

El ensayo DOK

Comparación de los sistemas de cultivo ecológico y convencional durante 45 años





Mediante el ensayo DOK, se lleva desde 1978 investigando las diferencias entre los cultivos herbáceos ecológicos y los convencionales. Este dossier resume de forma concisa y comprensible los resultados más importantes de más de 40 años de investigación, por lo que está dirigido a los profesionales interesados de la práctica, la consultoría y la ciencia.

En el ensayo DOK se comparan entre sí los sistemas agrícolas bio-dinámico (BIODYN), bio-orgánico (BIOORG) y convencional (CONFYM). Así pues, el ensayo simula explotaciones agrícolas y ganaderas. El sistema convencional CONMIN, exclusivamente fertilizado con minerales, representa una agricultura sin ganado. En los sistemas BIODYN, BIOORG y CONFYM se están investigando dos métodos con diferentes intensidades de fertilización.

Los resultados de la investigación se refieren a cinco cultivos que actualmente se alternan dentro de los periodos de rotación de cultivos de siete años: maíz de ensilado, soja, trigo de invierno, patatas y hierba de trébol. El dossier presenta los resultados de las áreas de rendimiento, calidad del suelo, suministro de nutrientes, biodiversidad y clima.

Índice

Prólogo	3
Investigación de vanguardia con relevancia práctica	4
Localización	7
El ensayo	9
Rendimiento de los cultivos	17
Dinámica de los nutrientes	25
Calidad del suelo	31
Biodiversidad	37
Cambio climático	43
Agradecimientos	45
Publicaciones del ensayo DOK	46

Lectura asistida

Este complejo tema no puede presentarse sin abreviaturas y términos técnicos. Por ello, los lectores encontrarán una lista de abreviaturas con explicaciones al final del documento (página 51). En las tablas y gráficos se utilizan letras minúsculas diferentes para resaltar las diferencias estadísticas.

Prólogo

Resultados inspiradores y fiables al servicio de la seguridad alimentaria sostenible

Pocas veces se han diseñado ensayos científicos para que duren tanto tiempo como el ensayo DOK. Pero esta continuidad es especialmente valiosa en relación con muchas cuestiones de investigación, debido a que algunos resultados solo adquieren verdadera relevancia tras un periodo de tiempo prolongado. Esto también se aplica, por ejemplo, a las observaciones a largo plazo de los efectos del cambio climático. Aunque los resultados a corto plazo son relevantes, no pueden captar los efectos a largo plazo de influencias externas que se manifiestan con el tiempo; es necesario tener en cuenta el efecto del tiempo. En el ensayo DOK, existen diversas influencias externas desde el primer año del ensayo debido a los métodos de gestión, y las preguntas que se hacen los investigadores siguen desarrollándose a lo largo de los años y las décadas, en función del objeto de investigación y las cuestiones sociales.

Conozco el ensayo DOK desde sus inicios hace décadas. Este también compara los resultados de distintos sistemas de cultivo en términos de rendimiento y productividad, a corto y largo plazo, y su impacto en el medio ambiente. La atención se centra principalmente en la fertilidad del suelo, el clima, los flujos de nutrientes y la biodiversidad. El ensayo DOK es un excelente ejemplo de la fructífera colaboración entre las Estaciones Federales de Investigación Suizas, hoy en día denominadas Agroscope, y el FiBL. Tanto como investigador en la ETH y más tarde como responsable del desarrollo de políticas en la Oficina Federal de Agricultura y hoy al servicio de la seguridad alimentaria global y la nutrición en el Comité de Seguridad Alimentaria Mundial de la ONU, siempre me he dado cuenta de que los resultados del ensayo DOK muestran dónde radican las diferencias entre los métodos de producción “bio-dinámico”, “bio-orgánico” y “convencional” en relación con las cuestiones de investigación actuales y cómo se están desarrollando los sistemas.

Un examen más detallado del ensayo DOK también plantea muchas preguntas sobre el propio diseño de la investigación y el desarrollo de los distintos procesos de producción. ¿Qué tipo de cambios están ocurriendo? Por ejemplo, el original “convencional” se ha convertido en “producción integrada”. También existe una dinámica dentro del sector ecológico, por ejemplo con las nuevas variedades, las rotacio-

nes de cultivos, la maquinaria y el control biológico de plagas. Se plantean cuestiones interesantes, no solo desde el punto de vista de la investigación, sino también desde la perspectiva de la seguridad alimentaria sostenible y la práctica. Los distintos capítulos de esta publicación dan respuesta a muchas de estas preguntas e ilustran el desarrollo de los enfoques metodológicos y las cuestiones abordadas.

Desde la perspectiva de una seguridad alimentaria global y sostenible, la pregunta lógica es hasta qué punto pueden contribuir los métodos de producción biológica. ¿Necesitamos más o menos agricultura ecológica, o debería todo el sector agrícola pasarse a la agricultura ecológica? Son preguntas polémicas para las que solo hay respuestas complejas. Lo que es seguro es que la elevadísima proporción de pérdidas de alimentos (postcosecha) y de desperdicios alimentarios (sobre todo en los hogares), así como la elevada proporción de piensos en las tierras cultivables, pueden reducirse y contradicen la afirmación de que se necesita más tierra a medida que aumenta la población. En otras palabras, se relativiza la escasez. Las consideraciones en este sentido son legítimas cuando se compara el impacto medioambiental de los distintos métodos de producción y sus costes subsiguientes, que corren a cargo de la sociedad.

Un reto particular para FiBL y Agroscope es la financiación a largo plazo del ensayo DOK. Es muy importante hacer hincapié en las dos dinámicas mencionadas: los efectos a largo plazo, por un lado, y los procesos de producción, por otro. La exitosa obtención de numerosos fondos provenientes de terceros para el ensayo DOK procedentes de otras oficinas federales, la Fundación Nacional Suiza para la Ciencia y la UE demuestra de forma impresionante que este tipo de investigación a largo plazo es relevante para la investigación básica y aplicada. El DOK se ha convertido así en una importante plataforma de investigación nacional e internacional.

Le invito a leer este dossier. Es estimulante e impresionante por su carácter científico. Por eso el ensayo DOK también ha entrado en el “Paseo de la Fama” de la ciencia, de la mano de la revista “Science”. Ojalá el ensayo DOK siga impresionándonos con resultados fiables y proporcionando orientación durante mucho tiempo.



