

La sperimentazione DOK

Confronto tra sistemi di coltivazione biologici e convenzionali nell'arco di 45 anni





La sperimentazione DOK studia le differenze tra i seminativi coltivati con metodo biologico e quelli coltivati con metodo convenzionale dal 1978. Il presente dossier riassume i risultati più importanti di oltre 40 anni di ricerca in modo conciso e comprensibile ed è quindi rivolto agli esperti interessati del settore, della consulenza e della scienza.

Nella sperimentazione DOK vengono confrontati i sistemi agricoli biodinamico (BIODYN), biologico (BIOORG) e convenzionale (CONFYM). La sperimentazione simula quindi aziende agricole dedite a coltivazione e allevamento di bestiame. Il sistema CONMIN, invece, rappresenta un sistema agricolo convenzionale privo di bestiame con fertilizzazione esclusivamente in forma minerale.

I risultati della ricerca si riferiscono a cinque piante utili che attualmente vengono coltivate alternativamente in periodi di rotazione delle colture di sette anni: mais insilato, soia, grano invernale, patata e trifoglio. Il dossier presenta i risultati relativi a resa, qualità del suolo, apporto di nutrienti, biodiversità e clima.

Indice

Premessa	3
Ricerca all'avanguardia con rilevanza pratica	4
Il sito sperimentale	7
La sperimentazione	9
Resa delle colture	17
Dinamica dei nutrienti	25
Qualità del suolo	31
Biodiversità	37
Cambiamento climatico	43
Ringraziamenti	45
Pubblicazioni della sperimentazione DOK	46

Supporto alla lettura

Questo argomento complesso non può essere presentato senza abbreviazioni e termini tecnici. I lettori troveranno quindi un elenco di abbreviazioni e spiegazioni alla fine del documento, a pagina 51.

Nelle tabelle e nei grafici vengono utilizzate diverse lettere minuscole per evidenziare le differenze statistiche.

Premessa

Risultati stimolanti e affidabili al servizio della sicurezza alimentare sostenibile

Raramente sono state disposte sperimentazioni scientifiche lunghe quanto la sperimentazione DOK. Ma tale continuità è particolarmente preziosa per molti aspetti della ricerca, perché alcuni risultati si dimostrano veramente rilevanti solo dopo un periodo di tempo molto lungo. Questo vale anche, ad esempio, per le osservazioni a lungo termine sugli effetti del cambiamento climatico. Anche se i risultati a breve termine sono rilevanti, non sono orientati a valutare gli effetti di fattori esterni nel lungo periodo, in cui necessariamente si deve considerare anche l'effetto del fattore tempo. Nella sperimentazione DOK i fattori esterni principali quali i metodi di gestione sono rimasti invariati dal primo anno, mentre le domande di ricerca, mentre le domande che i ricercatori si pongono continuano a evolversi nel corso degli anni e dei decenni, a seconda dell'oggetto di ricerca e degli aspetti sociali.

Conosco lo studio DOK fin dai suoi inizi, decenni fa. So anche che mette a confronto i risultati di diversi metodi di coltivazione in termini di resa e produttività, a breve e lungo termine, nonché del relativo impatto sull'ambiente. L'attenzione principale è rivolta alla fertilità del suolo, al clima, all'apporto di nutrienti e alla biodiversità. La sperimentazione DOK è un ottimo esempio di collaborazione riuscita tra gli Istituti Federali di Ricerca svizzeri (attualmente Agroscope) e FiBL. Sia come ricercatore presso ETH, che come responsabile dello sviluppo delle politiche presso l'Ufficio federale per l'agricoltura e oggi al servizio della sicurezza alimentare globale e della nutrizione presso il Comitato delle Nazioni Unite per la sicurezza alimentare mondiale, ho compreso che i risultati della sperimentazione DOK mostrano quali sono le differenze tra i metodi di produzione «biodinamici», «biologici-organici» e «convenzionali» in relazione alle attuali questioni oggetto di ricerca e allo sviluppo dei sistemi.

Un'analisi più approfondita della sperimentazione DOK solleva anche molte domande sull'impostazione stessa della ricerca e sullo sviluppo dei singoli metodi di produzione. Quali sono le dinamiche di sviluppo dei vari sistemi agricoli da prendere in considerazione? Ad esempio, il sistema di produzione inizialmente orientato ad un'agricoltura puramente «convenzionale» è stato trasformato in un sistema di «produzione integrale» nel corso degli

anni. Esiste anche una dinamica all'interno dell'orientamento biologico, ad esempio le nuove varietà, rotazioni di colture, macchinari e controllo biologico dei parassiti. Si sollevano domande interessanti, non solo dal punto di vista della ricerca, ma anche dal punto di vista della sicurezza alimentare sostenibile e della pratica. I singoli capitoli della presente pubblicazione forniscono risposte a molte di queste domande e illustrano lo sviluppo del sistema di sperimentazione e le questioni affrontate.

Dal punto di vista della sicurezza alimentare globale e sostenibile, la domanda logica è: in che misura i metodi di produzione biologica possono dare un contributo? Abbiamo bisogno di più o meno agricoltura biologica o l'intero settore agricolo dovrebbe passare al biologico? Si tratta di domande provocatorie, per le quali esistono solo risposte complesse. Ciò che è certo è che l'altissima quota di perdite alimentari (post-raccolta) e di rifiuti alimentari (soprattutto nelle famiglie), così come l'elevata componente di mangimi per animali sui terreni coltivabili, possono essere corrette e contraddicono la tesi secondo cui sussiste un fabbisogno maggiore di terra con l'aumento della popolazione. In altre parole: la scarsità viene relativizzata. Riflessioni in tal senso sono legittime quando si confronta l'impatto ambientale dei vari metodi di produzione e i relativi costi conseguenti, che sono a carico della società.

Una sfida particolare per i due istituti di ricerca FiBL e Agroscope è costituita dal finanziamento a lungo termine della sperimentazione DOK. È molto importante sottolineare le due dinamiche menzionate: gli effetti a lungo termine da un lato e i metodi di produzione dall'altro. L'efficace reperimento di numerosi fondi terzi per la sperimentazione DOK presso altri uffici federali, del Fondo nazionale svizzero per la ricerca scientifica e dell'UE dimostra in modo impressionante che questo tipo di ricerca di lungo periodo è importante per la ricerca di base e applicata. DOK è quindi diventata un'importante piattaforma di ricerca nazionale e internazionale.

Vi invito a leggere il presente dossier. È stimolante e colpisce per il suo rigore scientifico. Ecco perché la sperimentazione DOK è riuscita a entrare nella «Walk of Fame» della scienza, la rivista «Science». Mi auguro che la sperimentazione DOK continui a lungo a stupirci con risultati affidabili e ad orientarci nella ricerca.



Presidente del consiglio della fondazione
Prof. Dott. Bernard Lehmann

Ricerca all'avanguardia con rilevanza pratica

Il tema dell'ecosostenibilità e della produttività in agricoltura è di attualità da decenni. In tutto il mondo vengono praticati numerosi metodi di coltivazione per la produzione di alimenti e mangimi. Intere società e generazioni discutono in merito a vantaggi e svantaggi dei sistemi di coltivazione biologica e convenzionale.

All'inizio degli anni '70, figure appartenenti agli ambiti della pratica agricola, della scienza e della politica avviarono la discussione in Svizzera e nel 1978 dettero inizio alla sperimentazione DOK a Therwil, nella campagna di Basilea. **DOK** sta per **D**ynamisch, **O**rganisch e **K**onventionell, ossia dinamico, biologico e convenzionale. La sperimentazione esamina le differenze tra i sistemi di coltivazione biodinamici, biologici e convenzionali con diverse intensità di fertilizzanti.

Questioni di grande attualità come il cambiamento climatico e l'adattamento al clima, la perdita di biodiversità, la crescita della popolazione mondiale e la dipendenza dalle materie prime impongono più che mai un esame scientifico del modo in cui produciamo cibo e mangimi.

Lo studio DOK confronta i sistemi di produzione agricola da oltre 40 anni e ha quindi dato una base scientifica al dibattito sulle opportunità dell'agricoltura biologica, controverso sia allora che oggi.

Basi scientifiche per questioni politiche

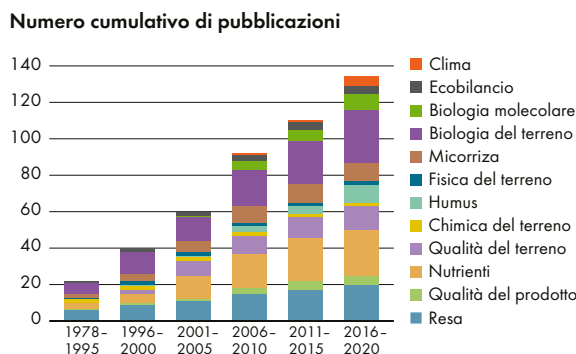
Il momento più importante nella sperimentazione DOK è stato senza dubbio la pubblicazione scientifica sulla rivista Science nel 2002 sulla fertilità del suolo e la biodiversità nell'agricoltura biologica. Ciò ha reso l'agricoltura biologica socialmente accettabile, riconoscendo il fatto che offra soluzioni ai principali problemi ambientali della produzione agricola.

Gli attuali progetti di ricerca in corso nell'ambito della sperimentazione DOK si concentrano sui temi della qualità del suolo, della biodiversità e del clima, che sono estremamente rilevanti da una prospettiva sociale globale e decisivi per il nostro futuro.

Importanza a livello nazionale e internazionale

In oltre 40 anni, la sperimentazione DOK ha prodotto oltre 120 pubblicazioni scientifiche, oltre a tesi di dottorato e un gran numero di tesi di laurea (Figura 1). Innumerevoli visitatori provenienti da molti paesi del mondo, agricoltori, studenti, allievi e scienziati di alto livello delle migliori università hanno visitato la sperimentazione e realizzato progetti di ricerca in ambito DOK.

Figura 1: Numero di pubblicazioni in riviste scientifiche



Nel 2015, la Segreteria di Stato svizzera per l'istruzione, la ricerca e l'innovazione ha incluso la sperimentazione DOK nella Roadmap dell'infrastruttura di ricerca svizzera. Questa raccoglie le unità sperimentali nazionali più significative. La sperimentazione DOK è quindi entrata nell'olimpo delle scienze in Svizzera.

La sperimentazione fa parte di un approccio di ricerca circolare: le questioni pratiche aperte vengono prima analizzate nel campo DOK utilizzando metodi all'avanguardia. A ciò seguono studi dettagliati in serra e in aziende agricole. I nuovi risultati vengono a loro volta integrati nella ricerca sul campo. Di conseguenza, la sperimentazione DOK svolge spesso un ruolo di primo piano nelle questioni attuali della ricerca agricola e ambientale a livello nazionale e internazionale per le indagini sul campo.

Il fatto che la sperimentazione DOK abbia un posto di rilievo nella ricerca accademica di alto livello è dimostrato anche dalla qualità del lavoro di ricerca e dalla continua attualità dei temi oggetto di ricerca. Ecco alcuni esempi:

- Il DOK è stato utilizzato come campo di sperimentazione da sette progetti del Programma di ricerca nazionale svizzero «Il suolo come risorsa». Questi hanno studiato il legame tra le proprietà e le funzioni del suolo e la produzione agricola¹.
 - In un progetto europeo molto apprezzato sulla qualità del suolo, un team di ricerca internazionale ha studiato l'effetto della coltivazione sui servizi ecosistemici del suolo. La sperimentazione DOK ha costituito un importante pilastro dell'infrastruttura di sperimentazione².
 - Nell'ambito di un progetto del Fondo Nazionale Svizzero per la Ricerca Scientifica (FNS), i ricercatori del suolo del FiBL studiano come la coltivazione nella sperimentazione DOK influisce sulla qualità dell'humus e sul suo ricambio³.
 - Dal 2016, gruppi di ricerca internazionali stanno studiando l'effetto dei sistemi di coltivazione sulla tolleranza allo stress da siccità delle colture e delle popolazioni microbiche⁴.
 - Un progetto del FNS sulla biodiversità microbica del suolo in relazione al ciclo dell'azoto è giunto attualmente alla sua fase finale.
 - In un nuovo progetto di selezione delle piante da coltivare dell'UE, si analizzano le popolazioni microbiche sui semi delle piante coltivate⁵. In un secondo progetto, un team di ricerca sviluppa un quadro per il monitoraggio della fertilità del suolo⁶.
- Le questioni aperte hanno spinto i ricercatori ad avviare ulteriori sperimentazioni di lungo periodo su aspetti specifici. Tra questi, una sperimentazione sul campo sugli effetti della lavorazione ridotta del terreno, della strategia di fertilizzazione e dei preparati biodinamici. Le superfici di sperimentazione sono state realizzate a Frick nel 2002. Anche i confronti tra i sistemi del FiBL in India, Kenya e Bolivia, iniziati nel 2005, derivano dalla storia di successo della sperimentazione DOK.

¹NFP 68, ²ISQAPER, ³DynaCarb, ⁴BiodivERsA (SOIICIM, Biofair e Microservices), ⁵Liveseeding, ⁶Benchmarks

Figura 2: Argomenti e metodi di ricerca nel tempo

Stabilità e qualità della resa

Produzioni Metodi classici (indagini sulla resa, contenuto proteico, contenuto di nutrienti, oligoelementi), test delle varietà, metodi visivi

Produzioni
Tele rilevamento, modellamento, Intelligenza artificiale, analisi dei metaboliti, analisi dei modelli proteici

Cicli del fosforo e dell'azoto

Bilancio del fosforo Bilancio della superficie input/output

Ciclo del fosforo Radioisotopi 32P, 33P, frazionamento

Fissazione dell'azoto
Rizodeposizione dell'azoto
Trasferimento di azoto Isotopo stabile 15N

Bilancio dell'azoto

Clima

Contenuto di carbonio

Qualità dell'OBS frazionamento della densità, esperimenti di degradazione

Emissioni di gas serra, resilienza, carbonio nelle radici
NIR, NanoSIMS, NMR

Biodiversità e biologia del suolo

Biomassa e attività microbica Metodi classici

Lombrichi e pedofauna, biodiversità dei microbi PLFA

Micorriza
Morfofotassonomia, identificazione genetica

Metagenomica del suolo
Popolazioni microbiche, diversità funzionale

In questa figura, i temi principali della sperimentazione DOK sono rappresentati in grassetto. In ogni caso, sono elencati anche i metodi utilizzati per effettuare l'indagine in merito alle rispettive questioni. Entrambi sono ordinati temporalmente sull'asse sottostante.



Origini con presupposti diversi

I temi affrontati dalla sperimentazione DOK fanno ormai parte di un dibattito pubblico. I presupposti per i pionieri degli anni settanta erano completamente diversi: contro ogni aspettativa, un piccolo gruppo di agricoltori biologici e i relativi sostenitori in Svizzera sostenevano la sperimentazione scientifica dell'agricoltura biologica.

Come risultato di questo impegno di successo, l'Istituto di Ricerca sull'Agricoltura Biologica, fondato a tal fine nel 1973, insieme all'allora Istituto Federale di Ricerca per la Chimica Agraria e l'Igiene Ambientale, fu incaricato di confrontare i tre sistemi agricoli (biodinamico, biologico e convenzionale) in una sperimentazione di lungo periodo. Il FiBL si occupa prevalentemente degli appezzamenti a coltivazione biologica, mentre il Centro di competenza svizzero della ricerca agricola e Agroscope è responsabile degli appezzamenti coltivati secondo il metodo convenzionale.

Scienza e pratica come ricetta per il successo

Gli agricoltori biologici sono stati coinvolti fin dalla fase di pianificazione, ma soprattutto durante la realizzazione della sperimentazione, al fine di garantire la rilevanza pratica. Il loro impegno nella sperimentazione e il loro continuo interesse nei risultati hanno spronato gli scienziati coinvolti a ottenere prestazioni massime. Oltre alle pubblicazioni scientifiche, un obiettivo importante era rendere accessibili i risultati, a volte complessi, agli agricoltori e agli altri gruppi interessati.

Grazie alla meticolosa documentazione delle misure di coltura e alle svariate analisi, la sperimentazione DOK è oggi una delle superfici agricole meglio documentate al mondo. La sperimentazione e la raccolta dei dati diventano sempre più preziose di anno in anno grazie alla lunga durata e alla coerente raccolta dei dati.



Ricercatori e agricoltori si incontrano regolarmente in occasione delle visite sul campo DOK (in alto nel 2012, in basso nel 2023).

Il sito sperimentale

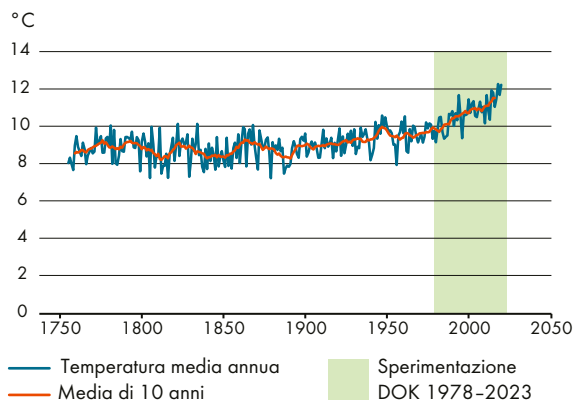


Le superfici della sperimentazione si trovano nel Leimental, a sud-ovest di Basilea, nella pianura del Reno superiore.

Clima

La pianura dell'Alto Reno ha un clima favorevole in termini di calore e umidità. La temperatura media annuale è stata di 9,7 °C fino alla fine del secolo scorso. La media negli anni 2010–20 è stata pari a 11,2 °C. Le precipitazioni annuali registrano una media di 872 mm.

Figura 3: Variazioni di temperatura



Media annuale e media mobile della temperatura dell'aria a Basilea, misurata a 1 metro di altezza. Tra il 1978 e il 2010, la temperatura è aumentata di 1,5 °C.

Suolo e geologia

La sperimentazione avviene nell'angolo sud-orientale della fossa del Reno e la superficie si trova in mezzo alle colline del Giura. La fossa della valle del Reno è riempita da spessi strati di ghiaia, a cui si è sovrapposto materiale fine (löss) proveniente dalle pianure alluvionali dei fronti dei ghiacciai durante l'ultimo periodo glaciale. Così si sono formati fertili terreni argillosi nelle valli cave.

Il löss nella valle di Leimental è profondo. Su di esso si sono formati terreni bruni moderatamente sviluppati, che in alcuni punti tendono allo pseudogley. I terreni sono decalcificati, ma contengono ancora singoli frammenti di roccia provenienti dal vicino Giura. I terreni hanno una profondità compresa tra 1 e 1,3 m e sono quindi molto favorevoli al radicamento.

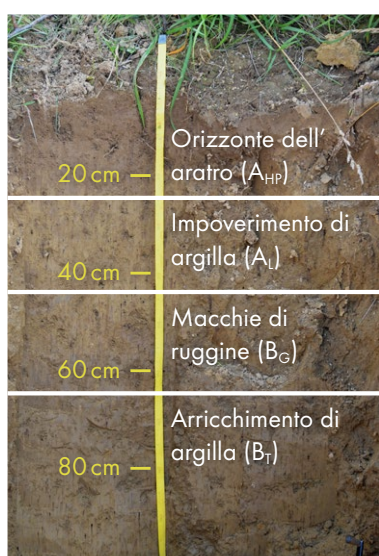
A causa delle regolari inondazioni del vicino torrente Birsig, in passato si sono depositati sedimenti di diverse granulometrie. I terreni delle superfici della sperimentazione DOK contengono solo una piccola quantità di sabbia, mentre il limo predomina al 70%. L'argilla si è sedimentata in piccoli accumuli d'acqua, per cui è distribuita in modo piuttosto irregolare.

Tabella 1: Composizione granulometrica dei suoli secondo i metodi della sperimentazione DOK. Valori medi delle percentuali di peso e deviazione standard (SD)

Metodo	Argilla (%)	SD	Limo (%)	SD	Sabbia (%)	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

Il contenuto medio di argilla negli appezzamenti DOK è del 15,6 % (mediana 15,3), mentre i valori più bassi sono del 12,5 %. In otto appezzamenti nell'angolo nord-occidentale della sperimentazione, tuttavia, il contenuto di argilla ha raggiunto valori compresi tra il 20 e il 25 %. Questa zona ad alto contenuto di argilla si distingue chiaramente dagli appezzamenti vicini. L'effetto del contenuto di argilla viene preso in considerazione nelle analisi statistiche, soprattutto quando si valutano gli effetti del processo sul terreno.

