia (CSIRO, CC BY 3.0): S. 40; Geoinformationsplattform
der Schweizerischen Eidgenossenschaft: S. 7

DOI: 10.5281/zenodo.10512831

FiBL-Art.-Nr.: 1260

Empfohlene Zitierweise: Fliessbach A., Krause H-M., Jarosch K., Mayer J., Oberson A., & Mäder P. (2024).
Der DOK-Versuch: Vergleich von biologischen und konventionellen Anbausystemen über 45 Jahre.
Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL, Frick. Unter: shop.fibl.org > 1260

Das Dossier steht unter shop.fibl.org auch zum kostenlosen Download zur Verfügung.

Alle Angaben in diesem Dossier basieren auf bestem Wissen und der Erfahrung der Autor*innen.
Trotz grösster Sorgfalt sind Unrichtigkeiten und Anwendungsfehler nicht auszuschliessen. Daher können
Autor*innen und Herausgeber keinerlei Haftung für etwa vorhandene inhaltliche Unrichtigkeiten
sowie für Schäden aus der Befolgung der Empfehlungen übernehmen.

2024 © FiBL

Für detaillierte Copyright-Informationen siehe fibl.org/de/copyright