Presidente del Consejo de Administración
Prof. Dr. Bernard Lehmann

Investigación de vanguardia con relevancia práctica

La cuestión de una agricultura respetuosa con el medio ambiente y productiva es de actualidad desde hace décadas. En todo el mundo se practica un gran número de métodos de cultivo diferentes para la producción de alimentos y piensos. Sociedades y generaciones enteras debaten sobre las ventajas y desventajas de los sistemas de agricultura biológica y convencional.

A principios de los años setenta, personas procedentes de la práctica agrícola, la ciencia y la política retomaron el debate en Suiza y establecieron el ensayo DOK en Therwil, Baselland, en 1978. **DOK** son las abreviaturas en alemán de **D**inámico, **O**rgánico y **C**onvencional (“Konventionell” en alemán). El ensayo investiga las diferencias en los sistemas de cultivo bio-dinámico, bio-orgánico y convencional con distintas intensidades de abono definidas a partir de la carga ganadera.

Cuestiones de gran actualidad como el cambio climático y la adaptación al mismo, la pérdida de biodiversidad, el crecimiento de la población mundial y la dependencia de las materias primas exigen más que nunca un examen científico de la forma en que producimos alimentos y piensos.

El ensayo DOK lleva más de 40 años comparando sistemas de producción agrícola y ha creado así una base científica para el controvertido debate sobre las oportunidades de la agricultura biológica, tanto antes como ahora.

Base científica de las cuestiones políticas

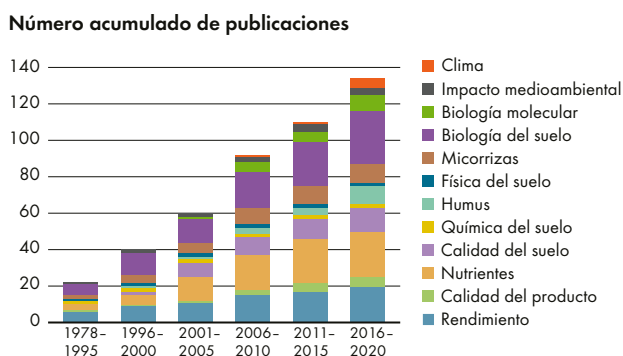
Lo más destacado del ensayo DOK hasta la fecha ha sido sin duda una publicación científica en la revista Science en 2002 sobre la fertilidad del suelo y la biodiversidad en la agricultura ecológica. Esto hizo que la agricultura ecológica fuera socialmente aceptable y se reconociera que ofrece soluciones a los principales problemas medioambientales de la producción agrícola.

Los actuales proyectos de investigación del ensayo DOK abordan los temas de la calidad del suelo, la biodiversidad y el clima, muy relevantes desde una perspectiva social global y cruciales para nuestro futuro.

Importancia nacional e internacional

En más de 40 años, del ensayo DOK han surgido más de 120 publicaciones científicas, así como tesis doctorales y un gran número de trabajos de estudiantes (Figura 1). Innumerables visitantes de muchos países del mundo, agricultores, estudiantes, alumnos, pero también científicos de alto rango de las mejores universidades han visitado el ensayo y realizado proyectos de investigación en el DOK.

Figura 1: Número de publicaciones en revistas científicas



La Secretaría de Estado de Educación, Investigación e Innovación de Suiza incluyó el ensayo DOK en la hoja de ruta de las infraestructuras de investigación suizas en 2015. Recoge los experimentos nacionales más significativos. El ensayo DOK ha llegado así al Olimpo de la ciencia suiza.

El experimento forma parte de un planteamiento de investigación circular: Las cuestiones abiertas de la práctica se analizan inicialmente en el ámbito del DOK utilizando métodos de vanguardia. A continuación se realizan estudios detallados en invernadero y en granjas prácticas. Los nuevos hallazgos se integran a su vez en la investigación de campo en curso. Por ello, el ensayo DOK suele ocupar un lugar destacado en los temas de actualidad de la investigación agrícola y medioambiental nacional e internacional para las investigaciones sobre el terreno.

El hecho de que el ensayo DOK ocupe un lugar firme en la investigación académica de alto nivel también queda demostrado por la calidad de los trabajos de investigación y la continua actualidad de las cuestiones investigadas. He aquí algunos ejemplos:

- Un total de siete proyectos del Programa Nacional Suizo de Investigación “El suelo como recurso” (Ressource Boden en alemán) utilizaron el ensayo DOK como experimental. Se investigaron la relación entre las propiedades y funciones del suelo y la producción agrícola¹.
- En un proyecto de la UE sobre la calidad del suelo muy publicitado, un equipo internacional de investigación estudió la influencia del cultivo en los servicios ecosistémicos del suelo. El ensayo DOK fue un pilar importante de la infraestructura del ensayo².
- En el marco de un proyecto de la Fundación Nacional Suiza para la Ciencia (SNSF), los investigadores del suelo del FiBL están estudiando cómo afecta la gestión del ensayo DOK a la calidad del humus y a su renovación³.
- Desde 2016, grupos de investigación internacionales investigan la influencia de los sistemas de

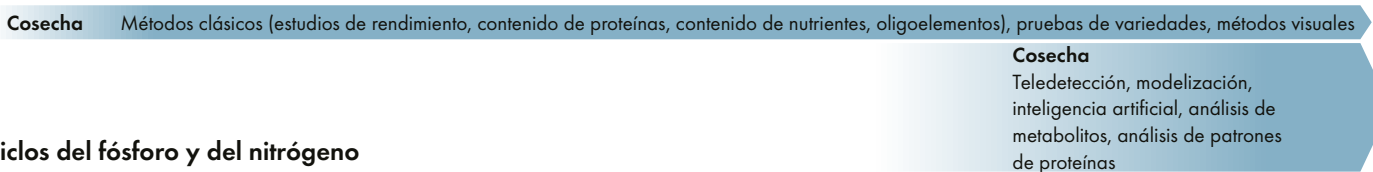
cultivo sobre la tolerancia al estrés por sequía de los cultivos y las comunidades microbianas⁴.