Il terreno ha pochi macropori, motivo per cui si riscalda lentamente in primavera. A volte, tende a intasarsi d'acqua, motivo per cui si vedono delle macchie scure nel terreno, le cosiddette concrezioni di ferro e manganese (pseudogley). Di conseguenza, il terreno può essere lavorato solo a brevi intervalli di tempo e la fresatura in primavera e all'inizio dell'estate risulta impegnativa. Il terreno consente una risalita capillare dell'acqua dagli strati più profondi del suolo, per cui la siccità non ha costituito un problema grave finora in estate.



Il profilo del terreno mostra lo sviluppo del suolo. L'orizzonte di aratura A_p sopra l'orizzonte A_i e l'orizzonte B_r .



I terreni dei metodi di coltivazione CONMIN (a sinistra) e BIODYN 2 (a destra) dopo una forte pioggia nel novembre 2002. La formazione di fango sulla superficie del terreno era molto più pronunciata nel metodo CONMIN.

La sperimentazione

Nella sperimentazione DOK vengono confrontati i sistemi agricoli biodinamico (**BIODYN**), biologico (**BIOORG**) e convenzionale (**CONFYM**). In questi sistemi di coltivazione, la sperimentazione simula sistemi di coltivazione e allevamento.

I due sistemi biologici sono conformi agli standard Bio Suisse e Demeter. Analogamente alle linee guida Demeter, nella sperimentazione BIODYN si utilizzano preparati per campi e compost e si tiene conto del calendario delle semine e dei lavori. Il metodo convenzionale CONFYM corrisponde all'odierna produzione integrata con un equilibrio di nutrienti e una protezione delle piante in base a soglie di danno economico.

Oltre ai sistemi di coltivazione con allevamento simulato, dal secondo periodo di rotazione delle colture (1985) esiste un sistema convenzionale esclusivamente concimato con minerali che rappresenta un'agricoltura senza bestiame (**CONMIN**).

Nei sistemi BIODYN, BIOORG e CONFYM vengono analizzati due metodi con diverse intensità di fertilizzazione. L'intensità di fertilizzazione si basa su due densità di bestiame: 1,4 unità di bestiame adulto (UBA) corrispondente alla densità media di capi di bestiame in Svizzera, e 0,7 corrispondente a una densità con allevamento ridotto. Il letame viene ottenuto da aziende agricole che operano secondo il rispettivo sistema. Nei sistemi convenzionali, i fertilizzanti minerali vengono applicati secondo le raccomandazioni svizzere sui fertilizzanti (GRUD).

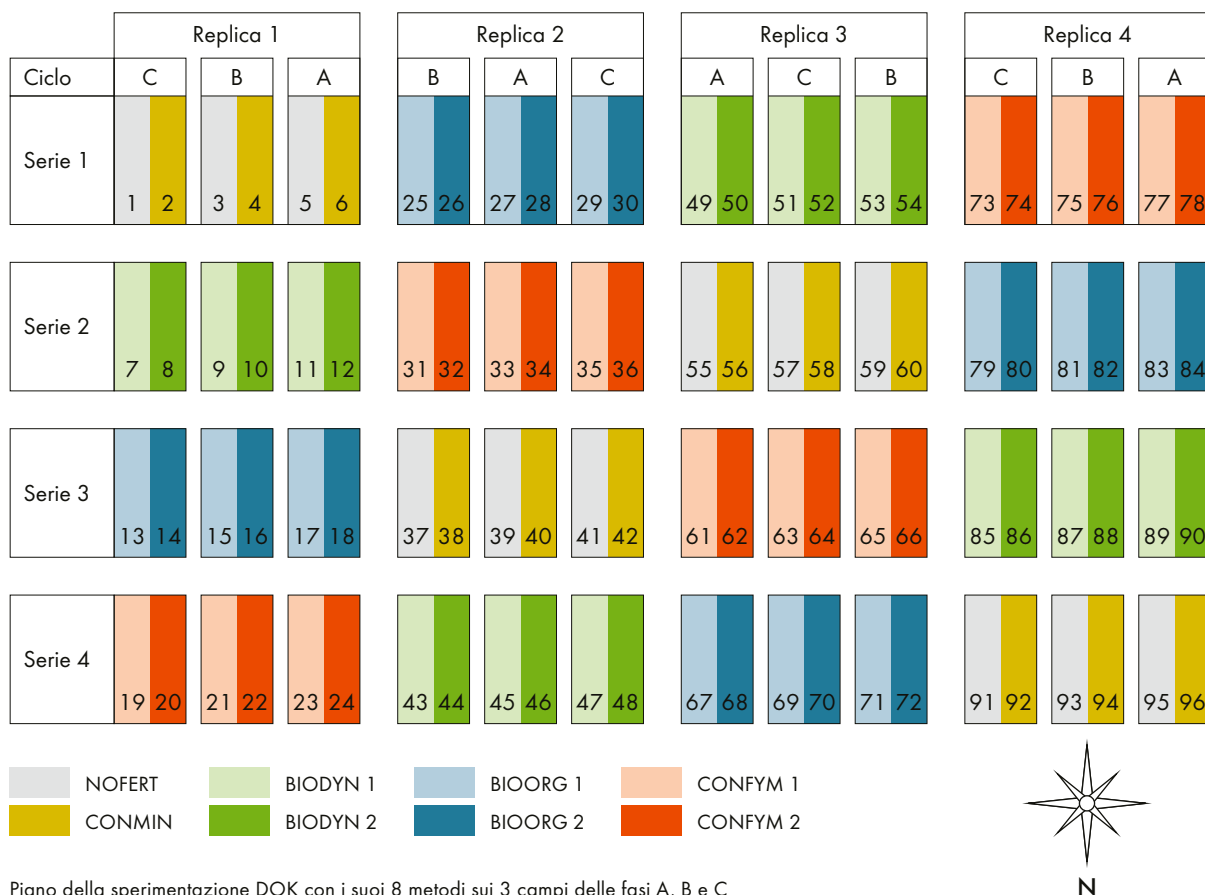
In un sistema di controllo non è stato applicato alcun fertilizzante dall'inizio della sperimentazione (**NOFERT**). I preparati biodinamici 500 e 501 sono stati utilizzati anche qui dall'inizio del 1978, la difesa fitopatologica corrisponde alle misure BIODYN.



Foto aerea delle quattro repliche della sperimentazione DOK nel 2017 con i campi delle tre fasi: fase A grano invernale 2 con sezione per una sperimentazione varietale nella zona marginale, fase B soia, fase C grano invernale 1. Inoltre, in alcuni appezzamenti selezionati si possono vedere tettoie antipioggia del progetto SoilClim.

Struttura della sperimentazione

Figura 4: Piano degli appezzamenti



Piano della sperimentazione DOK con i suoi 8 metodi sui 3 campi delle fasi A, B e C suddivisi in 4 file e 4 repliche.

La sperimentazione consiste in 96 singoli appezzamenti da 5 × 20 metri ciascuno. Gli otto processi sono organizzati in quattro repliche. Ogni metodo è rappresentato in ogni riga e in ogni colonna del sistema a blocchi randomizzato. In tal modo, la variabilità del luogo può essere equalizzata e presa in considerazione nelle statistiche.

Inoltre, ogni anno vengono coltivate una accanto all'altra tre diverse colture della rotazione settennale. La rotazione delle colture avviene in tre lotti

paralleli A, B e C a distanza di tempo. In questo modo, le fluttuazioni annuali della resa dovute alle condizioni meteorologiche possono essere compensate. In ogni periodo di rotazione delle colture, è possibile analizzare le rese degli appezzamenti di almeno 12 anni di coltivazione (3 lotti × 4 repliche) per ogni coltura e ogni metodo. Il modello statistico per la valutazione della qualità del suolo tiene conto del contenuto di argilla in ogni appezzamento, un fattore importante per la variabilità del sito.

Fertilizzazione

1,4 UBA corrisponde alla quantità di letame di aziendale utilizzato in un'azienda agricola mista svizzera e, di seguito, al livello di fertilizzazione 2. Metà quantità di letame di aziendale pari a 0,7 UBA (livello di concimazione 1) è stata introdotta come variante di controllo e simula un'azienda agricola con poco bestiame. Il liquame viene utilizzato per la gestione della coltura in corso, il letame come fertilizzante di base a lento rilascio.

Mentre nel sistema biodinamico si utilizza solo letame aziendale, negli appezzamenti biologici si applicano anche piccole quantità di potassio minerale (potassio brevettato o Kalimagenesia).

Nel metodo CONFYM 2 vengono aggiunte quantità maggiori di fertilizzante minerale fino a raggiungere la fertilizzazione standard secondo GRUD. Nel metodo CONFYM 1, invece, si riducono sia la quantità di letame di aziendale che la quantità di fertilizzante minerale. Nel sistema CONMIN, concimato esclusivamente con minerali, si utilizza solo fertilizzante minerale fino alla quantità raccomandata secondo lo standard; in questo caso non ci sono livelli di fertilizzazione diversi.

Nei sistemi convenzionali, l'introduzione della produzione integrata nel 1992 ha fatto sì che le riserve di azoto minerale presenti nel terreno venissero prese in considerazione per calcolare la quantità di fertilizzante. L'obiettivo è una fertilizzazione orientata al fabbisogno.

I livelli di fertilizzazione completa dei vari sistemi non sono equivalenti dal punto di vista nutritivo. Ciò significa che le quantità totali di fertilizzante e i nutrienti contenuti nel fertilizzante variano da un sistema all'altro a seconda della pratica consueta. La fertilizzazione nelle condizioni sperimentali si basa sui cosiddetti elementi guida, definiti in un piano di fertilizzazione per ogni periodo di rotazione delle colture. Il fosforo (P) svolge un ruolo decisivo in tal caso. Se il piano di fertilizzazione non è stato seguito esattamente nell'anno precedente, può essere corretto nell'anno in corso.

Cambiamenti durante la sperimentazione

Nel primo e nel secondo periodo di rotazione delle colture (PRC), il tasso di applicazione del fertilizzante era ancora di 0,6 UBA nel livello di fertilizzazione 1 e 1,2 UBA nel livello di fertilizzazione 2. All'inizio del terzo PRC, i tassi di fertilizzazione sono stati aumentati fino ai valori sopra citati a causa dell'aumento della percentuale di colture foraggere nella rotazione delle colture.

Nel quarto PRC, l'azienda è passata all'agricoltura biologico-organica, a causa del diverso sistema di stabulazione, il rapporto tra letame e liquame nel fertilizzante aziendale è cambiato in questo periodo.

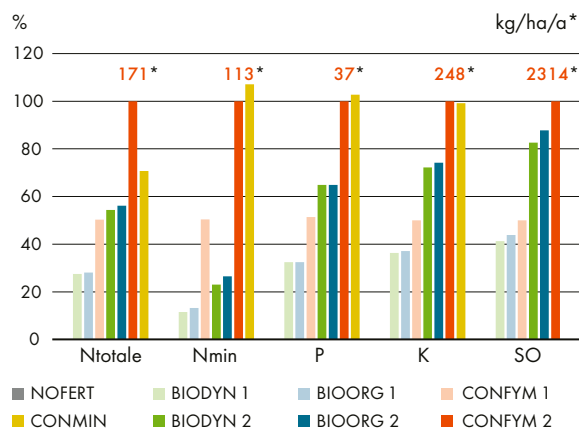
Trattamento diverso del fertilizzante aziendale

Il fertilizzante aziendale nei tre sistemi BIODYN, BIOORG e CONFYM vengono conservati e trattati in modo diverso a seconda dei requisiti dei rispettivi sistemi:

- come compost di letame nel BIODYN
- come letame maturo nel BIOORG
- come letame di lettiera nella CONFYM

La perdita di sostanza organica durante lo stoccaggio è minima nel letame di lettiera e aumenta dal letame maturo al compost di letame.

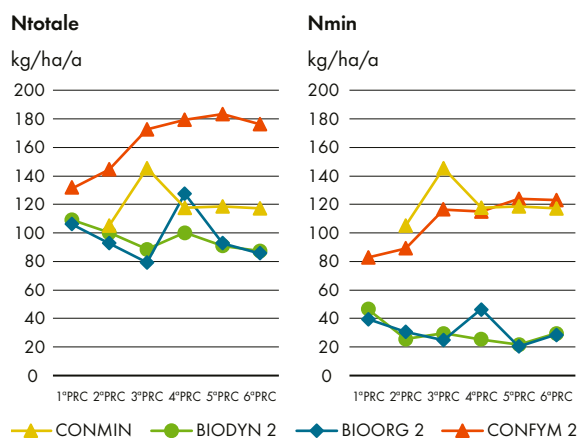
Figura 5: Quantità di sostanze nutritive applicate



Le quantità applicate di azoto totale (Ntotale), azoto minerale (Nmin come ammonio e nitrato nei fertilizzanti di fattoria e minerali), fosforo e potassio da fonti organiche e minerali, nonché la quantità di sostanza organica (SO) applicata con letame e liquame. Tutti i dati sono valori medi in PRC 2-6 e relativi al processo CONFYM 2, le cui quantità assolute sono indicate in rosso.

Figura 5 mostra chiaramente che durante i cinque periodi di rotazione delle colture dal 1985 in poi, nei due metodi biologici sono stati utilizzati il 45 % in meno di azoto totale (N), il 75 % in meno di azoto minerale (Nmin), il 35 % in meno di fosforo e il 27 % in meno di potassio (K) rispetto a CONFYM 2. La quantità di sostanza organica aggiunta con il letame è stata inferiore del 12 % nel metodo BIOORG e del 17 % nel metodo BIODYN rispetto al metodo CONFYM 2. Il motivo di questi valori diversi è da ricercare nella variazione del letame aziendale dovuta ai diversi metodi di stoccaggio e lavorazione.

Figura 6: Fertilizzazione con azoto



Azoto totale (Ntotale) e azoto minerale (Nmin come ammonio e nitrato). Nei sistemi biologici si applica azoto esclusivamente da letame e liquame, mentre nei sistemi convenzionali si integra con fertilizzanti minerali fino al livello di fertilizzazione standard.

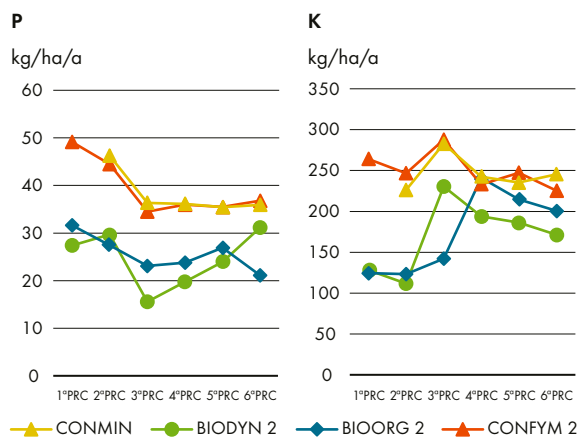
L'apporto di azoto nel sistema CONFYM è aumentato in modo significativo (Figura 6). Ciò è dovuto al fatto che a partire dal terzo PRC sono state coltivate colture foraggere (trifoglio, mais) con elevato fabbisogno di N e le raccomandazioni di fertilizzanti sono aumentate a causa delle maggiori aspettative di resa. Poiché in CONFYM viene preso in considerazione solo il 60 % dell'azoto contenuto nel letame aziendale secondo GRUD, la fertilizzazione N totale è significativamente più alta rispetto alla CONMIN, con 171 kg/ha all'anno.

In media, nel sistema CONMIN concimato con minerali, vengono utilizzati 50 kg in meno di **azoto (N)**. Questa differenza corrisponde alla quantità di N non considerata nel letame aziendale, che può anche causare problemi ambientali a causa delle perdite gassose (ammoniaca e protossido di azoto) e del dilavamento (nitrati).

Nei sistemi biologici vengono applicati 95 kg di N per ettaro, di cui solo 30 kg sono minerali e quindi direttamente efficaci. La parte organica di N di letame aziendale si trasforma in ammonio e nitrato disponibile per le piante solo attraverso la mineralizzazione nel terreno. Nel complesso, l'apporto di N nei biosistemi è piuttosto stabile.

Il **fosforo (P)** è un nutriente per le piante, le cui riserve a livello globale si stanno esaurendo. I fertilizzanti a base di P sono pertanto costosi. Nella sperimentazione DOK, la fertilizzazione con P dei sistemi convenzionali viene effettuata secondo gli standard, tenendo conto dei nutrienti solubili presenti nel terreno. Inoltre, le quantità applicate sono state adeguate alle revisioni del GRUD. L'aumento

Figura 7: Fertilizzazione con fosforo e potassio



In BIOORG, oltre al letame aziendale, vengono applicati anche fertilizzanti K approvati.

in BIODYN è presumibilmente legato all'aumento nell'applicazione di P attraverso il letame aziendale da PRC 3.

Il **potassio (K)** viene impiegato intensamente nei sistemi convenzionali fin dall'inizio della sperimentazione DOK, perché le quantità di K solubili nel terreno erano basse. In BIOORG viene aggiunta magnesia potassica, mentre in BIODYN non viene impiegato alcun fertilizzante potassico aggiuntivo. L'aumento del potassio nel terzo PRC nei metodi biologici può essere spiegato solo in parte dall'aumento delle quantità di letame aziendale. In linea di massima, il liquame contiene più potassio del letame.

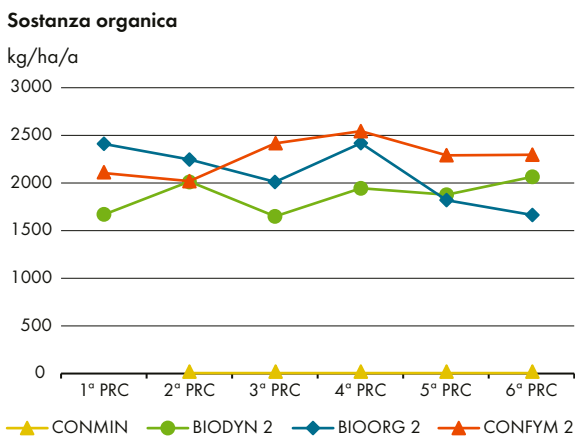


Fertilizzanti commerciali e prodotti fitosanitari utilizzati nel sistema convenzionale CONMIN per il grano invernale.



Appezamenti della sperimentazione DOK con grano e tettoie anti-pioggia per analizzare gli effetti della siccità sulla biodiversità del suolo.

Figura 8: Aggiunta di sostanza organica



I fertilizzanti aziendali sono il letame e il liquame. Oltre all'acqua, i loro componenti principali sono la sostanza organica e i minerali. È rappresentata la quantità di SO proveniente dal letame di 1,4 capi di bestiame per ettaro all'anno che finisce nel terreno.

La perdita di sostanza organica dovuta al diverso stoccaggio del letame aziendale nei tre sistemi si riflette anche nelle quantità di fertilizzante applicate. Rispetto a CONFYM, è stato impiegato il 12 % in meno di sostanza organica in BIOORG e il 17 % in meno in BIODYN. In particolare, il compostaggio del letame in BIODYN comporta una perdita di sostanza organica.

Al contrario, la quantità di liquame non è variata di molto. Il diverso sistema di stabulazione in BIOORG ha portato a una maggiore quantità di sostanza organica con le stesse quantità di nutrienti nel quarto PRC. In CONFYM, le quantità sono aumentate già nel terzo PRC.

Rotazione delle colture

La rotazione delle colture di sette anni con due anni di pausa per il terreno senza aratura sotto trifoglio è tipica delle aziende zootecniche in Svizzera. Le colture annuali sono i tuberi (barbabietole, mais, patate, cavoli), i cereali (grano, orzo) e la soia come leguminose da granella. Le colture intermedie vengono utilizzate come sovescio o come foraggio (la biomassa viene rimossa) (Tabella 2). La rotazione delle colture è un compromesso tra i diversi sistemi di coltivazione ed è stata leggermente adattata dopo ogni PRC.