- Un proyecto de la SNSF sobre la biodiversidad microbiana del suelo en relación con el ciclo del nitrógeno entra actualmente en su fase final.
 - Un nuevo proyecto de mejora genética de la UE investiga las comunidades microbianas de las semillas de los cultivos⁵. En un segundo proyecto, un equipo de investigación está desarrollando un marco de seguimiento de la fertilidad del suelo⁶.
- Las preguntas abiertas han impulsado a los investigadores a establecer más ensayos a largo plazo sobre temas específicos. Esto incluye un ensayo de campo sobre los efectos de la labranza reducida, la estrategia de fertilización y los preparados biodinámicos. Las parcelas de ensayo se establecieron en Frick en 2002. Las comparaciones de sistemas de FiBL en India, Kenia y Bolivia, que comenzaron en 2005, también tienen su origen en el éxito del ensayo DOK.

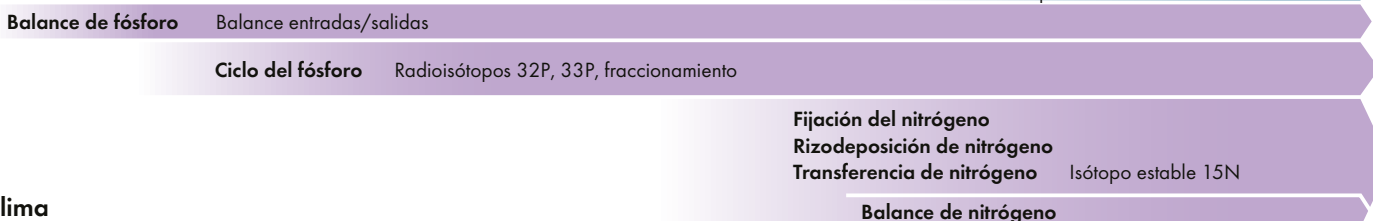
¹NFP 68, ²iSQAPER, ³DynaCarb, ⁴BiodivERsA (SOILCIIM, Biofair und Microservices), ⁵Liveseeding, ⁶Benchmarks

Figura 2: Temas y métodos de investigación a lo largo del tiempo

Estabilidad y calidad del rendimiento



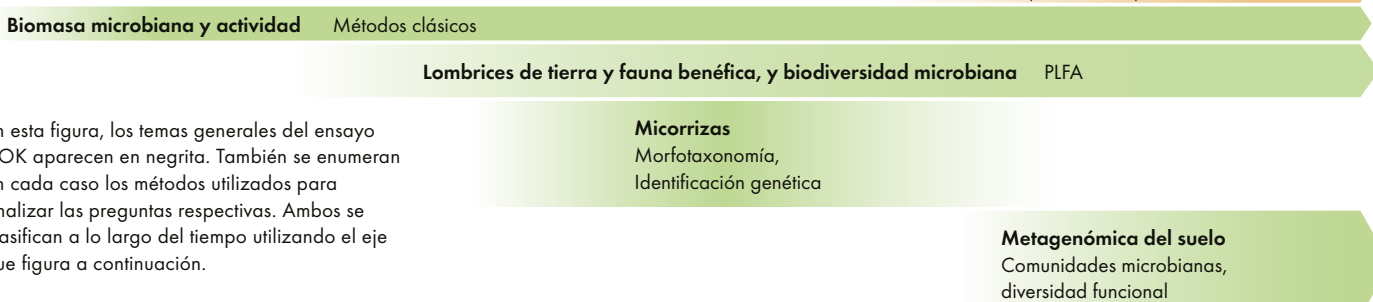
Ciclos del fósforo y del nitrógeno



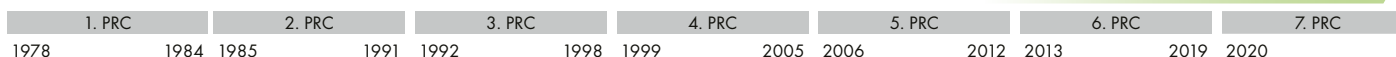
Clima



Biodiversidad y biología del suelo



En esta figura, los temas generales del ensayo DOK aparecen en negrita. También se enumeran en cada caso los métodos utilizados para analizar las preguntas respectivas. Ambos se clasifican a lo largo del tiempo utilizando el eje que figura a continuación.



Orígenes en diferentes condiciones

Las cuestiones abordadas en el ensayo DOK forman ahora parte de un debate público. Las condiciones eran muy diferentes para los pioneros de los años setenta: Contra todo pronóstico, un pequeño grupo de agricultores ecológicos y sus partidarios en Suiza defendieron la revisión científica de la agricultura biológica.

Como resultado de este exitoso compromiso, el Instituto de Investigación de Agricultura Biológica, fundado con este fin en 1973, junto con el entonces Centro Federal Suizo de Investigación de Química Agrícola e Higiene Ambiental, recibió el encargo de comparar los tres sistemas de cultivo, bio-dinámico, bio-orgánico y convencional, en un ensayo a largo plazo. FiBL se encarga principalmente de las parcelas de ensayo biológicas, mientras que Agroscope, el Centro Suizo de Excelencia para la Investigación Agrícola, es responsable de las parcelas de ensayo de cultivo convencional.

Ciencia y práctica como receta para el éxito

Los agricultores ecológicos participaron desde la fase de planificación, pero sobre todo durante la ejecución del ensayo, para garantizar su relevancia práctica. Su compromiso con el ensayo y su continuo interés por los hallazgos animaron a los científicos implicados a rendir al máximo. Además de las publicaciones científicas, un objetivo importante era poner los resultados, a veces complejos, al alcance de los agricultores y otras partes interesadas.

Gracias a la meticulosa documentación de las medidas de cultivo y a los diversos análisis, el ensayo DOK es ahora una de las zonas agrícolas mejor documentadas del mundo. El ensayo y la recopilación de datos adquieren más valor de año en año debido a la larga duración y la coherencia de los registros de datos.



Investigadores y agricultores se reúnen periódicamente en las inspecciones sobre el terreno del DOK (arriba en 2012, abajo en 2023).

Localización

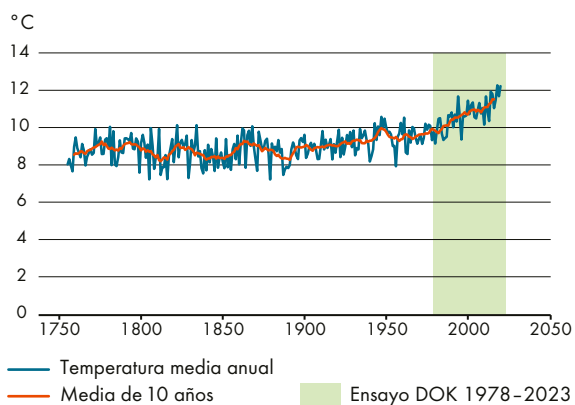


Las zonas de ensayo están situadas en Leimental, al suroeste de Basilea, en la llanura del Alto Rin.