Patate, grano invernale e trifoglio sono stati coltivati in ogni PRC. Nella fase iniziale della sperimentazione

parte della rotazione delle colture. Il cavolo bianco è stato sostituito dalla barbabietola già nel secondo PRC (1985) a causa dell'elevata intensità di lavoro. All'inizio del terzo PRC (1992), al posto dell'orzo è stato coltivato prato artificiale (trifoglio) per il terzo anno, poiché la rotazione delle colture orientata ai cereali ha portato al mal del piede in tutti i sistemi. Dal 1999 sono stati coltivati mais e soia e il prato artificiale è stato nuovamente coltivato per due anni. La posizione delle colture è stata poi leggermente modificata in ogni PRC fino al 2013. I motivi dei cambiamenti sono stati l'utilizzo ottimale dell'azoto nella rotazione delle colture e la comparsa di parassiti indipendenti dal sistema, in particolare la diabrotica nelle patate.

Tabella 2: Sviluppo della rotazione di sette colture dall'inizio della sperimentazione

Anno	1° PRC 1978–1984	2° PRC 1985–1991	3° PRC 1992–1998	4° PRC 1999–2005	5° PRC 2006–2012	6° PRC 2013–2019
1	Patata	Patata	Patata	Patata	Mais insilato	Mais insilato
	Sovescio	Sovescio	Sovescio			Sovescio
2	Grano invernale 1	Grano invernale 1	Grano invernale 1	Grano invernale 1	Grano invernale 2	Soia
	Foraggio intermedio	Foraggio intermedio	Foraggio intermedio	Sovescio	Sovescio	
3	Cavolo bianco	Barbabietola	Barbabietola	Soia	Soia	Grano invernale 1
				Sovescio	Sovescio	Sovescio
4	Grano invernale 2	Grano invernale 2	Grano invernale 2	Mais insilato	Patata	Patata
5	Orzo	Orzo	Trifoglio 1	Grano invernale 2	Grano invernale 2	Grano invernale 2
6	Trifoglio 1	Trifoglio 1	Trifoglio 2	Trifoglio 1	Trifoglio 1	Trifoglio 1
7	Trifoglio 2	Trifoglio 2	Trifoglio 3	Trifoglio 2	Trifoglio 2	Trifoglio 2

Il foraggio intermedio viene asportato, il sovescio rimane sul campo e viene lavorato.

Difesa fitosanitaria

Fino al 1992, nei sistemi convenzionali venivano impiegati pesticidi in gran parte secondo un programma di irrorazione. Con la terza rotazione delle colture è stata introdotta la produzione integrata (IP), in cui i pesticidi vengono applicati solo dopo il raggiungimento della soglia di danno economico. L'uso di pesticidi nei sistemi convenzionali era orientato alla legislazione vigente e alle raccomandazioni d'impiego.

Nei sistemi convenzionali sono stati impiegati in media 3 kg di sostanze attive per ettaro di terreno coltivabile all'anno (Figura 9). Fungicidi ed erbicidi rappresentavano la maggior parte degli stessi. Gli insetticidi venivano impiegati solo raramente e in piccole quantità. A partire dagli anni '80, le quantità di principi attivi applicati sono diminuite in modo significativo, anche grazie ai prodotti fitosanitari altamente efficaci con volumi di irrorazione molto bassi per applicazione. Nello stesso periodo, il numero di applicazioni di principi attivi è raddoppiato (Figura 10).

I biosistemi sfruttano le possibilità di controllo biologico dei parassiti e le misure di prevenzione di malattie. Nel sistema BIODYN, solo la tossina ottenuta biologicamente dal batterio *Bacillus thuringiensis*, viene utilizzata come insetticida contro il coleottero della patata.

Patate

Nella coltivazione delle patate, la peronospora tardiva (*Phytophthora infestans*) e il coleottero della patata (*Leptinotarsa decemlineata*) causano danni considerevoli. Nei sistemi convenzionali sono stati necessari in media 15 trattamenti con principi attivi all'anno con erbicidi, insetticidi e fungicidi, nel sistema biologico sette applicazioni di insetticidi e il fungicida rame, nel sistema biodinamico quattro trattamenti con preparati BT.

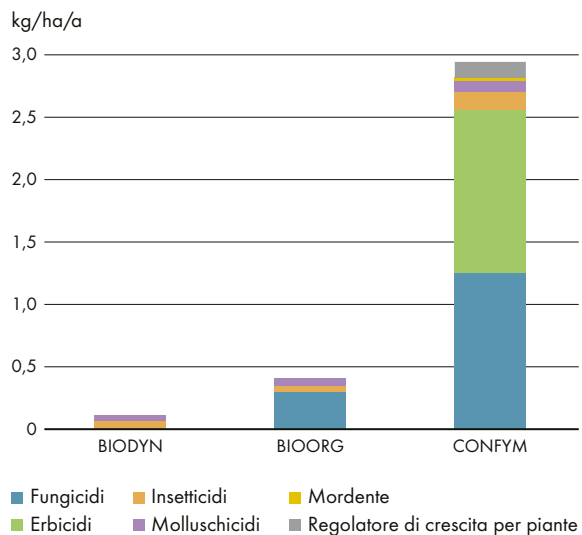
Cereali, mais e soia

I cereali convenzionali vengono trattati tre o quattro volte con erbicidi, fungicidi e un. Il mais e la soia in genere richiedono un solo trattamento erbicida e un nanizzante trattamento anti-lumache. La piralide del mais viene controllata con le vespe parassite *Trichogramma*.

Sementi

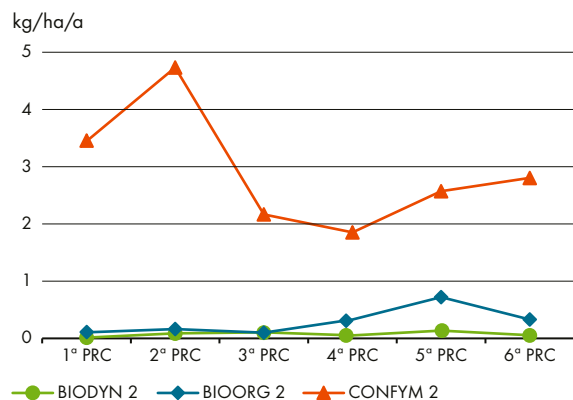
Su sementi e postime è stato applicato mordente nei sistemi convenzionali, ma non nei sistemi biologici. Dal 1998, le sementi dei sistemi biologici provengono da moltiplicazione biologica.

Figura 9: Quantità di principio attivo delle sostanze impiegate



Quantità medie di principio attivo applicate in tutti gli anni di sperimentazione in chilogrammi di sostanza attiva per ettaro all'anno. In CONMIN sono state impiegate le stesse quantità rispetto a CONFYM. Si noti che non sono stati applicati prodotti fitosanitari negli anni di coltivazione a trifoglio. Tuttavia, i valori medi includono anche gli anni di coltivazione a trifoglio.

Figura 10: Sviluppo temporale dei pesticidi impiegati



Quantità medie di principi attivi di tutti i prodotti fitosanitari utilizzati in un periodo di rotazione delle colture nei tre sistemi principali della sperimentazione DOK. Andamento in 6 periodi di rotazione delle colture. CONMIN ha visto l'impiego delle stesse quantità di CONFYM. Dati espressi in chilogrammi di principio attivo per ettaro all'anno.

Lavorazione del terreno

Per la lavorazione del terreno prima delle colture di tuberi e cereali viene impiegato l'aratro. All'inizio della sperimentazione, la profondità dell'aratura nei sistemi biologici era leggermente inferiore (15–20 cm) rispetto ai sistemi convenzionali (20–25 cm). A partire dalla terza coltura a rotazione, tutti i sistemi sono stati arati a una profondità unica di 20 cm. Nei sistemi biologici vengono impiegati più frequentemente metodi di lavorazione con zappe ed erpici, che lavorano il terreno in modo superficiale. Anche per patate e mais si impiega la zappatura nel sistema convenzionale.



In tutti i metodi di coltivazione, l'aratro è stato utilizzato prima della coltura di grano e tuberi.

Tabella 3: Caratteristiche dei sistemi di coltivazione DOK

Sistema di coltivazione	NOFERT	BIODYN		BIOORG		CONFYM		CONMIN
Unità di bestiame fertilizzante per ettaro	-	0,7	1,4	0,7	1,4	0,7	1,4	-
Fertilizzazione								
Letame aziendale	-	Compost di letame e liquame		Letame maturo e liquame rosso		Letame da lettiera e liquame		-
Fertilizzante minerale	-	Farina di roccia		Farina di roccia Potassio magnesiaco		Urea, nitrato di ammonio, nitrato di calcio e ammonio, triplo superfosfato, cloruro di potassio		
Difesa fitosanitaria								
Controllo delle erbe infestanti	Meccanico con erpicatura e zappatura					Meccanico e con erbicidi		
Malattie delle piante	-	Misure indirette		Misure indirette, preparati di rame per patate		Fungicidi		
Parassiti	Biocontrollo (<i>Bacillus thuringiensis</i>), estratti vegetali, misure preventive					Insetticidi, biocontrollo, pesticida per lumache e misure preventive		
Particolarità	Preparati biodinamici			-		Regolatori di crescita		

Resa delle colture

I grafici e le tabelle del seguente capitolo mostrano le rese medie di un periodo di rotazione delle colture con tre anni di resa e quattro repliche sul campo (n = 12).

Si noti che le rese sono indicate in termini assoluti di sostanza secca (SS) (100 % SS). Nella pratica agricola, le rese sono talvolta indicate insieme all'umidità residua. Per il grano l'86 % di SS e il 14 % di acqua e per la soia l'89 % di SS e l'11 % di acqua. Ciò significa che le rese del grano qui rappresentate devono essere moltiplicate per un fattore di 1,16 per essere comparabili con le rappresentazioni di resa nella prassi. Per la soia si applica un fattore di 1,12. Per il trifoglio anche nella prassi sono indicate le rese in SS, come di solito avviene per il mais insilato. Per le patate a fini commerciali si utilizzano rese in sostanza fresca.

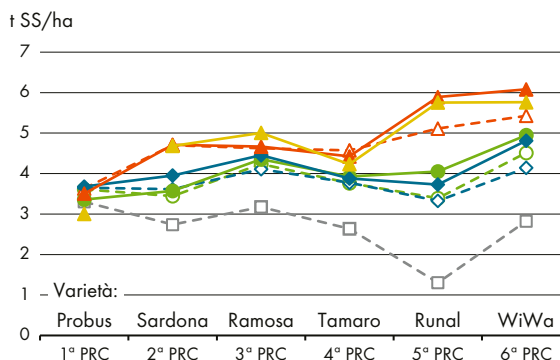
Grano invernale

Resa in grani

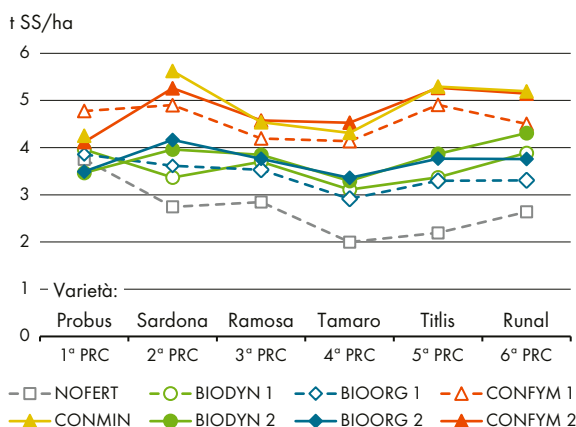
In tutta la sperimentazione sono state coltivate varietà di grano tenero con un'ottima qualità di panificazione. Nel primo PRC, tutti i sistemi hanno ottenuto rese simili e probabilmente hanno beneficiato delle pratiche di gestione precedenti. Nei sistemi convenzionali si sono verificati danni allo stoccaggio, motivo per cui la varietà Probus, a pianta lunga, non è stata in grado di utilizzare l'azoto somministrato per la produzione di resa. Gli appezzamenti su cui si applica il sistema CONMIN sono rimasti non fertilizzati nel primo PRC e hanno quindi presentato tali rendimenti insolitamente bassi. Dal 1985, il rendimento in grano invernale con i metodi biologici è risultato in media inferiore del 21 % rispetto al metodo convenzionale CONFYM. Di seguito, le differenze di resa vengono analizzate solo a partire dal secondo periodo di rotazione delle colture.

Figura 11: Andamento del rendimento in grani del grano invernale 1 e del grano invernale 2

Resa frumento invernale 1



Resa frumento invernale 2



Nel migliore dei casi, i rendimenti in grano convenzionali hanno raggiunto sei tonnellate di sostanza secca per ettaro. Ciò corrisponde al livello di resa tipico della regione della campagna di Basilea.

Tabella 4: Rese medie di grano invernale I e II (1985–2019)

	0,7 UBA				1,4 UBA			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t SS/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 %	

I due metodi biologici e i due metodi convenzionali differiscono solo leggermente nell'andamento del rispettivo rendimento (Figura 11). Con la coltivazione di varietà moderne è aumentato il rendimento di tutti i sistemi di coltivazione. Negli ultimi due periodi di rotazione delle colture, il rendimento è stato più alto nel sistema biodinamico rispetto al sistema biologico. Ciò potrebbe essere legato alla coltivazione della varietà Wiwa, che è stata coltivata biodinamicamente, oltre che alla struttura del suolo leggermente migliore e all'attività biologica maggiore in BIODYN rispetto a BIOORG. Anche il contenuto di Nmin in BIODYN è sempre leggermente più alto in primavera rispetto a BIOORG. È interessante notare che il metodo NOFERT non concimato produce comunque circa due tonnellate di resa in grani per ettaro.

Il grano invernale 1 ha una posizione più favorevole rispetto al grano invernale 2 nella rotazione delle colture. Nei primi quattro periodi di rotazione delle colture, ha beneficiato dell'effetto favorevole della coltura precedente delle patate con o senza sovescio. Anche la vicinanza al trifoglio probabilmente ha avuto un effetto positivo anche sulla resa di grano 1.

In media, il grano invernale 1 e il grano invernale 2 hanno avuto rese in grani rispettivamente inferiori del 18 % e del 23 % rispetto al sistema convenzionale. Questa piccola differenza potrebbe essere legata alla posizione nella rotazione delle colture. A partire dal 6° PRC, la varietà sopra citata (Wiwa) è stata utilizzata per il grano invernale 1. La varietà convenzionale Runal viene utilizzata per il grano invernale 2. Fino al 2015, le stesse varietà di grano sono state coltivate in entrambe le posizioni di rotazione.

Nei livelli di fertilizzazione ridotti, i rendimenti sono in media inferiori dell'8 % rispetto alla fertilizzazione standard. In tal senso, è degno di nota il fatto che, nonostante i livelli di fertilizzazione ridotti, si ottenga un rendimento maggiore nel si-



Mietitura e trebbiatura della zona marginale di un appezzamento di grano invernale. Solo l'area centrale dell'appezzamento viene utilizzata per determinare la resa esatta.

stema convenzionale CONFYM 1 rispetto ai sistemi biologici con fertilizzazione standard. Questo risultato è probabilmente dovuto anche alla maggiore efficacia della difesa fitosanitaria e ai fertilizzanti N direttamente disponibili per le piante nei sistemi convenzionali. Con una fertilizzazione ridotta, tuttavia, il contenuto di humus e quindi anche le riserve di azoto nel terreno diminuiscono (si veda il capitolo «Dinamica dei nutrienti»).

Resa in paglia

La resa della fieno è importante anche per l'allevamento di bestiame, poiché il fieno viene utilizzato per lo stame e ritorna ai campi sotto forma di letame. Sebbene nei sistemi convenzionali si utilizzino accorciatori di stelo (CCC o Moddus), la resa di fieno nei sistemi biologici è inferiore dell'8-10 % rispetto ai sistemi convenzionali. La riduzione di resa di fieno è inferiore a quella di grano.

Tabella 5: Rese medie di fieno di grano invernale I e II (1985–2019)

	0,7 UBA				1,4 UBA			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
† SS/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 %	

Fattori che influiscono sulle rese

Per il grano invernale, i fattori che influiscono sulle rese nei sistemi convenzionali sono risultati significativamente migliori rispetto ai sistemi biologici: Il numero di steli con spiga per m² era significativamente più alto in CONFYM 2 con 571 steli rispetto a BIOORG 2 con 383 steli. Il peso di mille chicchi in CONMIN era di 42 g rispetto ai 39 g in BIOORG 2.

Qualità del prodotto

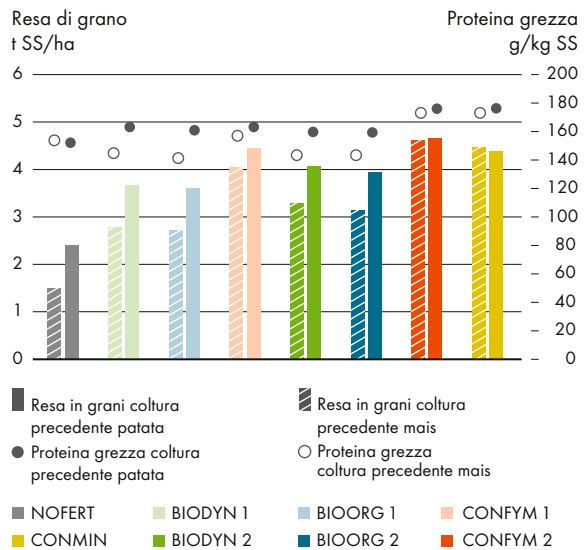
Parametri come il contenuto di minerali, carboidrati, proteine o acidi grassi sono caratteristiche importanti della qualità fisiologica nutrizionale del grano. Inoltre, sono prioritarie le caratteristiche di qualità tecnica, che influiscono ad esempio sulla qualità di cottura. La sperimentazione DOK ha analizzato se e come i sistemi di coltivazione influenzino i criteri di qualità.

Il contenuto di proteine grezze del grano convenzionale è risultato significativamente più alto (Figura 12). È interessante notare che la differenza tra il livello di fertilizzazione 1 e il livello di fertilizzazione 2 nei metodi biologici non ha comportato alcun miglioramento significativo nel contenuto di proteine grezze.

Al contrario, la coltura precedente di patate rispetto al mais insilato ha avuto un effetto significativamente maggiore sulla resa in grani e sul contenuto di proteine grezze nei metodi biologici. Al contrario, l'effetto della coltura precedente non è risultato rilevabile nei metodi convenzionali. Per il grano è stato impiegato N in modo più uniforme dopo la coltura precedente di patate durante l'intero sviluppo nei metodi biologici rispetto al mais, il che ha avuto un effetto anche sul contenuto di proteine grezze. Nel sistema CONFYM 1 con fertilizzazione ridotta sono state rilevati rendimenti in grani e contenuti di proteine grezze significativamente più elevati rispetto ai sistemi biologici con fertilizzazione standard (BIOORG 2, BIODYN 2).

Non sono stati riscontrati sostanziali effetti significativi legati al sistema sui micronutrienti, sul contenuto di aminoacidi e sulle caratteristiche di qualità di cottura. Lo stesso vale per i parametri metabolici come concentrazioni di elementi e zuccheri. Anche il potenziale antiossidante non differiva tra i sistemi.

Figura 12: Rese di grano invernale e contenuto di proteine grezze



Metodo DOK con colture precedenti di mais e patate. I dati mostrano i valori medi degli anni 2003 e 2010.



I diversi metodi non hanno alcun effetto su molte caratteristiche qualitative del grano.

Micotossine

Le micotossine svolgono un ruolo importante per la qualità del prodotto del grano. Si tratta dei tricoteeni che vengono prodotti dalle infezioni del grano da parte dei funghi *Fusarium* e possono essere dannosi per la salute umana e animale, anche in basse concentrazioni. Di una serie di micotossine analizzate sono state rilevati bassi livelli solo delle micotossine deossinivalenolo (DON) e nivalenolo (NIV) in tutti i sistemi di coltivazione, senza differenze legate al sistema. Il DON si forma più frequentemente ed è circa dieci volte meno tossico del NIV.

Patate

Sono state piantate patate da seme pre-germinate e, nei sistemi convenzionali sono state trattate per lo più contro i funghi. Dal 2006, le patate non sono più state coltivate dopo il trifoglio, ma dopo la soia o il grano invernale, e da allora hanno registrato una tendenza di rendimento positivo in tutti i sistemi.