Clima

La llanura del Alto Rin tiene un clima favorable en términos de calor y humedad. La temperatura media anual hasta finales del siglo pasado era de 9,7 °C. La media para los años 2010–20 es ahora de 11,2 °C. Actualmente, la precipitación media anual es de 872 mm.

Figura 3: Cambio de temperatura



Media anual y media decenal de la temperatura del aire en Baselland, medida a 1 metro de altura. Entre 1978 y 2010, la temperatura aumentó 1,5 °C.

Suelo y geología

El ensayo se encuentra en el extremo sureste de la cuenca del Rin y está rodeado por las colinas de Jura. La depresión del valle del Rin está rellena de gruesas capas de grava, sobre las que se superpuso material fino (loess) procedente de las llanuras aluviales de los antepaíses glaciares durante el último periodo glaciario. Esto creó suelos arcillosos fértiles en depresiones.

El loess del Leimental es profundo. Encima se han formado suelos pardos moderadamente desarrollados, que tienden a suelos pseudogley en algunos lugares. Los suelos están descalcificados, pero aún contienen cantos rodados individuales del cercano Jura. Los suelos tienen entre 1 m y 1,3 m de profundidad, por lo que enraizar es muy fácil.

Debido a las inundaciones periódicas del cercano río Birsig, en el pasado se depositaron sedimentos de diversos tamaños de grano. Los suelos de los lugares de ensayo DOK contienen solo una pequeña cantidad de arena, predominando el limo en un 70 %. La arcilla se sedimentó en pequeñas charcas de agua, por lo que su distribución es algo irregular.

Tabla 1: Composición granulométrica de los suelos según los sistemas de cultivos del ensayo DOK. Valores medios de los porcentajes de peso y desviación estándar (DE)

Proceso	Arcillas (%)	DE	Limo (%)	DE	Arena (%)	DE
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

El contenido medio de arcilla en las parcelas DOK es del 15,6 % (mediana 15,3), los valores más bajos son del 12,5 %. En ocho parcelas de la esquina noroeste del ensayo, sin embargo, el contenido de arcilla alcanzó valores del 20 al 25 %. Esta zona de alto contenido en arcilla está claramente separada de las parcelas vecinas. La influencia del contenido de arcilla se tiene en cuenta en las evaluaciones estadísticas, especialmente cuando se trata de evaluar los efectos del sistema de cultivo en el suelo.

El suelo tiene una pequeña proporción de poros gruesos, razón por la cual se calienta lentamente en primavera. A veces tiende a encharcarse, por lo que pueden verse manchas oscuras en el suelo, las llamadas concreciones de hierro y manganeso (psuedogley). Como consecuencia, el suelo solo puede trabajarse en cortos periodos de tiempo y la escarda mecánica en primavera y principios de verano es muy exigente. El suelo permite que el agua capilar suba desde las capas más profundas, por lo que la sequía no ha sido un gran problema en verano hasta ahora.



Perfil del suelo en el ensayo DOK. Aquí se muestran los horizontes (capas del suelo) de la Parabrown-tierra descalcificada.



Los suelos de los sistemas de cultivo CONMIN (izquierda) y BIODYN 2 (derecha) tras una fuerte lluvia en noviembre de 2002. La sedimentación en la superficie del suelo fue mucho más pronunciada en el proceso CONMIN.

El ensayo

En el ensayo DOK se comparan entre sí los sistemas agrícolas bio-dinámico (**BIODYN**), bio-orgánico (**BIOORG**) y convencional (**CONFYM**). En estos sistemas de cultivo, el ensayo simula fincas con cultivos herbáceos y ganadería.

Ambos sistemas ecológicos cumplen las directrices de Bio Suisse y Demeter. De forma análoga a las directrices Demeter, el sistema BIODYN utiliza preparaciones granulares y de compost en el ensayo y tiene en cuenta la constelación de las estrellas. El método CONFYM convencional corresponde a la producción integrada actual, con un equilibrado balance de nutrientes y protección vegetal en función de umbrales de daños económicos.

Además de los sistemas de cultivo con ganadería simulada, desde el segundo periodo de rotación de cultivos (1985) existe un sistema convencional exclusivamente fertilizado mineralmente que representa la agricultura sin ganadería (**CONMIN**).

En los sistemas BIODYN, BIOORG y CONFYM se están investigando dos métodos con diferentes intensidades de fertilización. La intensidad de fertilización se basa en dos densidades de ganado: 1,4 unidades de fertilizante orgánico (de granja) (UFO) corresponde a la densidad ganadera media en Suiza, 0,7 corresponde a dicha densidad con una ganadería reducida. El estiércol de granja procede de explotaciones que funcionan según el sistema respectivo. En los sistemas convencionales, los fertilizantes minerales se aplican de acuerdo con la recomendación suiza sobre fertilizantes (GRUD).