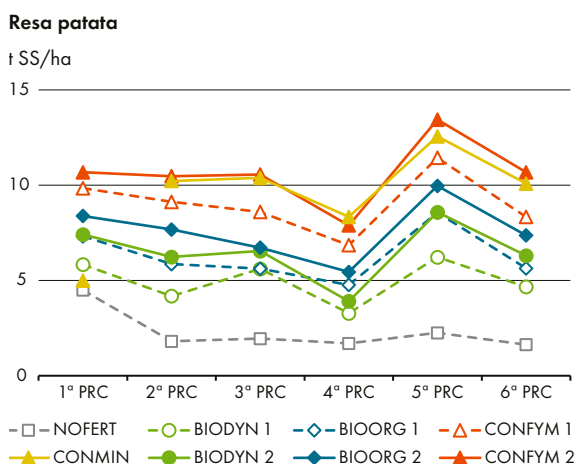
La resa dei tuberi di BIOORG 2 è risultata in media del 35 % e quella di BIODYN 2 addirittura del 42 % inferiore rispetto a CONFYM 2. Le patate nei metodi biologici mostrano spesso una carenza di potassio e azoto. Il periodo di vegetazione delle patate in BIODYN è inoltre ridotto, poiché in questo sistema non sono consentiti fungicidi e le piante vengono quindi attaccate prima dalla peronospora tardiva (*Phytophthora infestans*). Per proteggere i tuberi, il cespo viene solitamente tagliato relativamente presto. I trattamenti preventivi con prodotti contenenti rame (idrossido di rame, ossisolfato di rame, solfato di rame) consentono alla pianta una fase vegetativa leggermente più lunga in BIOORG rispetto a BIODYN, in cui non è consentito



Piante erbacee di patata accumulate nella sperimentazione DOK.

l'impiego di rame. La quantità di rame consentita nella coltivazione di patate in Svizzera è oggi di 4 kg per ettaro, una quantità significativamente inferiore rispetto alle quantità precedenti. Il rame nel terreno rappresenta una potenziale contaminazione permanente per i microrganismi e i molluschi, motivo per cui si stanno cercando delle alternative.

Figura 13: Andamento delle rese in tuberi



Nel sistema CONFYM 2, il 37 % della quantità di letame dell'intero PRC viene impiegato per le patate, nel BIOORG 2 solo il 25 % circa. L'apporto di sostanze nutritive con il letame può essere convertito solo parzialmente nel breve periodo di vegetazione dei sistemi biologici, motivo per cui i metodi convenzionali con fertilizzanti minerali risultano più ricchi di nutrienti.

Anche nel caso delle patate va evidenziato il sistema CONFYM 1, particolarmente efficiente e con una fertilizzazione ridotta, poiché anche in questo caso i rendimenti sono più elevati rispetto ai metodi biologici con concimazione consueta.

Nel terzo PRC, il rame non è stato utilizzato in BIOORG, quindi i rendimenti risultano dello stesso livello di BIODYN. Negli altri PRC, i rendimenti in BIOORG sono per lo più superiori rispetto a BIODYN. Ciò sottolinea l'importanza della difesa fitosanitaria in questa coltura molto sensibile.

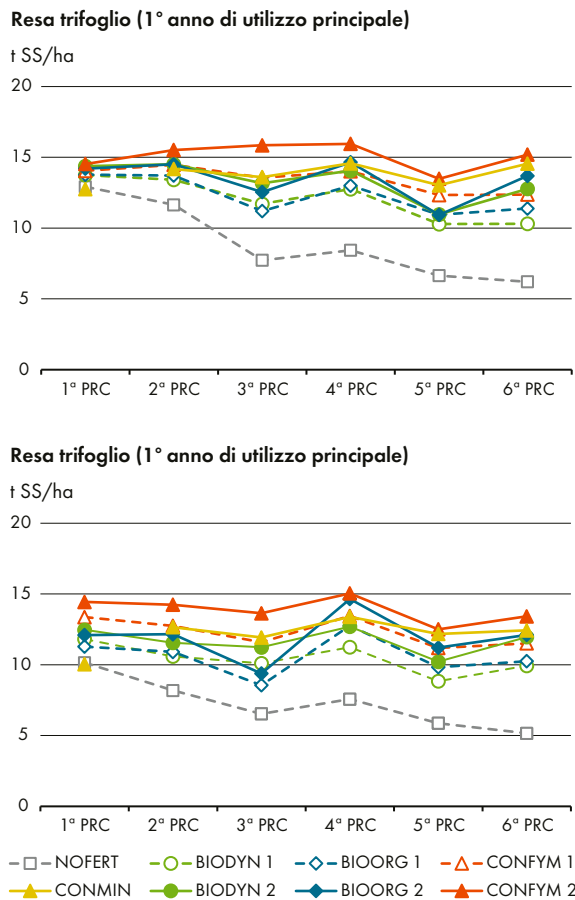
Tabella 6: Media dei rendimenti dei tuberi di patata in 15 anni di coltivazione (1985–2019)

	0,7 UBA				1,4 UBA			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t SS/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 %	

Sovescio con trifoglio

I rendimenti in sostanza secca del trifoglio sono il risultato delle rispettive somme di un massimo di cinque tagli all'anno per i due principali anni di utilizzo (Figura 14). I tagli di pulizia nell'anno di semina o all'inizio dell'anno non vengono presi in considerazione. Il trifoglio viene seminato a settembre e non viene arato fino alla terza primavera successiva alla semina, in modo che il terreno non venga arato per due anni e mezzo.

Figura 14: Andamento della resa del trifoglio



Andamento del rendimento del trifoglio nel primo e nel secondo anno di utilizzo principale, come somma di 4-5 tagli all'anno.



I mix di trifoglio di due anni costituiscono la base della rotazione di colture di sette anni nella sperimentazione DOK. Le graminacee predominano le coltivazioni convenzionali di trifoglio già dal secondo anno, mentre nei sistemi biologici il trifoglio di solito rimane più a lungo.

La differenza di rendimento tra sistema biologico e convenzionale è relativamente bassa nel primo anno di utilizzo principale a parità di livello di fertilizzazione, con un risultato del 10-11 %. CONFYM 2 ha registrato il rendimento medio più alto. I due sistemi biologici con fertilizzazione ridotta hanno registrato un rendimento inferiore del 19 %, mentre il sistema non fertilizzato del 40 % rispetto a CONFYM 2 (Tabella 7).

Nel secondo anno di utilizzo principale, i rendimenti di tutti i sistemi erano in media inferiori del 12 % rispetto al primo anno. Le differenze di rendimento relativamente ridotte tra i sistemi di coltivazione biologici e convenzionali possono essere ricondotte al trifoglio presente nel mix, che fissa una quantità maggiore di azoto dall'aria attraverso i batteri dei tubercoli nei sistemi biologici. Anche il lungo periodo di crescita del trifoglio e il radicamento intensivo nel terreno di questi mix svolgono un ruolo importante. La capacità di fissazione del trifoglio nel mix è risultata compresa tra 178 e 300 kg di N per ettaro all'anno. Inoltre, le radici di trifoglio erano ben colonizzate da funghi micorrizici. I funghi micorrizici aiutano ad assorbire i nutrienti.

Tabella 7: Valore medio di rendimento del trifoglio in 30 anni per metodo

	0,7 UBA				1,4 UBA			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t SS/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

Il mais è stato introdotto nella sperimentazione DOK nel quarto periodo di rotazione delle colture, perché stava assumendo un ruolo sempre più importante nella pratica agricola come fonte di foraggio grezzo per il bestiame.

Fino a 20 tonnellate di sostanza secca per ettaro, la resa del mais è chiaramente superiore a quella del prato artificiale (Figura 15), ma è meno versatile come fonte di foraggio.

Con una fertilizzazione standard, le rese di mais dei metodi biologici sono risultate dell'11 e del 15% più basse rispetto a CONFYM 2. Con una fertilizzazione ridotta, la differenza rispetto a CONFYM 1 risultava ancora del 10%. Nelle aree non fertilizzate NOFERT ne è cresciuta solo la metà. La bassa riduzione della resa del mais nei sistemi biologici rispetto a quelli convenzionali può essere spiegata dal fatto che il mais ha una lunga stagione di crescita e può assorbire l'azoto mineralizzato dalle riserve nel terreno e dal concime fino all'autunno. Fino a questo

momento, anche l'incidenza di malattie e parassiti nel mais è stata ridotta. La piralide del mais viene controllata in tutti i sistemi con le vespe parassite *Trichogramma*.

Figura 15: Andamento della resa del mais insilato

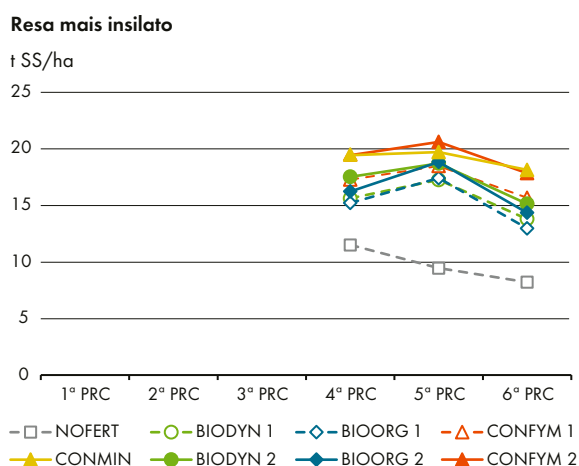


Tabella 8: Valore medio dei rendimenti di mais in 9 anni per metodo

	0,7 UBA				1,4 UBA			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t SS/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 %	



Il mais insilato negli appezzamenti della sperimentazione viene raccolto a fine estate.

Soia

Come il mais, la soia è stata introdotta nel quarto periodo di rotazione delle colture. I progressi hanno reso possibile la coltivazione di varietà tolleranti al freddo nelle regioni climatiche più settentrionali. Inoltre, la soia è richiesta sia per il consumo umano che come mangime per animali. Grazie alla simbiosi con il *Bradyrhizobium japonicum*, la soia è ampiamente autosufficiente per quanto riguarda l'azoto, motivo per cui si presta bene anche alla rotazione di colture biologiche. Il batterio deve essere aggiunto al momento della semina, poiché non è presente naturalmente nel terreno svizzero. L'apporto di azoto non è quindi un fattore limitante per la soia, a differenza delle altre colture a rotazione. Inoltre, la pressione esercitata da parassiti e malattie per la soia è comunque ridotta.

Favorita da questi fattori, la soia raggiunge le stesse rese sia nei sistemi biologici che in quelli convenzionali (Figura 16). Non si è fatto ricorso a fertilizzazione con azoto in nessuno dei metodi. Tutti i metodi di coltivazione con fertilizzazione standard presentano rese simili, mentre con una fertilizzazione ridotta il metodo CONFYM 1 ottiene rese leggermente migliori rispetto ai due metodi biologici con livello di fertilizzazione 1 (Tabella 9). Ciò è indice del fatto che il fosforo e il potassio sono elementi che limitano la crescita con la fertilizzazione ridotta. Un buon apporto di P è essenziale per una fissazione biologica ottimale di N.



Pianta di soia in fiore.

Figura 16: Andamento della resa in grani della soia

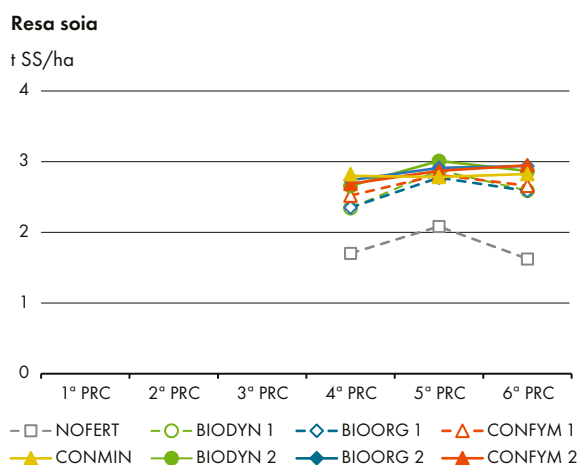


Tabella 9: Valore medio delle rese di soia di 9 anni per metodo

	0,7 UBA				1,4 UBA			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t SS/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%	

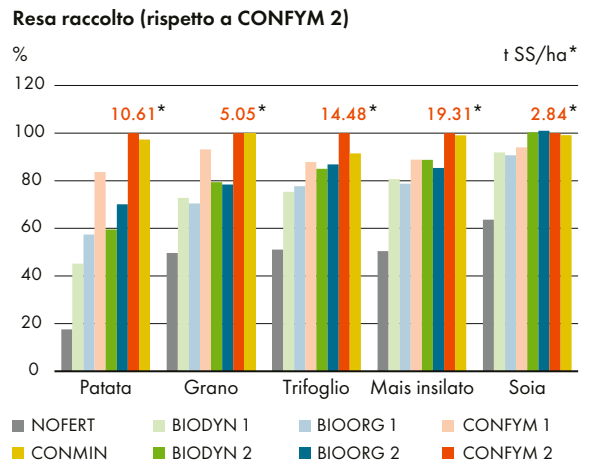


Ogni anno vengono coltivate tre colture nella sperimentazione DOK; nel 2023 queste erano mais, patate e soia.

Confronto tra le colture

Il confronto tra le rese in Figura 17 mostra chiaramente la diversa sensibilità delle colture in base al metodo di coltivazione. Risulta abbastanza indifferente il fattore biologico/non biologico nella soia, contrariamente alle patate. Oltre alla limitazione dovuta ad azoto e potassio, le malattie e i parassiti svolgono un ruolo fondamentale nella resa delle patate, mentre la soia, essendo una coltura di recente introduzione nel nostro clima, non presenta quasi nessun problema in tal senso. Rendimenti più bassi con un livello di fertilizzazione ridotto, anche nelle leguminose, dimostrano che con 0,7 UBA/ha nei metodi biologici, l'apporto di P e K diviene scarso anche in un terreno fertile, poiché non si utilizzano o si utilizzano pochi fertilizzanti supplementari. Nel lungo periodo, i metodi biologici dipendono quindi dai fertilizzanti minerali o organici consentiti reperibili in commercio, oppure ricorrono a fertilizzanti di riciclaggio come compost verde, residui di fermentazione solidi o liquidi.

Figura 17: Rendimento medio di tutte le colture principali



Resa media rispetto al metodo CONFYM 2 dal secondo al sesto PRC, mais e soia solo dal quarto al sesto.

In breve: Resa delle colture

Rispetto ai sistemi convenzionali, i sistemi biologici hanno registrato rendimenti inferiori parallelamente al minor impiego di nutrienti e prodotti fitosanitari. La soia è indipendente dall'apporto di azoto dal terreno e rappresenta un'eccezione: I rendimenti sono risultati uguali. La riduzione della resa nei sistemi biologici è risultata solo scarsa nel trifoglio e molto elevata per le patate. È interessante notare che con metà intensità di fertilizzazione, le rese erano più elevate nel sistema convenzionale CONFYM rispetto ai sistemi biologici con fertilizzazione standard. Ciò è indice dell'effetto che hanno la difesa fitosanitaria e nutrienti facilmente solubili sulle rese, soprattutto nel caso di patate e grano. Coltura precedente, sovesci e obiettivi di coltivazione adattati all'agricoltura biologica possono aumentare ulteriormente il potenziale di resa dell'agricoltura biologica.

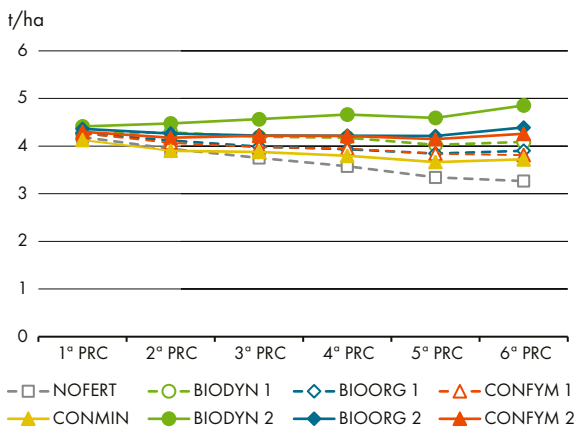
Dinamica dei nutrienti

Azoto

La maggior parte dell'azoto nel suolo è presente in forma organica. L'azoto minerale è molto importante per la nutrizione delle piante, essendo direttamente disponibile. La media di contenuto nel suolo di N_{totale} tra tutti i metodi nei primi 20 cm è risultata pari a 1,6 g per kg di suolo. Nello strato di terreno compreso tra 30 e 50 cm di profondità, il contenuto di N_{totale} risultava essere pari solo alla metà.

Il rapporto C/N di sostanza organica nel suolo non è cambiato quasi per tutto il periodo della sperimentazione DOK. Il valore medio è rimasto costante a $9 \pm 0,11$ senza essere influenzato dal metodo.

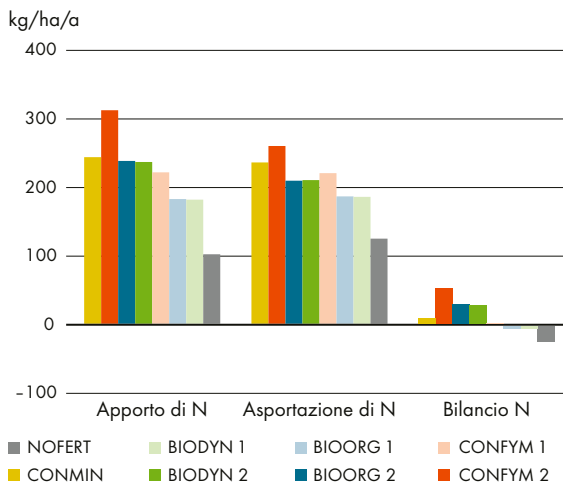
Figura 18: Riserva totale di azoto nel suolo



Riserva di N nei primi 20 cm del suolo. Valore medio delle misurazioni durante ciascun periodo di rotazione delle colture. I dati sono stati calcolati a partire dal contenuto N_{totale}, tenendo conto della densità di immagazzinamento nel terreno, misurata nel primo PRC.

Sono state misurate tra 3,2 e 4,9 tonnellate di riserve N per ettaro a una profondità del suolo compresa tra 0 e 20 cm. Nella sperimentazione BIODYN 2, la riserva di N è aumentata di 9 kg all'anno (Figura 18). Nei metodi BIOORG 2 e CONFYM 2, le scorte di N di questo strato di suolo sono rimaste costanti nel tempo. In tutti gli altri metodi, le scorte di N sono diminuite fino a 20 kg all'anno nel controllo non fertilizzato. I risultati dimostrano che la riserva di N nel suolo non poteva essere mantenuta nei metodi a concimazione ridotta. Ciò significa che l'utilizzo dell'azoto in questi metodi non è sostenibile.

Figura 19: Apporti e bilancio dell'azoto



Il bilancio dell'azoto con apporto di fertilizzanti, depositi, sementi e fissazione di azoto dall'atmosfera, nonché asportazione dovuta al raccolto. Valore medio di cinque periodi di rotazione delle colture tra il 1985 e il 2019.

I bilanci della superficie del suolo sono stati calcolati per il periodo dal 1985 al 2019. Questi mettono a confronto l'apporto e la privazione di N dovuta al raccolto. Le variabili di apporto di azoto sono:

- Fertilizzazione
- Fissazione simbiotica di N₂
- Deposito di N
- N nelle sementi

Nei metodi a fertilizzazione standard, il bilancio tra apporto e asportazione risultava positivo e variava da un surplus di 23 kg (BIODYN 2 e BIOORG 2) a 46 kg (CONFYM 2) di azoto per ettaro annuo (Figura 19). Nel sistema CONMIN, fertilizzato esclusivamente con minerali, il bilancio era equilibrato. I sistemi a fertilizzazione ridotta presentavano deficit annui compresi tra 5 e 10 kg di azoto per ettaro. Nel sistema NOFERT non fertilizzato, il deficit era di 31 kg per ettaro annuo (Tabella 10).

Perdite di azoto dovute a dilavamento

I bilanci negativi dell'azoto con fertilizzazione ridotta e senza fertilizzazione dimostrano che viene rilasciato più azoto dalla sostanza organica del suolo di quanto ne venga reintegrato. Tuttavia, le scorte di N sono aumentate meno di quanto ci si sarebbe aspettato sulla base dei bilanci di N con la consueta fertilizzazione. In CONFYM 1 e CONMIN, invece, le riserve di N sono diminuite più di quanto ci si sarebbe aspettato sulla base dei bilanci negativi.