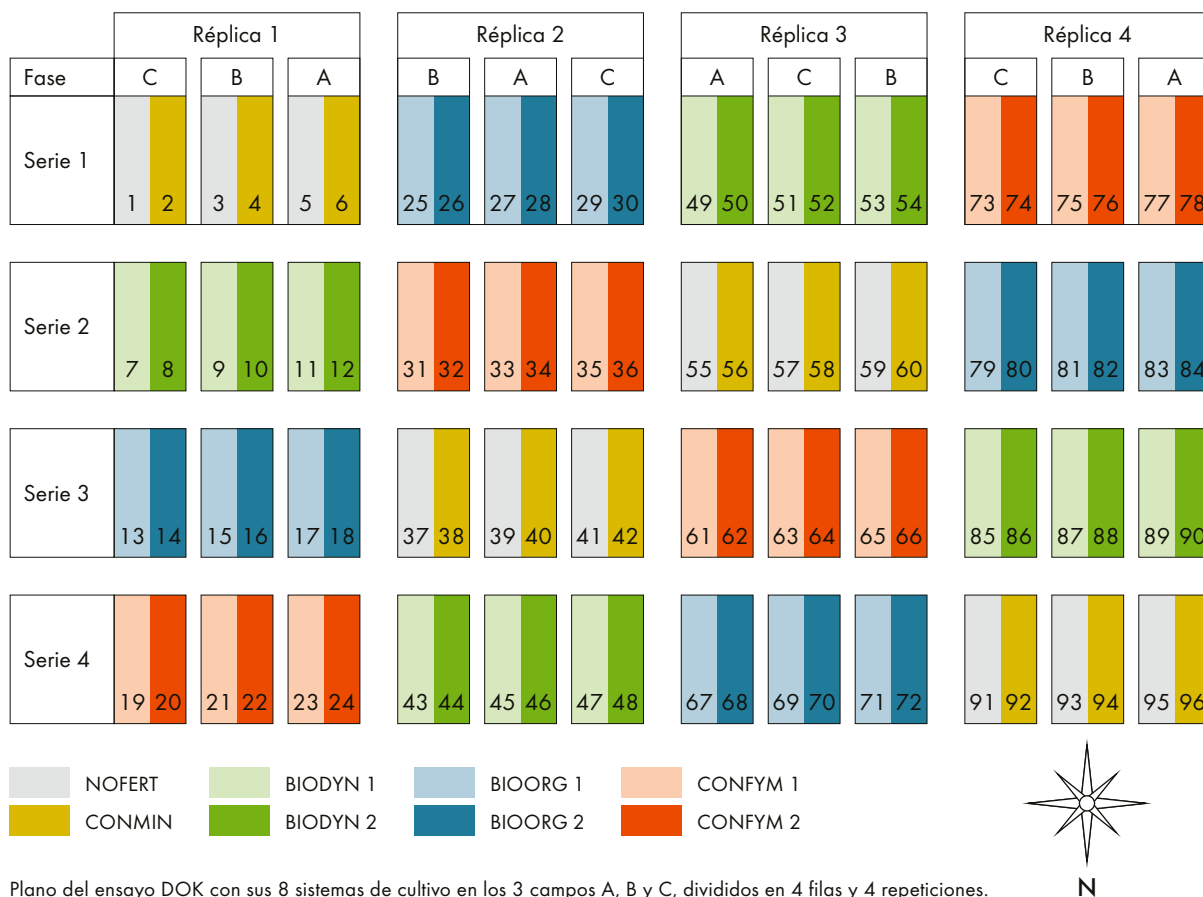
En un ensayo de control, no se ha aplicado ningún fertilizante desde el inicio del ensayo (**NOFERT**). Los preparados biodinámicos de campo 500 y 501 también se utilizan aquí desde principios de 1978, y la protección vegetal corresponde a las medidas BIODYN.



Vista aérea de las cuatro repeticiones del ensayo DOK en 2017 con las tres parcelas: Campo A trigo de invierno 2 con recorte para un ensayo de variedades en la zona fronteriza, campo B soja, campo C trigo de invierno 1. Además en parcelas seleccionadas pueden verse cubiertas de exclusión de lluvia del proyecto SoilClim.

Diseño experimental

Figura 4: Plano de la parcela



El ensayo consta de 96 parcelas individuales de 5 × 20 metros cada una. Los ocho sistemas de cultivo se organizan en cuatro repeticiones (réplicas). Cada sistema de cultivo está representado en cada fila y cada columna del sistema de bloques aleatorios. De este modo, la variabilidad de la localización puede equilibrarse y tenerse en cuenta en las estadísticas.

Además, cada año se alternan tres cultivos diferentes de la rotación de siete años. La rotación de cultivos se realiza en tres campos paralelos A, B y C a intervalos escalonados. De este modo, las fluctua-

ciones anuales del rendimiento debidas a las condiciones meteorológicas pueden equilibrarse. En cada período de rotación de cultivos, pueden analizarse los rendimientos de las parcelas de al menos 12 años de cultivo (3 campos × 4 repeticiones) para cada cultivo y cada método. El modelo estadístico de evaluación de la calidad del suelo tiene en cuenta el contenido en arcilla de cada parcela, que es un factor importante de la variabilidad edáfica de la parcela experimental.

Fertilización

La fertilización con estiércol de granja de una explotación mixta Suiza es de 1,4 UFO, lo que corresponde al nivel de abono 2. Como variante de control se introdujo la mitad de la cantidad de estiércol de granja con 0,7 UFO (nivel de abono 1), lo que simula una explotación con poco ganado. Los purines se utilizan para gestionar producción del cultivo actual, mientras que el estiércol como abono básico de liberación lenta.

Mientras que el sistema biodinámico solo recibe estiércol de granja, las parcelas bio-orgánicas reciben además pequeñas cantidades de potasa mineral (potasa patentada o potasa-magnesia).

En el sistema CONFYM 2 se añaden mayores cantidades de abono mineral hasta alcanzar la fertilización estándar según GRUD. En el sistema CONFYM 1 se reducen tanto la cantidad de estiércol de granja como la de abono mineral. El sistema CONMIN de fertilización puramente mineral solo recibe abono mineral hasta la cantidad de abono recomendada según la norma; aquí no hay niveles de abono diferentes.

En los sistemas convencionales, la introducción de la producción integrada en 1992 permitió tener en cuenta las reservas minerales de nitrógeno del suelo a la hora de calcular la cantidad de abono. El objetivo es una fertilización basada en las necesidades.

Los niveles de fertilización completa de los distintos sistemas no son equivalentes en nutrientes. Esto significa que las cantidades totales de abono y los nutrientes que contiene varían de un sistema a otro en función de las prácticas habituales. La fertilización en las condiciones del ensayo se basa en los denominados indicadores elementales, que se definen en un plan de fertilización para cada período de rotación de cultivos. El fósforo (P) desempeña aquí un papel decisivo. Si el plan de fertilización no se siguió con exactitud el año anterior, puede corregirse en el año en curso.

Cambios durante el ensayo

En el primer y segundo período de rotación de cultivos (PRC), la aplicación de fertilizante siguió siendo de 0,6 UFO en el nivel de abono 1 y de 1,2 UFO en el nivel de abono 2. Al comienzo del tercer PRC, las dosis de abono se incrementaron hasta los valores mencionados debido al aumento de la proporción de cultivos forrajeros en la rotación de cultivos.

En el cuarto PRC, la explotación pasó a la agricultura bio-orgánica; debido a un sistema de estabulación diferente, en ese momento la proporción de estiércol y purines en el abono de corral cambió.

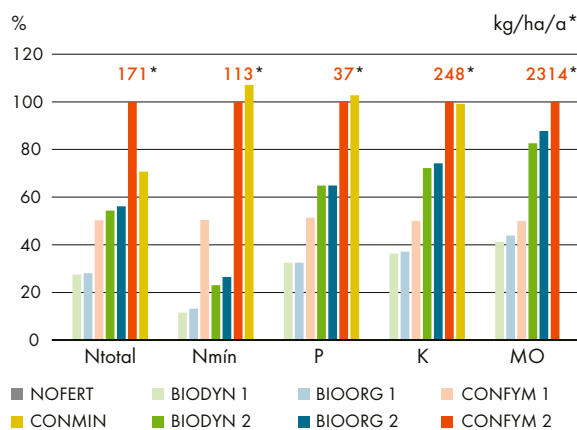
Diferentes tratamientos del estiércol de granja

El estiércol de granja de los tres sistemas BIODYN, BIOORG y CONFYM se almacena y procesa de forma diferente según los requisitos de los respectivos sistemas:

- como estiércol compostado en BIODYN
- como compost fermentado en el BIOORG
- como compost apilado en CONFYM

La pérdida de materia orgánica durante el almacenamiento es menor con el compost apilado y aumenta desde el compost fermentado hasta el estiércol compostado.

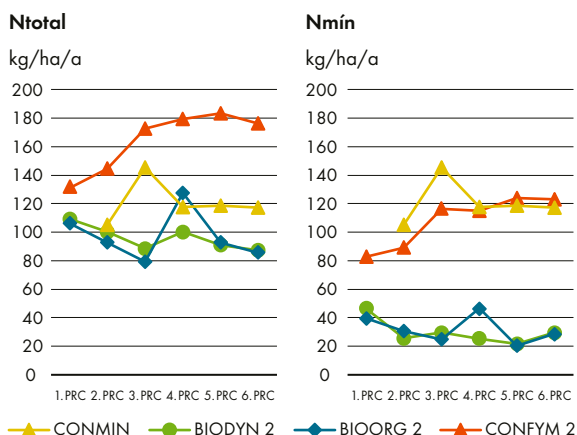
Figura 5: Cantidades aplicadas de nutrientes



Cantidades aplicadas de nitrógeno total (Ntotal), nitrógeno mineral (Nmin como amonio y nitrato en abonos de granja y minerales), fósforo y potasio de fuentes orgánicas y minerales, así como la cantidad de materia orgánica (MO) aplicada con estiércol y purines. Todas las cifras son valores medios del PRC 2-6 y relativos al proceso CONFYM 2, cuyas cantidades absolutas se muestran en rojo.

Figura 5 muestra claramente que, durante los cinco períodos de rotación de cultivos a partir de 1985, se utilizó un 45 % menos de nitrógeno (N) total, un 75 % menos de nitrógeno mineral (Nmin), un 35 % menos de fósforo y un 27 % menos de potasio (K) en los dos sistemas ecológicos respecto del sistema CONFYM 2. La cantidad de materia orgánica añadida con el estiércol de granja fue un 12 % inferior en BIOORG y un 17 % inferior en BIODYN que en CONFYM 2. La razón de los diferentes valores fue el cambio en el estiércol de granja debido a los diferentes métodos de almacenamiento y procesamiento.

Figura 6: Fertilización nitrogenada



Nitrógeno total (Ntotal) y nitrógeno mineral (Nmin como amonio y nitrato). Los sistemas orgánicos obtienen el N exclusivamente del estiércol y los purines; en los sistemas convencionales, se utiliza abono mineral como complemento del fertilizante estándar.

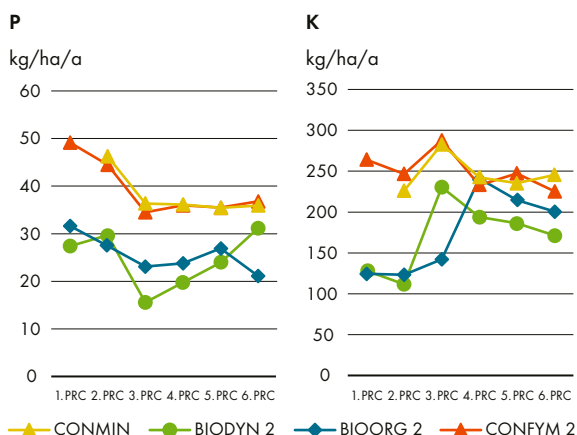
El suministro de nitrógeno en el sistema CONFYM ha aumentado considerablemente (Figura 6). Esto se debe a que, a partir del tercer PRC, se cultivaron tres años de forrajeras (trébol, maíz) con una elevada demanda de N y se aumentaron las recomendaciones de fertilizantes debido a las mayores expectativas de rendimiento. Dado que en la CONFYM solo se tiene en cuenta el 60 % del nitrógeno del estiércol de granja según el GRUD, la fertilización Ntotal allí es significativamente mayor que en la CONMIN, con 171 kg/ha y año.

En el sistema CONMIN con abono mineral, se fertiliza una media de 50 kg menos de **nitrógeno (N)**. Esta diferencia corresponde a la cantidad de N no contabilizada en el estiércol de granja, que también puede provocar problemas medioambientales debido a las pérdidas por volatilización (amoníaco y óxido nítrico) y a la lixiviación (nitrato).

En los sistemas orgánicos, se fertiliza una media de 95 kg de N por hectárea, de los cuales solo 30 kg son minerales y, por tanto, directamente efectivos. La parte orgánica del N del estiércol de granja solo se convierte en amonio y nitrato disponible para las plantas a través de la mineralización en el suelo. En general, el suministro de N en los biosistemas es bastante estable.

El **fósforo (P)** es un nutriente vegetal cuyos depósitos mundiales están llegando a su límite. Por consiguiente, el abono con P es caro. En el ensayo DOK, la fertilización con P de los sistemas convencionales se realiza según la norma, teniendo en cuenta los nutrientes solubles del suelo. Las cantidades aplicadas también se ajustaron en función de

Figura 7: Fertilización con fósforo y potasio



En BIOORG, además de estiércol de granja, se aplican abonos de K autorizados.

las revisiones del GRUD. El aumento de BIODYN está presumiblemente relacionado con el aumento de la aplicación de P a través de estiércol de granja desde la tercera rotación de cultivos (PCR).