Tali scostamenti sono riconducibili al fatto che le perdite di ammoniaca durante lo spargimento, le perdite da denitrificazione o il dilavamento dei nitrati non vengono presi in considerazione nel bilancio della superficie del suolo. La somma di tali perdite ammonta a 12–47 kg per ettaro annuo in caso di fertilizzazione standard.

Le variazioni delle scorte di N negli strati più profondi del suolo sono state analizzate solo successivamente: Nel 2019 e nel 2020 sono stati prelevati campioni di terra da 30 fino a 50 cm di profondità. I depositi di N calcolati per questo strato hanno mostrato differenze significativamente inferiori tra i sistemi rispetto a una profondità del suolo compresa tra 0 e 20 cm. L'effetto della mancata fertilizzazione era evidente solo in NOFERT a una profondità di 30–50 cm.

Efficiente utilizzo dell'azoto

L'efficienza di utilizzo dell'azoto (NUE) può essere ricavata anche dal bilancio della superficie del suolo: questo fornisce un'indicazione di quanto l'azoto apportato venga assorbito dalle piante. Un NUE

superiore al 100 % significa che viene privato più N di quello apportato e quindi suggerisce che l'N viene rilasciato dalla sostanza organica del suolo (humus). Per i metodi con fertilizzazione standard e CONMIN, il NUE era compreso tra l'85 % e il 100 % (Tabella 10). Il NUE si riferisce alla totalità di apporto di N, tuttavia indica che sia il letame che i fertilizzanti minerali e l'azoto fissato biologicamente sono stati utilizzati in modo efficiente nella sperimentazione DOK.

Legame con l'azoto atmosferico

Le leguminose entrano in simbiosi con le rizobie: Nei tubercoli visibili sulle radici, i batteri convertono l'azoto atmosferico molecolare (N₂) in ammonio, che la pianta può utilizzare per formare proteine. La fissazione simbiotica di N₂ è stata la principale fonte di N in tutti i sistemi, tranne nei metodi CONFYM 2 e CONMIN con fertilizzazione minerale. I metodi con fertilizzazione ridotta hanno mostrato prestazioni di fissazione simili a quelle con fertilizzazione standard. In CONMIN, invece, le prestazioni di fissazione risultavano significativamente inferiori. Per lo più, l'azoto è stato fissato dal trifoglio nei prati artificiali, seguito dai semi di soia e dalle colture intercalari.

La fissazione dell'azoto da parte delle rizobie richiede un buon apporto di fosforo, potassio e oligoelementi nel terreno. Nel metodo senza fertilizzazione, la fissazione di N₂ è diminuita nel tempo, molto probabilmente a causa del calo nei livelli di fosforo e potassio disponibili per le piante in questi terreni.

Tabella 10: Apporto e privazione di azoto nei metodi DOK.

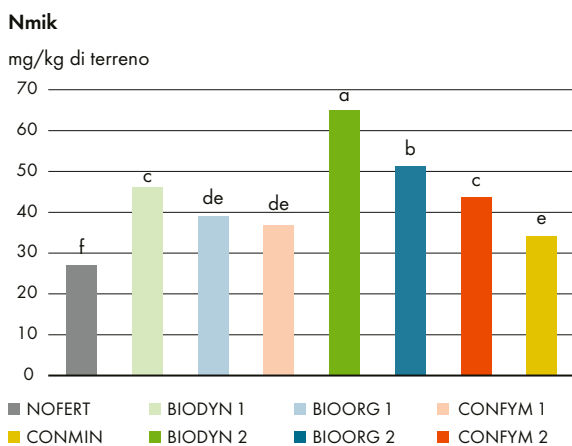
Valore medio dei cinque periodi di rotazione delle colture tra il 1985 e il 2019.

Dati in kg/ha/a	Fertilizzante	Fissazione simbiotica	Deposizione e sementi	Asportazioni	Bilancio	Variazione delle riserve nel suolo	Efficienza di utilizzo
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 %

Azoto da microbi

I microrganismi del suolo possono accumulare molto azoto nella propria biomassa (Nmik). Il grafico Figura 20 mostra il contenuto di Nmik nel suolo. Tenendo conto del volume del suolo e della relativa densità di immagazzinamento, i metodi BIODYN 2 consentono di ottenere fino a 150 kg di Nmik per ettaro. L'azoto contenuto nei microrganismi funge da riserva temporanea di azoto nel suolo, che viene rilasciato nuovamente dopo la morte dei microrganismi, ad esempio a causa di gelo o inaridimento, con sufficiente umidità del suolo, e torna a disposizione delle piante.

Figura 20: Biomassa microbica



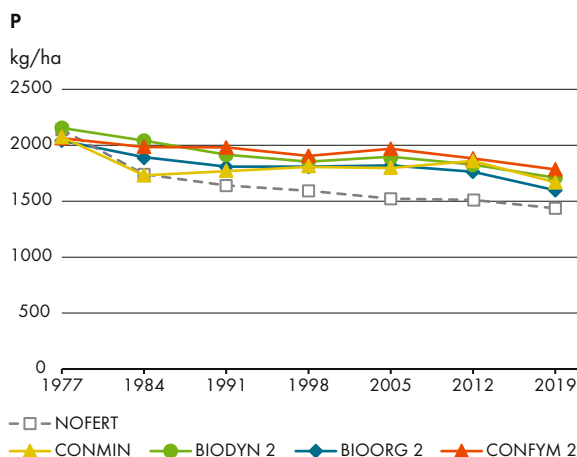
Azoto legato microbicamente negli otto metodi della sperimentazione DOK. Valore medio delle analisi di tutti gli appezzamenti nella primavera del 1998, 2006, 2012 e 2019.

Le misurazioni ripetute della biomassa microbica alla fine degli ultimi quattro periodi di rotazione delle colture rivelano una quantità significativamente maggiore di azoto legato microbicamente nel metodo BIODYN 2 rispetto a BIOORG 2, in modo ancora più evidente rispetto a CONFYM 2. Il metodo CONMIN ha mostrato valori simili a quelli dei metodi a fertilizzazione ridotta. Il metodo NOFERT ha registrato i livelli più bassi di Nmik.

Fosforo

Prima della sperimentazione DOK nel 1977 sono state analizzate le riserve di fosforo di ogni appezzamento in fase C: allora, le riserve di P nei primi 20 cm del terreno erano pari a circa 2100 kg/ha (Figura 21). Il terreno era quindi ben rifornito di P.

Figura 21: Riserva totale di fosforo fino a 20 cm



La riserva di fosforo (P) nello strato di terreno da 0 a 20 cm di profondità nel corso di sei periodi di rotazione delle colture con coltivazione differenziata in fase C (n = 4).



Il letame viene sparso manualmente sugli appezzamenti DOK.

Da allora, è stata osservata una tendenza alla diminuzione in tutti i sistemi di coltivazione, mentre la riserva in CONMIN (dopo la sua introduzione nel 1984; precedentemente NOFERT) sono rimaste relativamente costanti. La diminuzione delle riserve di P in NOFERT ammontava a quasi il 20 %, mentre i metodi biologici registrava in media riserve di P inferiori del 5 % rispetto a CONFYM 2.

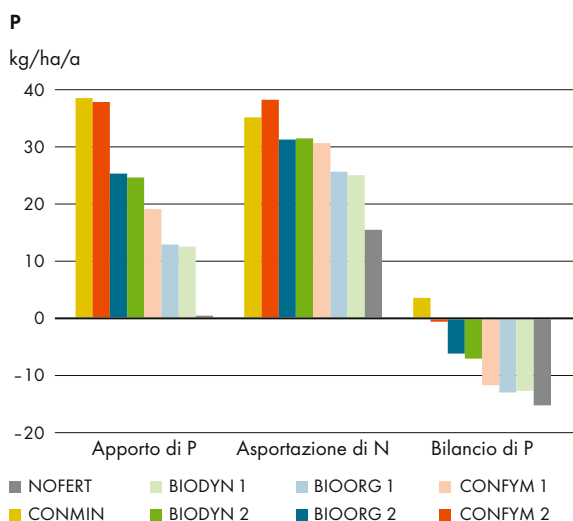
Bilancio del fosforo

Il bilancio del fosforo tiene conto dell'apporto mediante fertilizzanti e sementi e della privazione dovuta al raccolto (Figura 22). Nel metodo CONFYM 2, l'apporto medio era di 40 kg di P per ettaro annuo. Nei metodi BIODYN 2 e BIOORG 2 era di circa il 38 % inferiore, con 25–26 kg di P per ettaro annuo. Il rapporto tra i metodi a fertilizzazione ridotta sono simili, ma a un livello inferiore.

Con 32 kg, l'asporto di P dovuto al raccolto risultava inferiore solo del 16 % nei metodi biologici con concimazione standard rispetto a CONFYM 2 con 38 kg di P per ettaro annuo. Ciò indica che il P proveniente dalla fertilizzazione viene utilizzato in modo più efficiente nei sistemi biologici. Allo stesso tempo, però, si assiste a un continuo esaurimento delle scorte di P nel suolo di tutti i sistemi, a eccezione di CONMIN.

A causa della bassa solubilità del fosforo, le colture del primo PRC hanno beneficiato in particolare delle elevate riserve di P iniziali. Allo stesso tempo, già all'inizio della sperimentazione DOK è stato possibile individuare differenze nella disponibilità di P specifiche di sistema (Figura 23).

Figura 22: Carico e bilancio del fosforo



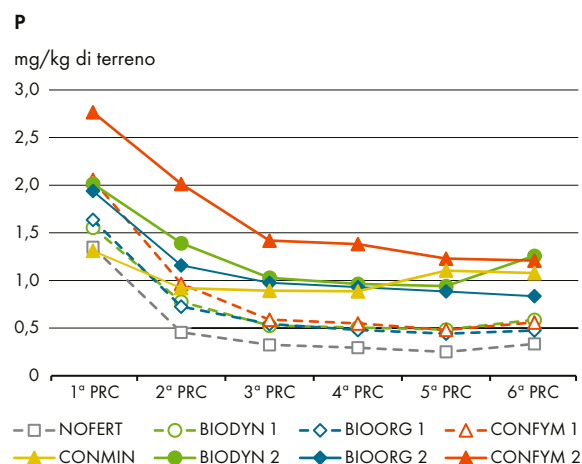
Bilancio del fosforo derivante dall'apporto mediante fertilizzazione e asportazione dovuta al raccolto. Valore medio dei cinque periodi di rotazione delle colture tra il 1985 e il 2019.

Il metodo di coltivazione CONFYM 2 presenta una disponibilità di P più elevata rispetto a BIODYN 2 e BIOORG 2 grazie alla fertilizzazione con fertilizzanti minerali facilmente reperibili. In base alle attuali raccomandazioni di fertilizzazione del GRUD,

«sufficiente» fosforo era ancora disponibile nei metodi di coltivazione CONFYM 2 e BIODYN 2 dopo 42 anni (Figura 23).

Tuttavia, il metodo di coltivazione BIOORG 2 e tutti i metodi a fertilizzazione ridotta presentavano già una disponibilità «moderata» al massimo a partire dal quarto PRC. Nella pratica agricola, un'eventuale riduzione della resa viene solitamente compensata da una fertilizzazione aggiuntiva. Le cause del calo nel contenuto di fosforo solubile sono i bilanci negativi di P, la rapida fissazione e il dilavamento negli strati più profondi del suolo.

Figura 23: Fosforo solubile



Contenuto di fosforo solubile del suolo in campioni di terreno dopo il raccolto. Valori medi da indagini annuali (1978–2006, 2008–2010) e biennali (2010–2018) per appezzamento, metodo CO₂.

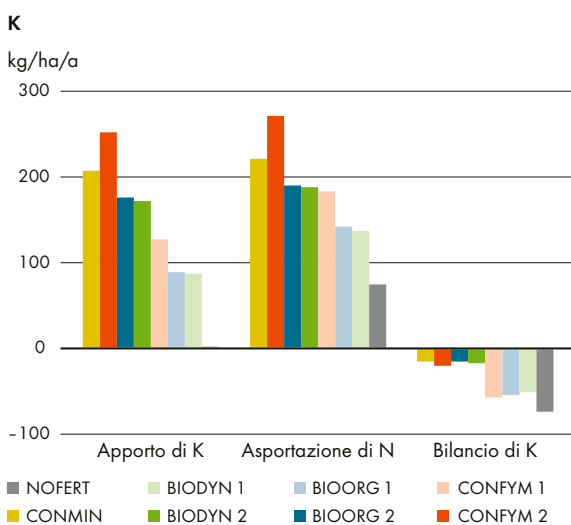


A causa del clima freddo dopo la semina, i sintomi di carenza di P risultavano visibili nei metodi biologici a fertilizzazione ridotta del mais.

Potassio

Il bilancio di potassio è determinato anche dalla differenza tra apporto mediante fertilizzazione e sementi e privazione dovuta al raccolto. Il metodo di coltivazione CONFYM 2 ha registrato il maggior apporto di K con 251 kg di K per ettaro annuo. L'asporto è stato superiore all'apporto in tutti i metodi di coltivazione, determinando un bilancio negativo in tutti i metodi Figura 24.

Figura 24: Carico e bilancio di potassio

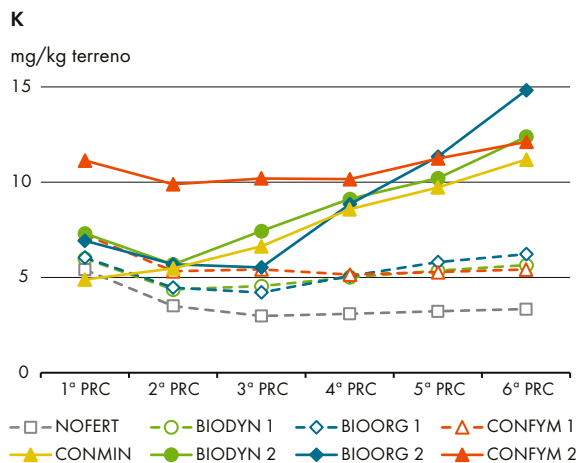


Bilancio del potassio derivante dall'apporto mediante fertilizzazione e asportazione dovuta al raccolto. Valore medio dei cinque periodi di rotazione delle colture tra il 1985 e il 2019.

La disponibilità di potassio mostra una chiara differenziazione tra i sistemi di coltivazione e i livelli di fertilizzazione (Figura 25). L'aumento della disponibilità di K è sorprendente in tutti i metodi di coltivazione a fertilizzazione standard e nel metodo CONMIN, in cui la fertilizzazione è stata dosata con precisione a partire dagli anni '90. Durante questo periodo, la disponibilità di potassio nei metodi biologici è aumentata notevolmente in alcuni casi, tuttavia l'asportazione non è aumentata nella stessa misura.

Tuttavia, tutti i sistemi di coltivazione attualmente sono classificabili nella classe di apporto «moderato». Nella pratica agricola si consiglia di aumentare la fertilizzazione a base di K. Il metodo di controllo NOFERT non fertilizzato fa parte della classe di apporto «scarsa» dalla metà degli anni '80. Diversi studi hanno dimostrato che il metodo NOFERT limita la crescita delle piante a causa della ridotta disponibilità di potassio.

Figura 25: Potassio solubile



Contenuto di potassio solubile. Valori medi di indagini annuali (1978-2006, 2008-2010) e biennali (2010-2018) per appezzamento, metodo CO₂.

Apporto di nutrienti attraverso radici e trasferimento di azoto

L'apporto di carbonio e azoto attraverso le radici è la fonte principale per il mantenimento e la formazione di sostanza organica nel suolo (OBS). L'apporto attraverso le radici consiste nelle radici e nelle sostanze rilasciate dalle radici nel terreno durante la crescita della pianta. Queste sostanze, chiamate rizodeposizione, includono sostanze come essudati radicali solubili e mucillagini (strato di mucillagine sulla superficie delle radici), ma anche cellule radicali staccate, peli radicali e radici fini, che vengono rapidamente scomposte dai microrganismi nel terreno. La somma di questi apporti viene definita quale apporto di carbonio e azoto sottoterra.

Apporti di carbonio

I modelli scientifici che stimano l'apporto di carbonio (C) nel suolo e che costituiscono la base dei rapporti internazionali sul clima hanno finora ipotizzato che l'apporto di C nel sottosuolo sia proporzionale alla biomassa in superficie: Maggiore è la resa di una coltura, maggiore è la quantità di C apportata sottoterra. Al contrario, questo significherebbe che nei sistemi di coltivazione convenzionali viene introdotto più C nel suolo rispetto ai sistemi biologici. I risultati della sperimentazione DOK hanno smentito questa ipotesi per il grano invernale e il mais.

Dimostrano che gli apporti sotto terra sono in gran parte indipendenti dalla produzione di biomassa in superficie e che i sistemi biologici presentano tendenzialmente addirittura apporti di C sotto terra leggermente superiori nonostante le rese inferiori. La percentuale di apporto di C sottoterra nell'assimilazione totale di C era compresa tra il 18 e il 26 %. La rizodposizione era di fondamentale importanza per l'apporto di C sottoterra e a sua volta rappresentava il 57–63 % dell'apporto di C sottoterra nel mais e il 54–58 % nel grano invernale (Figura 26).

Trasferimento di azoto nel prato di trifoglio

Gli apporti di C e N sono ugualmente fondamentali per il mantenimento o la formazione di OBS. Nella sperimentazione DOK, il rapporto C/N di OBS è risultato relativamente costante e pari a circa nove. Ciò significa che a lungo termine è necessario un apporto di circa 0,11 kg di N per kg di C. Si tratta di un valore relativamente buono, che significa che è disponibile una quantità sufficiente di N per le colture.

L'esempio del prato di trifoglio nel DOK mostra come le radici sotterranee del trifoglio influenzino la fissazione biologica di N₂ dell'intero mix. Nel trifoglio, a differenza del mais e del grano, gli apporti di N sottoterra sono proporzionali all'assimilazione di N in superficie. Si nota che nel primo anno di utilizzo, l'azoto legato nelle radici e la rizodposizione di azoto aumentano durante il periodo di vegetazione. Nel secondo anno di utilizzo, l'azoto legato alle radici diminuisce di nuovo, ma l'apporto attraverso la rizodposizione aumenta in modo significativo. Ciò indica un ricambio radicale molto elevato, dovuto allo sfalcio e all'invecchiamento del trifoglio.

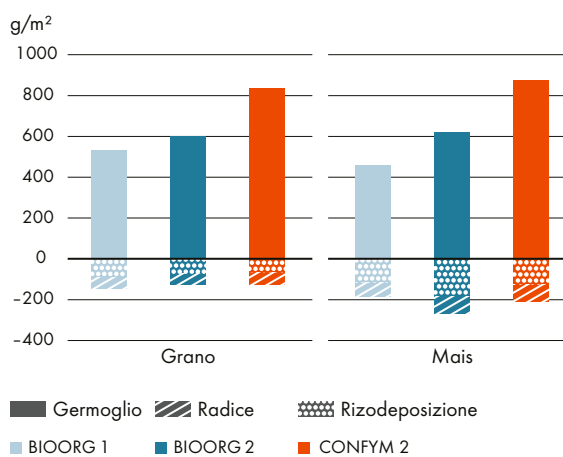
I metodi DOK differivano in modo significativo in termini di assimilazione dell'azoto, ma la percentuale di azoto sottoterra risultava sempre costante e pari a circa il 29 % dell'azoto totale. La percentuale di rizodposizione dell'azoto sottoterra è aumentata

da circa il 35 % al 75 % dalla fine del primo anno di utilizzo principale alla fine del secondo anno di utilizzo principale.

La parte erbacea del trifoglio ha beneficiato direttamente degli apporti di N attraverso la rizodposizione del trifoglio. Due studi DOK indipendenti hanno dimostrato che, nei sistemi biologici, circa il 40 % dell'azoto assorbito dall'erba proviene dal trifoglio e quindi prevalentemente dalla fissazione biologica di N₂.

Gli apporti di N sottoterra e del trasferimento di N dal trifoglio all'erba hanno un effetto significativo sulla stima della quantità di N fissata nei prati di trifoglio. Questa, infatti risulta significativamente più bassa se si prende in considerazione solo la crescita superficiale. In BIOORG 2 2007, ad esempio, è stata rilevata una quantità di azoto atmosferico fisso 1,8 volte superiore rispetto ai metodi di stima convenzionali.

Figura 26: Distribuzione degli assimilati in germogli, radici e rizodposizione di grano e mais



Confronto tra i metodi BIOORG 1, BIOORG 2 e CONFYM 2.