El **potasio (K)** se ha utilizado abundantemente en los sistemas convencionales desde el inicio del ensayo DOK porque el contenido de K soluble en el suelo era bajo. A BIOORG se le añade algo de magnesia potásica, en BIODYN no se utiliza ningún fertilizante potásico adicional. El aumento de la potasa en el tercer PRC para los sistemas ecológicos solo puede explicarse parcialmente por el aumento de las cantidades de estiércol de granja. En principio, los purines contienen más potasa que el estiércol.

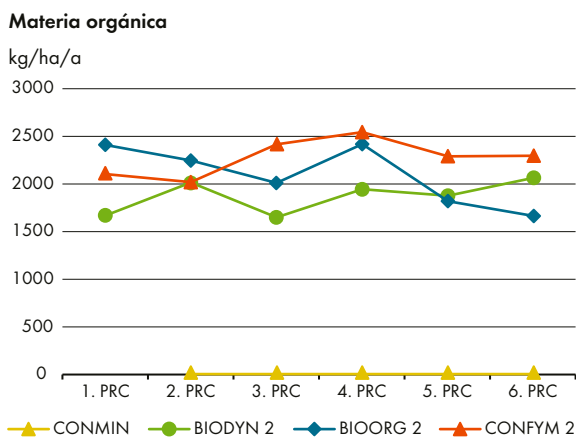


Abonos comerciales y productos de protección vegetal utilizados en el sistema CONMIN convencional para el trigo de invierno.



Parcelas de ensayo DOK con trigo y tejados de exclusión pluvial para investigar los efectos de la sequía en la biodiversidad del suelo.

Figura 8: Adición de materia orgánica



Los abonos de granja utilizados son el estiércol y los purines. Además del agua, sus principales componentes son la materia orgánica y los minerales. La figura muestra la cantidad de MO procedente del abono de 1,4 unidades de fertilizante orgánico (de granja) por hectárea y año que se incorpora al suelo.

Las pérdidas de materia orgánica debidas al diferente almacenamiento del estiércol de granja en los tres sistemas también se reflejan en las cantidades de abono aplicadas. En comparación con CONFYM, se aplicó un 12 % menos de materia orgánica en BIOORG y un 17 % menos en BIODYN. El compostaje del estiércol en BIODYN, en particular, provoca una pérdida de materia orgánica.

En cambio, la cantidad de purín apenas varió. El cambio del sistema de estabulación en BIOORG ha permitido obtener más materia orgánica con las mismas cantidades de nutrientes en el cuarto PRC. En CONFYM, las cantidades ya aumentaron en el tercer PRC.

Rotación de cultivos

La rotación de cultivos de siete años con dos años de descanso del suelo sin arar mediante una pradera de trébol es típica de las explotaciones ganaderas de Suiza. Los cultivos anuales son los tubérculos (remolacha, maíz, patatas, coles), los cereales (trigo, cebada) y la soja como leguminosa de grano. Los cultivos de captura se utilizan como abono verde o como forraje (se cosecha la biomasa) (Tabla 2). La rotación de cultivos es un compromiso entre los distintos sistemas de cultivo y se ajustó ligeramente después de cada PRC.

En cada PRC se cultivaron patatas, trigo de invierno y pradera de trébol. En la fase inicial del ensayo, la cebada y la col blanca también formaron

parte de la rotación de cultivos. La col blanca ya fue sustituida por la remolacha en el segundo PRC (1985) debido a la elevada intensidad de mano de obra. Al principio del tercer PRC (1992), se cultivó un tercer año de pradera de trébol en lugar de cebada, ya que la rotación de cultivos orientada a los cereales provocó enfermedades radiculares en todos los sistemas. Desde 1999, se cultiva maíz y soja y, durante dos años, se vuelve a cultivar la pradera artificial. Posteriormente, la posición de los cultivos se modificó ligeramente en cada PRC hasta 2013. Las razones de los cambios fueron el aprovechamiento óptimo del nitrógeno en la rotación de cultivos y la aparición de plagas, independientes del sistema, especialmente gusanos de alambre en las patatas.

Tabla 2: Evolución de la rotación de siete cultivos desde el inicio del ensayo

Año	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	Maíz ensilado	Maíz ensilado
	Abono verde	Abono verde	Abono verde			Abono verde
2	Trigo de invierno 1	Trigo de invierno 1	Trigo de invierno 1	Trigo de invierno 1	Trigo de invierno 2	Soja
	Cultivo intermedio	Cultivo intermedio	Cultivo intermedio	Abono verde	Abono verde	
3	Col blanca	Remolacha	Remolacha	Soja	Soja	Trigo de invierno 1
				Abono verde	Abono verde	Abono verde
4	Trigo de invierno 2	Trigo de invierno 2	Trigo de invierno 2	Maíz ensilado	Patata	Patata
5	Cebada	Cebada	Hierba de trébol 1	Trigo de invierno 2	Trigo de invierno 2	Trigo de invierno 2
6	Hierba de trébol 1	Hierba de trébol 1	Hierba de trébol 2	Hierba de trébol 1	Hierba de trébol 1	Hierba de trébol 1
7	Hierba de trébol 2	Hierba de trébol 2	Hierba de trébol 3	Hierba de trébol 2	Hierba de trébol 2	Hierba de trébol 2

Los cultivos intermedios se retiran, el abono verde permanece en el campo y se trabaja en él.

Protección vegetal

Hasta 1992, los pesticidas se aplicaban en gran medida según un calendario de pulverización en los sistemas convencionales. La producción integrada (PI) se introdujo con la tercera rotación de cultivos, en la que los pesticidas solo se utilizan una vez alcanzado el umbral de daños económicos. El uso de pesticidas en los sistemas convencionales se basó en la legislación vigente y en las recomendaciones de aplicación.

En los métodos convencionales, se aplicaba una media de 3 kg de sustancia activa por hectárea de tierra cultivable y año (Figura 9). Los fungicidas y herbicidas representaron la mayoría de ellos. Los insecticidas solo se aplicaban en contadas ocasiones y en pequeñas cantidades. Desde los años 80, las cantidades de sustancias activas aplicadas han disminuido considerablemente, lo que también se debe a los productos de protección vegetal altamente eficaces con cantidades de pulverización por aplicación muy bajas. En el mismo periodo, el número de aplicaciones de principios activos se ha duplicado (Figura 10).