In breve: Dinamica dei nutrienti

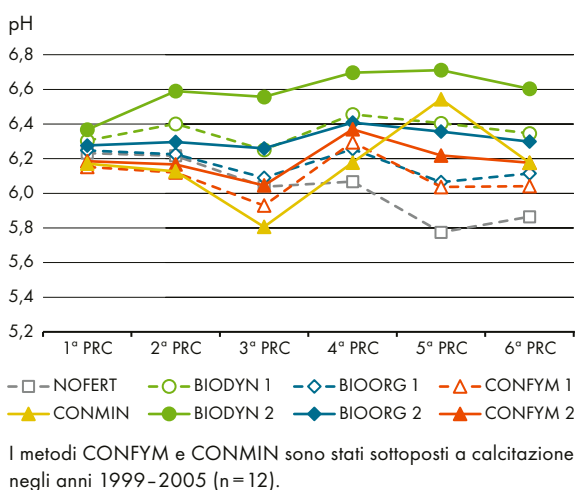
Le riserve di azoto nei primi 20 cm di profondità sono aumentate, analogamente alle riserve di carbonio organico, esclusivamente in BIODYN 2. In BIOORG 2 e CONFYM 2 le riserve erano costanti. La mancata o ridotta applicazione di letame aziendale ha portato a una diminuzione delle riserve di azoto. La fissazione dell'azoto atmosferico attraverso la simbiosi delle leguminose con i rizobi costituiva una percentuale molto elevata dell'apporto totale di azoto in tutti i sistemi, ma nei sistemi senza letame aziendale risultava decisamente ridotta (CONMIN e NOFERT). Le riserve di fosforo sono diminuite in tutti i sistemi, maggiormente nei sistemi biologici rispetto a quelli convenzionali a causa della limitata fertilizzazione. Finora, fatta eccezione per NOFERT, i sintomi di carenza sono stati rari, il che indica un utilizzo efficiente del fosforo nei sistemi biologici. L'apporto di potassio presenta un bilancio negativo in tutti i sistemi, tuttavia, la disponibilità di potassio mostra una tendenza positiva negli ultimi tre periodi di rotazione delle colture.

Qualità del suolo

Valore del pH

Nei sistemi biologici, il valore del pH del suolo è rimasto a un livello stabile compreso tra 6,6 e 6,3 per tutta la durata della sperimentazione. Nel corso dei primi 25 anni, il valore del pH nei sistemi convenzionali è sceso al di sotto di 6, considerato critico per questo tipo di suolo secondo il GRUD. Questo andamento è dovuto all'effetto acidificante dei fertilizzanti minerali.

Figura 27:
Andamento della reazione del suolo



Mantenere un valore del pH superiore a 6 è importante per la nutrizione delle piante, l'attività biologica e la struttura del terreno. Per aumentare nuovamente il valore del pH nei metodi convenzionali, i terreni sono stati sottoposti a calcitazione all'inizio del quarto PRC nel 1999, con cinque tonnellate di CaO equivalenti per ettaro e fertilizzati con nitrato ammoniacale di calcio a effetto basico (anche detto calcicianaamide). La riuscita di questa misura si rivela nell'aumento del pH nei sistemi convenzionali (Figura 27). CONMIN è stato sottoposto a ulteriore calcitazione, perché il valore del pH era ancora inferiore a quello di CONFYM. Tuttavia, la tendenza all'acidificazione sembra continuare anche dopo la calcitazione.

Struttura del terreno

Aggregati del terreno

Gli aggregati del terreno si formano per accumulo di particelle di argilla minerale e particelle organiche. Vengono stabilizzati dagli organismi del suolo con ife e biofilm. Ciò si traduce in strutture relativamente solide che non si dissolvono in acqua. La densità degli aggregati è un indicatore della stabilità strutturale del suolo.

Un terreno con aggregati più stabili all'acqua è più sbriciolato, meno fangoso e più protetto dall'erosione grazie a una migliore infiltrazione dell'acqua. Consente una migliore aerazione e un migliore apporto di ossigeno alle radici. Il terreno di löss relativamente debole dal punto di vista strutturale della sperimentazione DOK tende a essere fangoso. I terreni dei metodi biologici sono meno tendenti a essere fangosi.

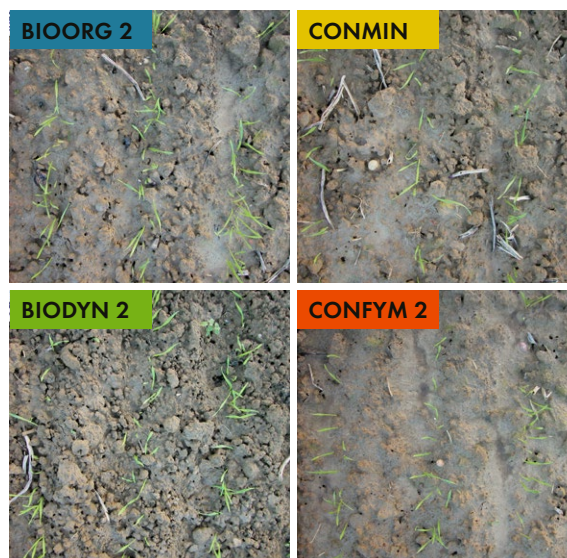
È interessante notare che la stabilità degli aggregati mostra una forte stagionalità (Tabella 11). Soprattutto in estate, con un terreno secco, la stabilità degli aggregati nel terreno di löss risultava scarsa in tutti i metodi. I due sistemi biologici presentavano comunque la percentuale maggiore di aggregati stabili. Questo potrebbe essere dovuto alla presenza di un maggior numero di microrganismi e di humus nel BIODYN, che favorisce la formazione di aggregati. Le differenze erano minori in primavera. In condizioni umide, le ife fungine e i biofilm dei batteri restano efficaci come «adesivi».

Tabella 11: Percentuale di aggregati stabili all'acqua nei terreni della sperimentazione DOK

	Percentuale di aggregati stabili	Significatività
BIODYN 2	50,1 %	a
BIOORG 2	44,2 %	ab
CONFYM 2	38,4 %	b
CONMIN	38,4 %	b
Media complessiva tra tutti i metodi		
Marzo 2000	55,3 %	a
Marzo 2003	48,2 %	b
Luglio 2003	24,8 %	c

Densità di immagazzinamento

La densità di immagazzinamento del terreno nella sperimentazione DOK è elevata, in quanto il terreno di löss è composto principalmente da particelle di limo più sottili. Grazie al metodo biologico, ad esempio con l'aiuto di lombrichi e radici sottili, questo terreno può comunque formare un sistema poroso sottile e grossolano. Può essere temporaneamente ammorbidito mediante lavorazione del terreno. A causa dell'influenza della rotazione delle colture e della lavorazione del terreno, la densità di immagazzinamento cambia nel corso di un periodo di vegetazione. Le densità di immagazzinamento differiscono di poco tra i sistemi di coltivazione, anche se una variazione di oltre un decimo può essere rilevante per questo parametro. In definitiva, a causa del materiale di partenza, il terreno rimane povero di pori grossolani, tende ai ristagni di acqua e si riscalda lentamente.



La stabilità degli aggregati influisce sulla tendenza alla formazione di fango nel terreno.

Tabella 12: Densità di immagazzinamento nei terreni della sperimentazione DOK in kg/dm³

Livello	Densità di immagazzinamento 1° PRC	SD	Densità di immagazzinamento 3° PRC	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
Valore medio	1,32		1,22	

Carbonio nel suolo

A livello globale, i terreni accumulano più carbonio rispetto alla biomassa vegetale della terra e dell'anidride carbonica (CO₂) dell'atmosfera messe insieme. Per questo motivo, svolgono un ruolo importante nella discussione sul cambiamento climatico, in quanto i terreni coltivabili, spesso poveri di humus, presentano un elevato potenziale di formazione di humus e quindi di assorbimento di CO₂ dall'atmosfera.

Carbonio organico

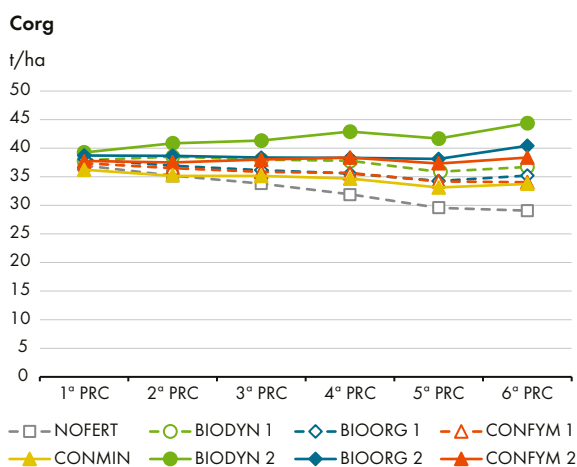
La sostanza organica del suolo (humus) si forma dai residui di biomassa vegetale e animale che sono stati convertiti nel suolo. In media, è compo-

sta per il 58 % da C. Per quantificare l'OBS, di solito si misura il contenuto di carbonio organico (Corg) (OBS = 1,725 × Corg). L'OBS è l'indicatore del terreno più comunemente utilizzato per analizzarne la qualità per la coltivazione.

Nella sperimentazione DOK, campioni di terreno sono stati prelevati e archiviati ogni anno dopo il raccolto a una profondità di 0–20 cm. La maggior parte di questi campioni, durante l'intero periodo di sperimentazione, è stata analizzata in modo uniforme dopo la fine del sesto PRC. In tal modo è stato possibile escludere fattori di influenza, come l'avvicendamento del personale di laboratorio, nuove attrezzature e metodi, nonché presentare l'effettivo sviluppo. Le nuove analisi hanno dato i seguenti risultati: il carbo-

nio organico (Corg) risulta chiaramente elevatissimo nel metodo BIODYN 2 (Figura 28). Inoltre, è stata confermata statisticamente una tendenza positiva in questo metodo. Nei metodi BIOORG 2 e CONFYM 2, i contenuti sono rimasti costanti, non è stato possibile rilevare statisticamente il leggero aumento. Il contenuto di Corg è diminuito in tutti i metodi a fertilizzazione ridotta e in CONMIN. Come atteso, il calo più significativo è stato registrato in NOFERT.

Figura 28: Riserva di carbonio nel suolo



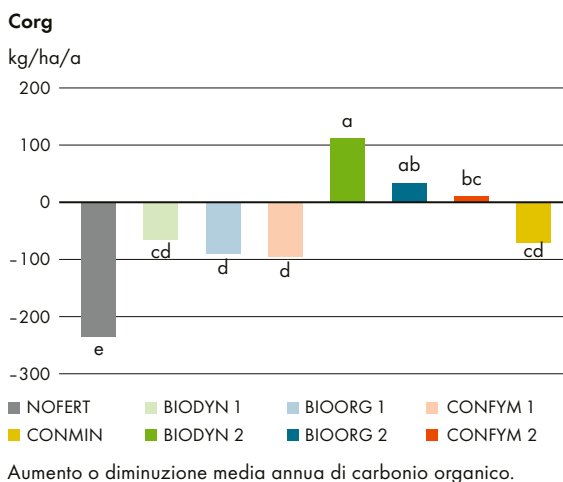
Riserva di carbonio nei primi 20 cm di profondità del suolo degli otto metodi di coltivazione (n=12). Questi dati sono stati calcolati a partire dal contenuto di Corg e dalla densità di immagazzinamento del terreno nel primo PRC. La conversione da Corg a OBS è stata effettuata moltiplicando per un fattore di 1,725 (OBS = 1,725 × Corg).

Variazioni delle riserve di carbonio

La riserva di carbonio si riferisce alla quantità di carbonio presente nel suolo di una determinata area. Per la sperimentazione DOK è stato calcolato per lo strato più superficiale del suolo a una profondità di 20 cm per ettaro (Figura 28). Il calcolo si basa sulla densità di immagazzinamento misurata nel primo PFP, quando questa variabile non era ancora stata influenzata dai metodi di coltivazione.

Tra il primo e il sesto PRC si è registrato un aumento significativo delle riserve di Corg del 12 % in BIODYN 2 e riserve costanti in BIOORG 2 e CONFYM 2. I metodi a fertilizzazione ridotta hanno perso dal 4 % (BIODYN 1) al 9 % (BIOORG 1, CONFYM 1 e CONMIN) in questo confronto. Il metodo non fertilizzato NOFERT ha perso il 22 % rispetto alle riserve di carbonio del primo PRC.

Figura 29: Variazione delle riserve di carbonio nel suolo

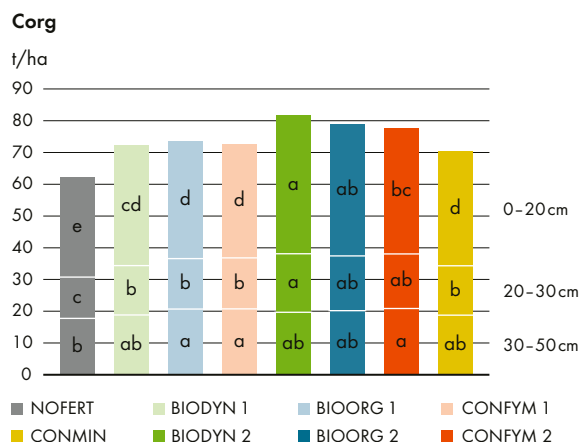


I tassi medi di crescita o perdita annui possono essere ricavati dalla dinamica temporale delle riserve di carbonio (Figura 29). Solo nei metodi di coltivazione con fertilizzazione standard è stato possibile aumentare o mantenere le riserve di Corg. Tutti i metodi a fertilizzazione ridotta e CONMIN hanno registrato perdite fino a 100 kg/ha anno. Per NOFERT, le perdite ammontavano a 234 kg di Corg all'anno.

Le differenze tra i metodi per quanto riguarda Corg risultavano più pronunciate nello strato più superficiale del terreno da 0 a 20 cm di profondità. In questo strato si trova la massa radicale principale e si mescolano letame, sovesci e residui del raccolto. Qui avvengono i processi di conversione più intensi di materia organica del suolo. Possono essere stimolati dalla lavorazione del terreno, ma anche da fertilizzanti minerali e dagli essudati radicali. Un'altra parte di Corg viene immagazzinata negli strati più profondi del suolo. Il contenuto di Corg diminuisce con la profondità, perché viene apportata meno sostanza organica fresca attraverso le radici o il letame aziendale. Più aumenta la profondità, minore è l'influenza del metodo, che risulta rilevabile solo a una profondità di 30–50 cm nel metodo NOFERT.

Nel 2019/20 il metodo BIODYN 2 ha registrato la riserva più alta di Corg con 81 t/ha (0-50 cm). In BIOORG 2 questa era pari a 80,25 e in CONFYM 2 a 78,9 t/ha. CONMIN, invece, presentava quasi nove tonnellate di Corg meno rispetto a CONFYM 2. In questi due metodi è stata applicata la fertilizzazione standard e la quantità di residui del raccolto prodotti era simile, quindi la differenza di nove tonnellate può essere interpretata come l'effetto della fertilizzazione organica in 35 anni (senza fertilizzazione in CONMIN per i primi sette anni).

Figura 30: Riserva di carbonio organico



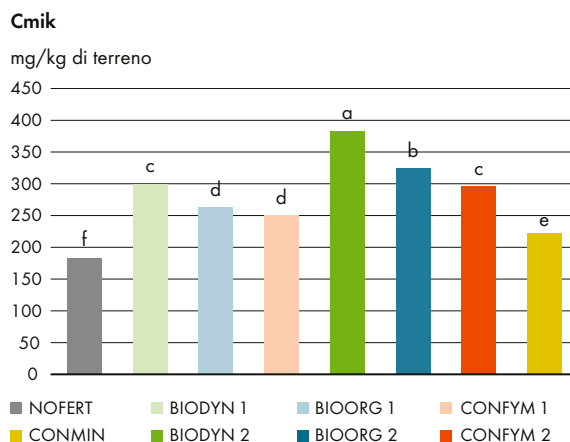
Riserva di carbonio negli strati del suolo fino a 50 cm di profondità dopo 42 anni di coltivazione differenziata. Le differenze tra i metodi si riducono all'aumentare della profondità. Campioni del 2019 dopo il grano invernale e con trifoglio e 2020 dopo il grano invernale; n=12.

In sintesi, risulta che solo i metodi a fertilizzazione standard sono riusciti a mantenere il Corg (contenuto di humus) nel terreno e che il compostaggio di letame in BIODYN 2 ha addirittura determinato l'aumento di humus nel corso di 42 anni. Nonostante le rese elevate, il sistema convenzionale CONMIN fertilizzato con minerali ha perso Corg, aspetto notevole considerando il fatto che nei prati di trifoglio aumentano humus e colture intermedie. Tuttavia, anche i metodi con livello di fertilizzazione 1 hanno perso Corg col tempo. La ridotta lavorazione del terreno e l'impiego di compost da sovescio sono misure integrative per la formazione di humus.

Biomassa microbica

La biomassa microbica è costituita da organismi microscopici presenti nel terreno, tra cui batteri, archei, microalghe e alcuni funghi. È la parte vivente della sostanza organica nel terreno. Il carbonio microbico costituisce dall'1% al 3% del carbonio nel terreno. Nel presente dossier, la biomassa microbica è indicata come carbonio legato microbicamente (Cmik) (Figura 31) e nel capitolo «Dinamica dei nutrienti» come azoto microbico (Nmik) (Figura 20).

Figura 31: Biomassa microbica



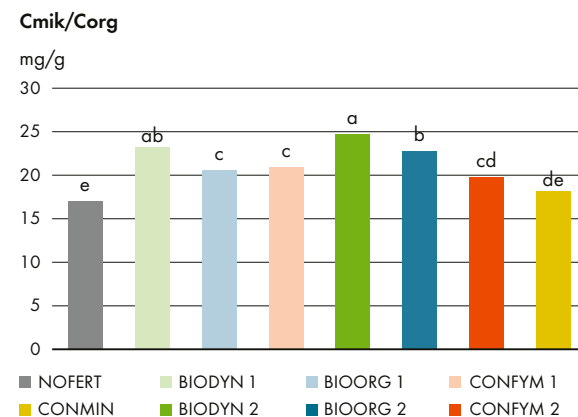
Carbonio legato microbicamente negli otto metodi della sperimentazione DOK. Valore medio delle analisi di tutti gli appezzamenti nella primavera 1998, 2006, 2012 e 2019.

Il sistema BIODYN presentava la biomassa microbica più elevata in entrambe le fasi di fertilizzazione. CONMIN e NOFERT, invece, presentavano livelli di biomassa microbica più bassi.

Rapporto tra Cmik e Corg

Il rapporto tra carbonio microbico (Cmik) e organico viene utilizzato come indicatore della qualità di sostanza organica. Tale quoziente indica quanto siano buone le condizioni per la crescita microbica nel terreno ed è anche un indicatore precoce di aumento del contenuto di humus dopo un cambio di cultura (Figura 32).

Figura 32: Rapporto Cmik/Corg

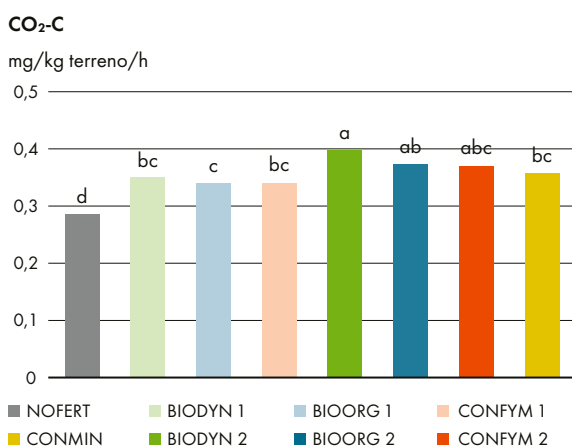


Proporzione tra Cmik e Corg. Questo quoziente indica quanto il terreno con un elevato contenuto di sostanza organica sia idoneo come habitat per i microrganismi.

Respirazione del suolo

I microrganismi del terreno si nutrono di materia organica morta e la decompongono in componenti minerali e CO₂. Questo processo è di fondamentale importanza per il ciclo dei nutrienti. Insieme alla biomassa microbica, la respirazione del terreno costituisce uno dei parametri più significativi del terreno. Si definisce respirazione basale quando viene determinata in condizioni standardizzate in laboratorio. Lo sviluppo di CO₂ è un indicatore dell'attività di organismi del suolo, che dipende anche dalla quantità di fonti di C prontamente disponibili Figura 33.

Figura 33: Respirazione del suolo

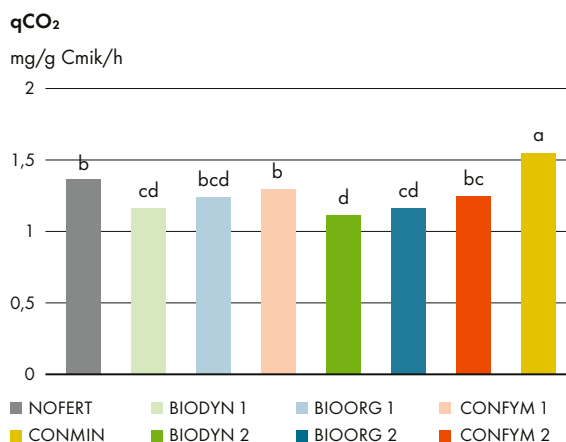


Respirazione basale nei terreni della sperimentazione DOK. Dati derivanti dall'analisi di campioni di terreno del 2019. Un valore elevato indica un'elevata attività degli organismi del suolo.

Quoziente metabolico

La quantità di CO₂ necessaria ai microrganismi nel terreno per mantenere la propria biomassa è indice di quanto siano buone le proprie condizioni di vita. Il parametro corrispondente è il quoziente metabolico qCO₂. Più i microrganismi respirano, più energia consumano per mantenere il proprio metabolismo. Un valore basso indica che i microrganismi convertono in modo efficiente l'energia disponibile.

Figura 34: Quoziente metabolico



Quoziente metabolico per CO₂ nei terreni della sperimentazione DOK. Dati derivanti dall'analisi di campioni di terreno del 2019.

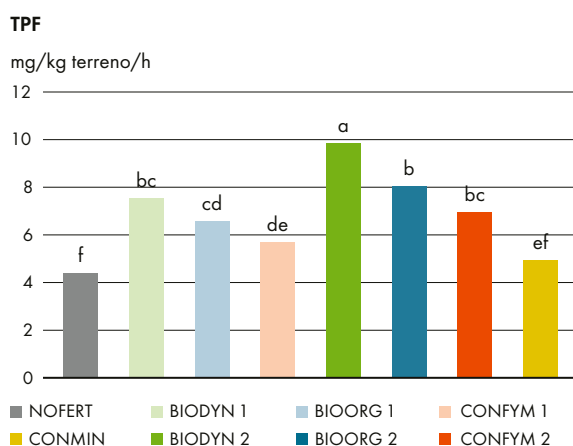
Nonostante l'elevata respirazione basale Figura 33, la popolazione microbica del terreno in BIODYN converte l'energia disponibile in modo più efficace. Consuma il 16 % di energia in meno per unità di biomassa per il proprio fabbisogno di mantenimento rispetto alla popolazione microbica in CONFYM Figura 34. Il metodo CONMIN presenta il quoziente metabolico più elevato. Ciò significa che i microrganismi trovano le migliori condizioni di vita nel sistema BIODYN e sono più stressati in CONMIN.

Enzimi del terreno

Deidrogenasi

Gli enzimi del gruppo delle deidrogenasi svolgono un ruolo importante nel metabolismo energetico dei microrganismi. Sono attivi all'interno della cellula e fungono da indicatore della sua attività metabolica.

Figura 35: Attività della deidrogenasi



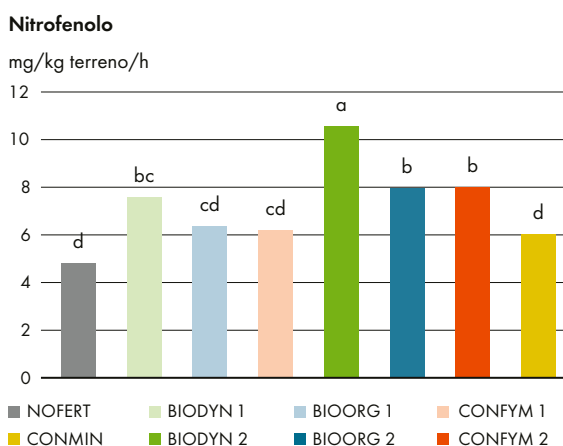
Attività della deidrogenasi nei terreni della sperimentazione DOK. Dati derivanti dall'analisi di campioni di terreno 2016. Maggiore è il valore, più enzimi deidrogenasi sono attivi nel terreno.

L'elevata attività della deidrogenasi nei metodi BIODYN indica che nel terreno sono presenti molti più microrganismi rispetto ai terreni degli altri metodi. Tuttavia, può anche significare che l'attività per unità di microrganismi è maggiore.

Fosfatasi

Gli enzimi del tipo fosfatasi sono secreti dalle piante e dai microrganismi per scomporre i composti organici del fosforo. Poiché la concentrazione di P disciolto nell'acqua del suolo è molto bassa, la scomposizione enzimatica dei composti organici di P può contribuire al nutrimento delle piante.

Figura 36: Attività della fosfomonoesterasi alcalina



Attività della fosfomonoesterasi alcalina nell'esperimento DOK. Dati provenienti dall'analisi dei campioni di terreno 2019. Maggiore è il valore, più enzimi fosfatasi sono attivi nel terreno.

L'attività della fosfatasi dipende fortemente dai sistemi di coltivazione. L'elevata attività delle fosfatasi nel sistema BIODYN mostra un elevato potenziale di scomposizione dei composti organici del fosforo, rendendo il P rilasciato disponibile per le piante.

In breve: Qualità del suolo

Dopo 20 anni di coltivazione convenzionale, il valore del pH dei terreni era sceso a tal punto da dover essere corretto mediante calcitazione. I terreni dei sistemi biologici hanno mostrato una minore tendenza alla formazione di fango e una migliore stabilità strutturale rispetto ai sistemi convenzionali. Nei sistemi a fertilizzazione standard e letame aziendale, il contenuto e le riserve di carbonio organico erano costanti. Senza fertilizzante organico o con fertilizzazione ridotta, i terreni hanno perso carbonio organico. Con l'applicazione di compost di letame, il metodo BIODYN 2 ha raggiunto contenuti di carbonio organico significativamente più elevati rispetto a tutti gli altri metodi. La biomassa microbica, la sua attività ed efficienza sono risultate significativamente più elevate nei sistemi biologici rispetto a quelli convenzionali. Tutti gli indicatori di fertilità del suolo hanno mostrato valori migliori nei sistemi biologici e soprattutto nel sistema BIODYN. La fertilità del suolo di BIODYN con fertilizzazione ridotta ha raggiunto o superato quella di CONFYM con fertilizzazione standard.

Biodiversità

In diverse aree, l'attività umana ed economica hanno causato il superamento dei limiti del nostro pianeta. Questo vale in particolare per la perdita di biodiversità.

La sperimentazione DOK, con i suoi appezzamenti di 100 m², consente solo di fare supposizioni sulla frequenza e l'attività delle specie presenti in quest'area. A seconda delle dimensioni e della mobilità degli organismi, essi hanno un raggio d'azione maggiore rispetto alle dimensioni di un singolo appezzamento.

Per questo un aspetto centrale della sperimentazione DOK sono lombrichi, microrganismi e vegetazione infestante. Tuttavia, sorprendentemente, grandi effetti del metodo hanno riguardato anche organismi che vivono principalmente sul terreno (artropodi epigei), sebbene questi organismi possano percorrere considerevoli distanze al giorno.

Quando si analizza la flora vegetale dei campi, ci si può aspettare anche un'influenza sulle cellule vicine, a causa della dispersione dei semi.

Flora vegetale dei campi

La popolazione della flora vegetale è cambiata in seguito alla specifica coltivazione dei metodi DOK. Ogni coltura ha la sua particolare flora vegetale e ogni stagione porta in primo piano piante diverse sul campo. L'analisi della riserva nei semi rappresenta quindi un metodo interessante che fornisce informazioni sulla crescita di erbe da seme in periodi di tempo prolungati.

Tabella 13: Numero di semi e numero di specie vegetali

	Riserva di semi			
	Specie		Semi/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 %

La flora infestante svolge compiti importanti nell'ecosistema: offre rifugio e cibo agli organismi benefici, protegge il terreno dall'infangamento e dall'erosione e serve anche ad assorbire l'azoto mineralizzato dopo il raccolto, proteggendolo così dal dilavamento. Inoltre, i suoi essudati radicali e le radici rilasciano anche composti di carbonio nel terreno.



Papavero comune negli appezzamenti di grano invernale della sperimentazione DOK.

Le erbe infestanti costituiscono una componente importante della biodiversità nei paesaggi agricoli spesso monotoni, e importanti ospiti intermedi per associazioni simbiotiche tra funghi e radici (micorrizza).

Tuttavia, le loro elevate riserve di semi rappresentano anche un rischio considerevole di infestazione delle colture. Nell'ambito della rotazione delle colture, che reprime molte erbacce con due anni di trifoglio, la zappa e l'erpice sono stati in grado di limitare la concorrenza della flora infestante nei sistemi biologici. La soia rappresenta un'eccezione: anche in questo caso, le erbacce vengono regolarmente estirpate a mano negli appezzamenti biologici (circa 25 h/ha).

Grazie alla rinuncia agli erbicidi e a colture meno dense, sono state riscontrate più specie negli appezzamenti biologici rispetto a quelli convenzionali. In termini di numero di semi germinabili per unità di superficie, gli appezzamenti biologici presentano da due a tre volte più semi nel terreno rispetto agli appezzamenti convenzionali. Ciò significa che nei sistemi biologici si è formata una riserva di semi da monitorare.

Pedofauna

Lombrichi

Sono gli animali più noti tra gli invertebrati che vivono nel suolo. L'habitat delle specie che scavano in profondità si estende fino a circa un metro di profondità nei terreni profondi di löss della sperimentazione DOK. Qui si trovano delle tane in cui il verme si ritira quando la superficie diventa troppo secca o troppo fredda.

I lombrichi possono essere suddivisi in gruppi ecologici in base al loro habitat preferito:

- Le specie epigee vivono sotto la superficie del suolo, dove si nutrono principalmente di feci animali e materiale vegetale morto. Sono di colore scuro per proteggersi dai raggi UV.
- Le specie endogee vivono nella parte superiore del terreno minerale. Sono di colore chiaro e quasi trasparenti, poiché raramente salgono in superficie.
- Le forme anoiche scavano in verticale e cercano anche strati di terreno più profondi, a partire da un metro. Queste specie favoriscono il mescolamento del terreno minerale con l'humus e assorbono i residui vegetali e il letame nel terreno.



Il rilevamento di lombrichi mediante cernita manuale o estrazione richiede molto tempo e, a causa della loro attività, è opportuno solo in primavera o in autunno.

La biomassa dei lombrichi nella sperimentazione DOK è dominata da specie anoiche, che sono relativamente grandi e quindi, in termini di numero, inferiori rispetto alle specie endogee relativamente piccole.

La metodologia di raccolta dei dati, che prevede l'estrazione, la cernita manuale e l'identificazione degli animali, è molto complessa. Inoltre, ciò causa forti interferenze negli appezzamenti DOK. Pertanto, tali indagini sono state possibili solo per alcuni metodi di coltivazione. La dinamica dei lombrichi è vasta sia nel corso dell'anno che della giornata e dipende fortemente dall'umidità e dalla temperatura.

Tabella 14: Numero e biomassa di lombrichi negli appezzamenti DOK tra il 1990 e il 1991, 2001 e 2005

	Lombrichi 1990, 1991				Lombrichi 2001-2005			
	Numero (ind./m ²)		Biomassa (g/m ²)		Numero (ind./m ²)		Biomassa (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 %

Gli studi sui lombrichi condotti nel 2001-2005 con un metodo semplificato, meno efficace nel rilevare i lombrichi anecici, sono stati effettuati dopo la fase di rotazione di 3 anni del foraggio trifogliato. Gli studi del 2024 confermano i dati del 1990-1991, utilizzando la stessa metodologia in 2 anni di foraggio trifogliato: un numero significativamente maggiore di lombrichi nei suoli biologici rispetto a quelli convenzionali.

Fino al 1998, nei sistemi convenzionali si impiegavano ancora pesticidi molto tossici per i lombrichi (carbendazim, dinoseb, metiocarb). I primi studi mostrano quindi un numero e una biomassa di lombrichi significativamente inferiori in tali metodi. Il passaggio alla produzione integrata con l'inizio della terza rotazione di colture e la fine dell'utilizzo

di molti dei vecchi prodotti altamente tossici è la motivazione più probabile della ripresa delle popolazioni di lombrichi in CONFYM e CONMIN. D'altra parte, la calcitazione tra il 1999 e il 2005 e il passaggio ai fertilizzanti azotati basici potrebbero aver avuto anche un effetto positivo sull'habitat dei lombrichi.

Carabidi e stafilinidi

Le famiglie di carabidi e stafilinidi appartengono alla famiglia dei coleotteri. Molte delle loro specie non sono ancora state studiate in dettaglio. Il livello di conoscenza dell'autoecologia dei carabidi è maggiore rispetto a quello degli stafilinidi. La densità di attività di questi animali viene determinata mediante l'uso di trappole che catturano gli insetti vivi nel terreno di campo. Poiché gli insetti sono molto mobili, non possono essere attribuiti direttamente a una piccola area. Tuttavia, la frequenza con cui visitano un appezzamento è facilmente stimabile in base al numero di insetti catturati.



I coleotteri voraci Carabus mangiano fino a 2,5 volte il proprio peso al giorno.

Tabella 15: Frequenza di carabidi e stafilinidi negli appezzamenti di grano invernale

	Individui di carabidi					Individui di stafilinidi						
	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

In media, nel corso degli anni, la densità di questi due gruppi di insetti negli appezzamenti biologici è circa il doppio rispetto agli appezzamenti convenzionali. I carabidi, che amano il calore e la siccità, e quelli che si nutrono principalmente di semi sono stati trovati più frequentemente nelle coltivazioni biologiche. Questi coleotteri predatori sono importanti nel campo per controllare parassiti come gli afidi. Sono già attivi quando le coccinelle sono ancora meno efficaci nel controllo dei parassiti a temperature più basse in primavera.

Tabella 16: Densità di ragni in individui per m²

	Ragni da ragnatela		Ragni predatori	
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

I biosistemi presentano una densità di ragni significativamente più elevata. I ragni predatori sono quasi due volte più frequenti negli appezzamenti a coltivazione biologica rispetto a quelli a coltivazione convenzionale.



Un ragno da ragnatela in un appezzamento di grano DOK.

Nematodi

I nematodi, o vermi filiformi, sono uno dei ceppi animali più ricchi di specie e più diffusi. Grazie alle specializzazioni morfologiche delle singole specie di nematodi, sono in grado di occupare un'ampia varietà di nicchie ecologiche. Svolgono un ruolo chiave nella regolazione dei cicli biogeochimici e dei processi ecosistemici. Ne sono un esempio la mineralizzazione e la formazione di sostanza organica nel suolo.

Tuttavia, singole specie possono causare danni alle colture, anche attraverso il proprio carattere parassita. Grazie alla loro elevata diversità, la composizione della popolazione di nematodi può essere utilizzata quale importante indicatore delle condizioni ecologiche ambientali.



I nematodi sono facilmente riconoscibili al microscopio.

Tabella 17: Numero di nematodi in individui per m²

	Batterivori		Erbivori		Micofagi		Onnivori	
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

Gli studi condotti nella sperimentazione DOK mostrano che sia il numero di specie che la biomassa dei nematodi dipendono fortemente dalla fertilizzazione organica. I nematodi, la cui fonte di nutrimento preferita sono i batteri e i residui vegetali, sono significativamente più comuni nei metodi a fertilizzazione organica. I nematodi che vivono di funghi sono più comuni nei metodi a fertilizzazione minerale. Non è stata riscontrata quasi nessuna differenza tra i metodi che impiegano fertilizzanti organici.

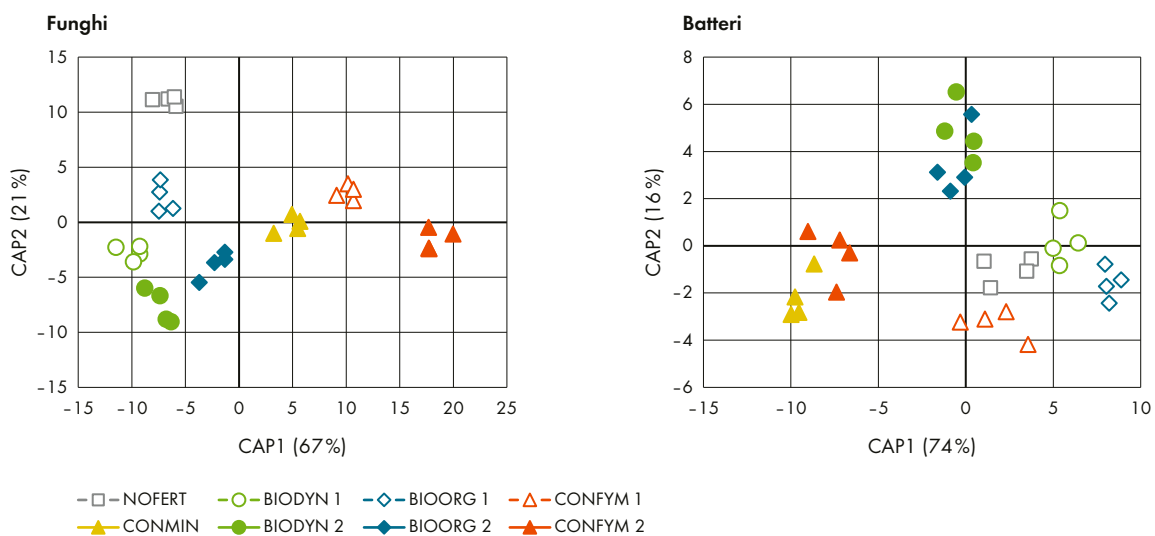
Diversità microbica

Batteri e funghi sono organismi estremamente adattabili che presentano una grande diversità nel terreno e colonizzano habitat molto piccoli nei pori del terreno. Si possono descrivere in base alla loro genetica, al loro aspetto e alla loro funzionalità. Mol-

ti funghi e batteri vivono in interazione con altri microrganismi e formano popolazioni in cui i vari percorsi metabolici e stili di vita si supportano a vicenda.

Caratteristiche importanti del suolo che influenzano la diversità microbica nel suolo includono il valore del pH, il carbonio e la struttura del terreno. Nella sperimentazione DOK si evidenzia una struttura della popolazione specifica di funghi e batteri del terreno per ogni metodo (Figura 37). I funghi del terreno mostrano una maggiore sensibilità ai sistemi di coltivazione agricola. Ciò si può riscontrare nel raggruppamento stretto dei metodi semi-fertilizzati e completamente fertilizzati dei tre sistemi BIODYN, BIOORG e CONFYM (Figura 37). I batteri, a loro volta, sono influenzati soprattutto dall'intensità di fertilizzazione, come dimostra il raggruppamento stretto dei metodi semi-fertilizzati insieme al controllo non fertilizzato.

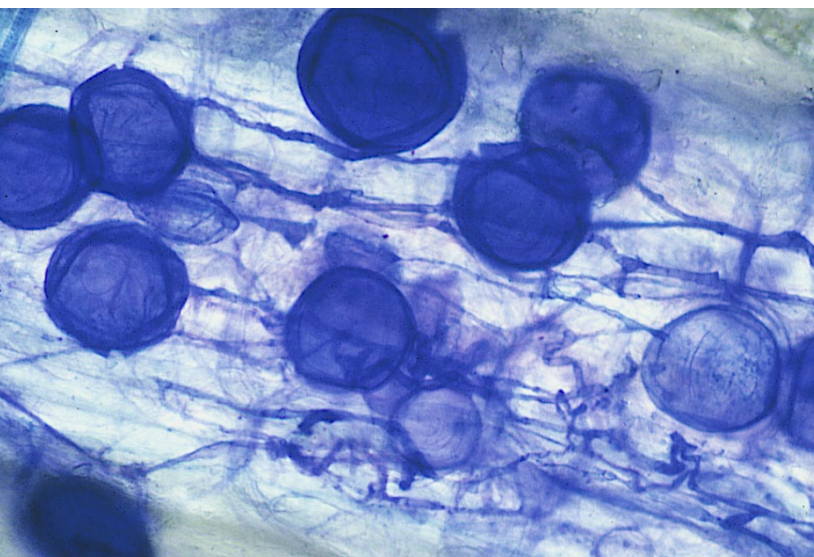
Figura 37: Struttura della popolazione di funghi e batteri del terreno



Struttura della popolazione dei funghi del terreno (a sinistra) e dei batteri del terreno (a destra) nei metodi della sperimentazione DOK. Il grafico mostra le somiglianze tra i microbi del terreno identificati dai geni marcatori. Ogni punto corrisponde alla struttura della popolazione di un appezzamento di terreno (fase C). Più i punti sono vicini, più la struttura è simile. Più sono distanti, più è diversa la struttura della popolazione.



Le erbe infestanti negli appezzamenti di grano possono proteggere il terreno dal dilavamento.



Simbiosi tra fungo micorrizza e leguminose: si possono vedere gli organi di riserva del fungo (vescicole) e le ife all'interno della corteccia radicale.

L'attività metabolica di funghi e batteri è fondamentale per molte attività ecosistemiche del terreno. A loro volta, funghi e batteri assicurano terreni fertili con un'elevata capacità di immagazzinamento.

Grazie ai funghi simbiotici, le micorrize, le piante coltivate possono allargare di molte volte il raggio di assorbimento dei nutrienti e dell'acqua nel terreno, assicurandone così l'approvvigionamento. La cosiddetta endomicorrizza sulla corteccia radicale è

relativamente aspecifica e può colonizzare diverse famiglie e generi di piante. Ciò consente di creare ponti tra l'intreccio di radici di diverse specie di piante nel terreno; anche le piante erbacee e legnose sono collegate da fili fungini (ife) e si scambiano così carboidrati e minerali.

Nella sperimentazione DOK, è stata dimostrata un'elevata colonizzazione delle piante coltivate da funghi micorrizici, in particolare nel metodo biologico e non fertilizzato. I metodi a fertilizzazione minerale hanno mostrato un chiaro calo dell'attività simbiotica tra funghi e piante coltivate. Ciò può essere correlato al calo della diversità delle popolazioni di micorrize.

In un esperimento di simulazione della siccità nella sperimentazione DOK, è stato dimostrato un aumento della presenza di micorrize in un sistema biologico rispetto a uno convenzionale, mentre altri indicatori biologici nel terreno sono rimasti inalterati. Nel sistema BIODYN, i funghi micorrizici erano tre volte più abbondanti durante la siccità rispetto al sistema CONMIN convenzionale. Gli effetti sul bilancio idrico delle piante sono in fase di studio in un progetto in corso. Non tutte le colture dipendono dai funghi simbiotici. Tuttavia, senza micorrizza, aumenta la dipendenza della coltura da fertilizzanti solubili e dalla protezione delle piante. A lungo termine, la riduzione dell'attività dei microrganismi del terreno porta a una perdita della struttura e della qualità del terreno.

In breve: Biodiversità

Le dimensioni degli appezzamenti sperimentali nella sperimentazione DOK limitano la selezione di specie e indicatori di biodiversità. La varietà vegetale nei sistemi biologici presentava più specie e un numero di semi germinabili da due a tre volte superiore rispetto ai sistemi convenzionali. Carabidi, stafilinidi e ragni erano circa due volte più diffusi negli appezzamenti biologici rispetto a quelli convenzionali. La fertilizzazione organica favorisce i nematodi, che si nutrono di batteri e piante, in termini di numero e composizione delle specie. I nematodi, che si nutrono principalmente di funghi, risultavano più diffusi nel sistema CONMIN. Funghi del terreno e batteri presentano composizioni diverse nei singoli metodi: i batteri erano più influenzati dall'intensità di fertilizzazione, mentre i funghi dal diverso sistema. I funghi micorrizza sulle piante coltivate sono stati rilevati più frequentemente nei metodi biologici e non fertilizzati. La loro massa aumentava in caso di stress da siccità, soprattutto in BIODYN.

Cambiamento climatico

Il settore agricolo è responsabile di circa il 14 % delle emissioni di gas a effetto serra in Svizzera e quindi contribuisce in modo significativo al cambiamento climatico. Allo stesso tempo, però, l'agricoltura è anche fortemente influenzata dal cambiamento climatico. Le emissioni globali di gas a effetto serra sono in aumento e si prevede che la probabilità di siccità estiva e di forti tempeste aumenterà in modo significativo anche in Europa centrale. L'agricoltura deve quindi sviluppare sia strategie di mitigazione del clima per ridurre i gas a effetto serra, sia strategie di adattamento al clima, per aumentare la resilienza a condizioni meteorologiche instabili.

Adattamento al clima attraverso la formazione di humus

Le misure che portano a un migliore adattamento dell'agricoltura alle conseguenze del cambiamento climatico spesso servono anche a migliorare la qualità del terreno e la biodiversità.

Un esempio sono i metodi di formazione di humus. Con la formazione e la stabilizzazione dell'humus, il carbonio viene assorbito dall'atmosfera e la qualità del suolo viene migliorata. Nella sperimentazione DOK, lo sviluppo del contenuto di humus è stato monitorato per oltre 40 anni. Si è scoperto che il contenuto di humus poteva essere mantenuto stabile o accresciuto solo mediante fertilizzazione organica. La formazione di humus è particolarmente

pronunciata nel metodo biodinamico, anche se la quantità di fertilizzante organico applicata in questo caso sotto forma di compost di letame risulta la più bassa (si veda il capitolo «La sperimentazione»). Nonostante la perdita di carbonio e azoto durante il processo di compostaggio, la qualità del fertilizzante applicato sembra essere il fattore determinante per la stabilità del carbonio nel terreno. Grazie alla formazione di carbonio nel suolo, l'applicazione di sistemi biologici può essere una strategia per la mitigazione degli effetti sul clima e l'adattamento al clima. Tuttavia, l'aumento del carbonio nel terreno è molto lento.

Confronto tra le emissioni di gas serra

I gas serra più importanti provenienti dall'agricoltura sono l'anidride carbonica CO_2 , il protossido di azoto N_2O e il metano CH_4 . Questi tre gas vengono convertiti in CO_2 equivalente per valutare il loro impatto sul clima: il protossido di azoto ha un fattore pari a 300 e il metano un fattore pari a 28. Il protossido di azoto rimane nell'atmosfera più a lungo e ha un impatto climatico 300 volte maggiore.

A causa dell'elevato impatto climatico di N_2O , le emissioni di gas serra legate all'azoto svolgono un ruolo decisivo per la valutazione del clima nell'agricoltura con terreni ben areati. Dal 2012, sono state misurate per 571 giorni le emissioni di N_2O e CH_4 con coltivazione di trifoglio, mais e sovescio e sono



Danni da grandine negli appezzamenti di mais della sperimentazione DOK nel 2022.

state confrontate con il tasso medio di variazione delle scorte di carbonio nel terreno Figura 38. Le emissioni di N₂O più elevate sono state rilevate nel metodo convenzionale con letame aziendale e fertilizzazione minerale. L'elevata somministrazione di azoto nel mais ha rappresentato probabilmente il fattore determinante dell'elevato impatto climatico del metodo durante il periodo di misurazione. La rinuncia all'azoto minerale, un pH del terreno stabile e una buona struttura del suolo sono fattori importanti che contribuiscono a ridurre al minimo le emissioni di N₂O nei sistemi biologici.

Da notare il fatto che l'aumento delle riserve di carbonio nel metodo biodinamico è stato osservato insieme alle più basse emissioni di N₂O. Questo risultato dimostra che l'aumento dei livelli di carbonio nel terreno con una strategia di fertilizzazione adeguata non implica necessariamente un aumento delle emissioni di N₂O. Per quanto riguarda la superficie, rispetto al metodo convenzionale, in BIOORG 2 è stato rilevato il 44 % in meno di emissioni di gas serra e il 63 % in BIODYN 2, rispettivamente con una consueta fertilizzazione.

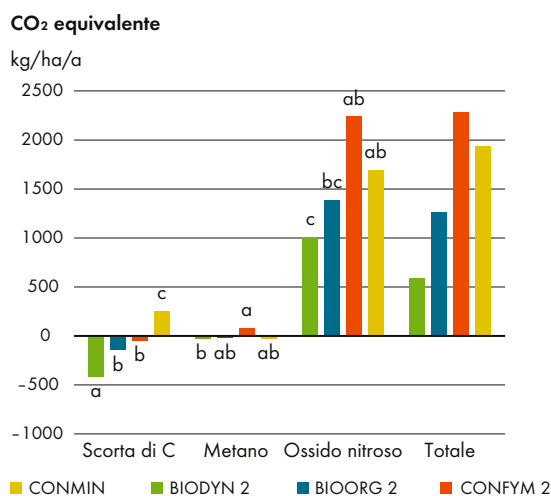
Resilienza allo stress da siccità

Il comportamento dei sistemi di coltivazione sotto stress da siccità costituisce un aspetto importante per la loro capacità di adattarsi al cambiamento climatico. Nel confronto sperimentale, la popolazione batterica più diversificata nel terreno di BIOORG 2 ha fatto sì che lo stress da siccità avesse un impatto minore sull'attività delle proteasi e sulla mineralizzazione dell'azoto rispetto a CONMIN. Di conseguenza, le piante in BIOORG 2 si sono sviluppate decisamente meglio sotto lo stress da siccità.

In breve: Cambiamento climatico

Tra i vari sistemi di coltivazione, esclusivamente il metodo biodinamico con fertilizzazione standard ha immagazzinato ulteriore carbonio organico nel terreno. Inoltre, le emissioni di protossido di azoto più basse sono state registrate nel sistema BIODYN. Gli elevati tassi di emissione in CONFYM 2 e CONMIN sono dovuti all'elevata fertilizzazione con azoto. Complessivamente, rispetto a CONFYM, le emissioni di gas serra sono risultate inferiori del 63 % in BIODYN e del 44 % in BIOORG per unità di superficie, rispettivamente con una fertilizzazione standard. Nei periodi di siccità, la popolazione batterica più diversificata rimane attiva più a lungo negli appezzamenti coltivati con metodi biologici, il che può ripercuotersi positivamente sulla mineralizzazione dell'azoto e quindi sulla crescita delle piante.

Figura 38: Effetto sul clima dei terreni della sperimentazione DOK



CO₂ equivalente da sistemi di coltivazione completamente fertilizzati, riportati per le variazioni di carbonio organico nel terreno (OBS, humus) nel corso di tutti i 42 anni e le emissioni di protossido di azoto e metano da una campagna di misurazione di quasi due anni con trifoglio, mais e sovescio nel sesto PRC.

Gli studi attuali del DOK mostrano che l'evaporazione diretta dal terreno è quasi la stessa nei sistemi di coltivazione, così come la profondità da cui le piante attingono l'acqua. Tuttavia, l'umidità del terreno nella zona delle radici è risultata significativamente più alta nei sistemi biologici e le piante erano in grado di utilizzare l'acqua in modo più efficiente. I risultati suggeriscono che i sistemi di agricoltura biologica presentano vantaggi in termini di efficienza agronomica di utilizzo dell'acqua e sono più resistenti allo stress da siccità. Questo aspetto viene studiato in modo approfondito in due grandi progetti in corso.

Ringraziamenti

Grazie al finanziamento di lungo periodo della sperimentazione da parte dell'Ufficio federale dell'agricoltura UFAG e all'instancabile impegno dei responsabili della sperimentazione del FiBL e di Agroscope, nonché all'intraprendenza dei team sul campo e alla fedeltà del gruppo consultivo degli agricoltori, la sperimentazione è sopravvissuta a sei periodi di rotazione delle colture di sette anni ciascuno e continua a dare risposte e a porre nuovi quesiti nell'ambito di progetti di ricerca agraria e ambientale. La sperimentazione viene utilizzata intensamente da scienziati e scienziate per i progetti del Fondo nazionale svizzero per la ricerca scientifica, della Commissione Europea, dell'Ufficio Federale per l'Ambiente e molte altre organizzazioni finanziatrici.

Grazie per il generoso sostegno finanziario

- Ufficio federale dell'agricoltura UFAG
- Ufficio federale dell'ambiente UFAM
- Fondo nazionale svizzero per la ricerca scientifica
- Fondo Coop per la Sostenibilità
- Commissione Europea

Grazie per la collaborazione di partenariato

- Agroscope
- ETH Zurigo
- Università di Basilea

Grazie per l'affitto delle preziose aree di sperimentazione agricola

- Cooperativa Agrico, Birsmatthof, Therwil
- Famiglia Stamm, Oberwil

Grazie ai collaboratori e alle collaboratrici di Agroscope e FiBL

Direzione sperimentazione DOK, Agroscope

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

Squadra sul campo e gestione dei dati

Agroscope

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

Direzione sperimentazione DOK, FiBL

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

Squadra sul campo e gestione dei dati FiBL

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

Grazie agli agricoltori e alle agricoltrici consulenti, membri del gruppo consultivo DOK

- Fritz Baumgartner, fondatore[†]
- Daniel Böhler
- Ruedi Frey, fondatore[†]
- 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[†]

Grazie alle persone che hanno contribuito

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

Grazie a tutti gli scienziati e le scienziate partecipanti e al personale sul campo e di laboratorio per il loro prezioso lavoro di ricerca

[†] nel frattempo deceduto

Pubblicazioni della sperimentazione DOK (peer reviewed)

Pubblicazioni scientifiche

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 defoliant. *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., Gättinger, 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., Gättinger, 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.

Capitoli del libro

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: CAB.
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: CAB.
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).

Abbreviazioni e spiegazioni

a	Anno	N ₂	azoto atmosferico molecolare
Appezamento	singolo appezzamento con un metodo nel sistema di sperimentazione DOK	N ₂ O	ossido di azoto
Artropodi	Artropodi: insetti, millepiedi, crostacei, aracnidi	NFP	Programma Nazionale di Ricerca Svizzero
Barbabetola	rapa rossa	NIR	spettroscopia nel vicino infrarosso
Batterivoro	si nutre di batteri	NIV	nivalenolo, una micotossina
BIODYN	metodo DOK secondo i principi della biodinamica	Nmik	azoto legato microbicamente
BIOORG	metodo DOK secondo i principi biologico-organici	Nmin	azoto minerale da ammonio e nitrato
BT	<i>Bacillus thuringiensis</i> , i preparati BT contengono spore o tossine del batterio	NMR	«nuclear magnetic resonance» = spettroscopia di risonanza magnetica nucleare
C	carbonio	NOFERT	metodo DOK senza fertilizzazione
CaO	calce viva, in chimica ossido di calcio	Ntotale	azoto totale
CH ₄	metano	NUE	efficienza di utilizzo dell'azoto
Cmik	carbonio legato a livello microbico	OBS	sostanza organica del suolo = Humus = 1,725 × Corg.
Cmik/Corg	rapporto tra carbonio microbico e carbonio organico	Onnivoro	che mangia qualsiasi cosa
C/N	rapporto tra carbonio e azoto	P	fosforo
CO ₂	anidride carbonica	P ₂ O ₅	difosfopentossido
Corg	carbonio organico	PLFA	modello di acidi grassi fosfolipidi e lipidi eteri
CONFYM	metodo DOK «conventional with farm yard manure» = convenzionale con letame aziendale	PPP	prodotto fitosanitario
CONMIN	metodo DOK convenzionale solo con fertilizzanti minerali	PRC	Periodo di rotazione delle colture, nella sperimentazione DOK PRC 1: 1978-84; PRC 2: 1985-91; PRC 3: 1992-98; PRC 4: 1999-2005; PRC 5: 2006-12; PRC 6: 2013-19
Deidrogenasi	gruppo di enzimi della catena respiratoria dei microrganismi	qCO ₂	quoziente metabolico: un valore basso indica che la popolazione di microrganismi metabolizza in modo efficiente l'energia disponibile.
DOK	Dinamico, Biologico, Convenzionale. Acronimo della sperimentazione DOK con sistemi di coltivazione biodinamica, biologico-organica e convenzionale.	Replica	ripetizioni delle unità sperimentali
DON	deossinivalenolo, una micotossina	Respirazione basale	respirazione del suolo in condizioni standard
Erbivoro	si nutre di piante	Respirazione del suolo	CO ₂ emessa dai microrganismi
Fase	nella sperimentazione DOK, le colture vengono coltivate in tre fasi sfalsate nel tempo: A, B, C	RFLP	polimorfismo di lunghezza del frammento di restrizione
Fertilizzazione	letame aziendale nella sperimentazione DOK ridotto = 1 = 0,7 UBA convenzionale = 2 = 1,4 UBA	Rizodeposizione	apporti dalle radici e sostanze rilasciate dalle radici nel terreno
GRUD	principi di fertilizzazione delle colture agricole in Svizzera (2017)	SD	deviazione standard
IP	produzione integrata	SIMS	spettrometria di massa a ioni secondari
K	potassio	SO	sostanza organica
Metabolita	prodotti da reazioni enzimatiche	SNF	Fondo nazionale svizzero per la ricerca scientifica
Metagenomica	il materiale genetico viene estratto, sequenziato e analizzato direttamente dai campioni ambientali.	SS	sostanza secca
Micofago	si nutre di funghi	t	tonnellate
n	entità del campione	TPF	trifenilformazan, colorante indicatore
N	azoto	UBA	unità di bestiame adulto. 1 UBA corrisponde a un'escrezione annua di 105 kg di N e 15 kg di P ₂ O ₅
		15N	isotopo stabile dell'azoto
		32P, 33P	isotopi radioattivi del fosforo



Imprint

Istituto editrice

Istituto di ricerca dell'agricoltura biologica FiBL
Ackerstrasse 113, casella postale 219, 5070 Frick, Svizzera
Tel. +41 (0)62 865 72 72
info.suisse@fibl.org, fibl.org

In collaborazione con Agroscope e l'ETH di Zurigo

Autori e autrici: Andreas Fliessbach, Hans-Martin Krause (entrambi FiBL Svizzera), Klaus Jarosch, Jochen Mayer (entrambi Agroscope), Astrid Oberson (ETH Zurigo), Paul Mäder (FiBL Svizzera)

Recensione: Lukas Pfiffner, Else Bünemann-König, Lucilla Agostini (tutti FiBL Svizzera)

Redazione: Vanessa Gabel, Simona Moosmann (entrambi FiBL Svizzera)

Traduzione: Sero Communications, Valentina Carlà Campa, Marco Serventi, Carlo Triarico (tutti Associazione per l'Agricoltura Biodinamica APS)

Design: Brigitta Maurer (FiBL Svizzera)

Foto: Thomas Alföldi (FiBL Svizzera): Pag. 16, 22, 32; Andreas Fliessbach (FiBL Svizzera): Pag. 1, 6, 8, 12, 18, 2, 24, 37, 39 (2); Tibor Fuchs: Copertina, pag..9; Dominika Kundel (FiBL Svizzera): Pag. 13, 19, 41; Adrian Lustenberger: Pag. 43, S.27; Paul Mäder (FiBL Svizzera) Pag.21 42; Simona Moosmann (FiBL Svizzera): Pag.8, 23, 38; Lukas Pfiffner (FiBL Svizzera): Pag. 39 (1); FiBL S.20, 28, 52, Wikimedia (CSIRO, CC BY 3.0), S.40, Piattaforma di geoinformazione della Confederazione Svizzera: Pag. 7

Permalink: orgprints.org/id/eprint/54244/

FiBL no di articolo: 1263

Per citare questa pubblicazione: Fliessbach A., Krause H-M., Jarosch K., Mayer J., Oberson A., & Mäder P. (2024). La sperimentazione DOK: confronto tra sistemi di coltivazione biologici e convenzionali nell'arco di 45 anni. Istituto di ricerca dell'agricoltura biologica FiBL, Frick. Su: shop.fibl.org > 1263

La presente pubblicazione può essere scaricata gratuitamente su: shop.fibl.org

Tutte le informazioni contenute in questa dossier sono fornite dagli autori e dalle autrici al meglio delle loro conoscenze. Tuttavia, le imprecisioni non possono essere completamente escluse. Gli autori e le autrici nonché gli editori non si assumono pertanto alcuna responsabilità per eventuali inesattezze nei contenuti o danni legati all'osservanza delle raccomandazioni.

2024 © FiBL

Per informazioni dettagliate sul copyright, si veda: fibl.org/it/copyright