Los biosistemas aprovechan las posibilidades del control biológico de plagas y las medidas de prevención de enfermedades. En el sistema BIODYN, solo la toxina producida biológicamente por la bacteria *Bacillus thuringiensis* se utiliza como insecticida contra el escarabajo de la patata.

Patatas

En el cultivo de la patata, el tizón tardío (*Phytophthora infestans*) y el escarabajo de la patata de Colorado (*Leptinotarsa decemlineata*) causan daños considerables. En los sistemas convencionales fueron necesarios una media de 15 tratamientos al año con herbicidas, insecticidas y fungicidas, en el sistema bio-orgánico siete aplicaciones de insecticidas y el fungicida cobre, y en el sistema biodinámico cuatro tratamientos con preparados BT.

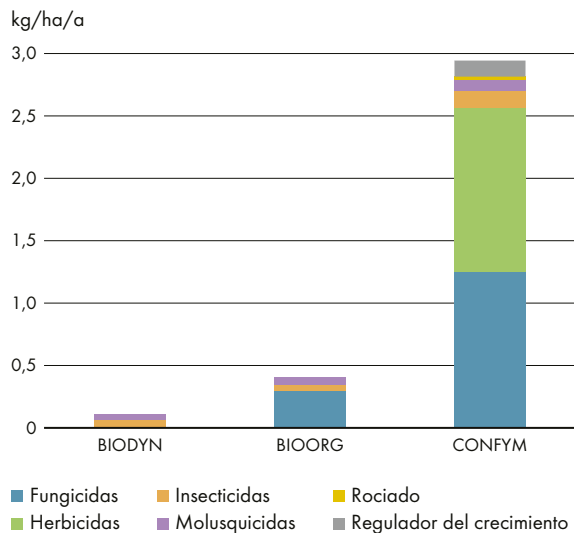
Cereales, maíz y soja

Los cereales convencionales se tratan tres o cuatro veces con herbicida, fungicida y un regulador del crecimiento. Por lo general, el maíz y la soja solo requieren un tratamiento herbicida y otro contra las babosas. El taladro del maíz europeo se controla con avispillas del género *Trichogramma*.

Semillas

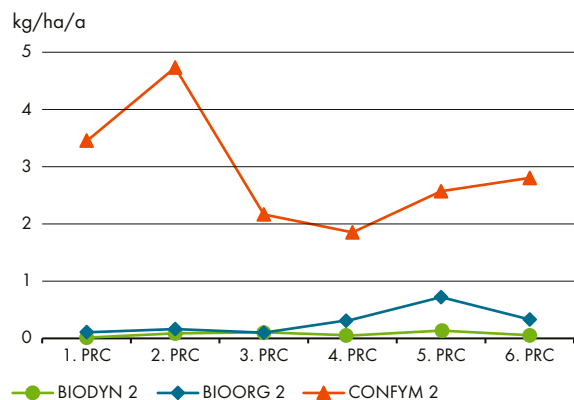
Las semillas y las plántulas de los sistemas convencionales se rociaron, pero no las de los sistemas ecológicos. Desde 1998, las semillas de los biosistemas proceden de la propagación biológica.

Figura 9: Cantidades de principio activo de las sustancias utilizadas



Cantidades medias de sustancia activa utilizadas en todos los años de experimentación en kilogramos de sustancia activa por hectárea y año. CONMIN recibió las mismas cantidades que COMFYM. Cabe señalar que no se aplicó ningún producto fitosanitario PSM en los años de pradera de trébol. Sin embargo, los valores medios también incluyen los años de trébol-hierba.

Figura 10: Evolución de los pesticidas aplicados a lo largo del tiempo



Cantidades medias de ingredientes activos utilizadas en un periodo de rotación de cultivos para todos los productos de protección vegetal en los tres métodos principales del ensayo DOK. Progresión a lo largo de 6 periodos de rotación de cultivos. CONMIN recibió las mismas cantidades que CONFYM. Cifras en kilogramos de sustancia activa por hectárea y año.

Laboreo del suelo

El laboreo se utiliza para preparar el suelo antes de la siembra de los cultivos de raíces y cereales. Al principio del ensayo, la profundidad del laboreo en los sistemas ecológicos era ligeramente menor (15–20 cm) que en los sistemas convencionales (20–25 cm). Desde la tercera rotación de cultivos, todos los sistemas se labran a una profundidad uniforme de 20 cm. Las medidas de dehierbe mecánico mediante escardadoras y gradas, que trabajan la superficie del suelo, se llevan a cabo con mayor frecuencia en los sistemas ecológicos. Las patatas y el maíz también se escardan en el sistema convencional.



En todos los métodos de cultivo, se ha arado antes de la fase de trigo y de tubérculos.

Tabla 3: Características de los sistemas de cultivo DOK

Sistema de gestión	NOFERT	BIODYN		BIOORG		CONFYM		CONMIN
Unidades ganaderas de abono por hectárea	-	0,7	1,4	0,7	1,4	0,7	1,4	-
Fertilización								
Estiércol de granja	-	Estiércol compostado y purines		Estiércol fermentado y purines		Estiércol apilado y purines		-
Abono mineral	-	Harina de roca		Harina de roca Magnesia potásica		Urea, nitrato de amonio, Nitrato amónico cálcico, Superfosfato triple, cloruro potásico		
Protección vegetal								
Control de las malas hierbas	Mecánicamente mediante gradas y escardadoras					Mecánicamente y con herbicidas		
Enfermedades de las plantas	-	Medidas indirectas		Medidas indirectas, suplementos de cobre para las patatas		Fungicidas		
Plagas	Biocontrol (<i>Bacillus thuringiensis</i>), Extractos vegetales, medidas preventivas					Insecticidas, biocontrol, gránulos antibabosas y medidas preventivas		
Particularidades	Preparados biodinámicos			-		Reguladores del crecimiento		

Rendimiento de los cultivos

Los gráficos y tablas del siguiente capítulo muestran los rendimientos medios de un período de rotación de cultivos con tres años de gradas y escardadoras y cuatro repeticiones por año (n = 12).

Cabe señalar que los rendimientos indicados son de materia seca (MS) absoluta (100 % de materia seca). En la práctica agrícola, los rendimientos se indican a veces con un contenido de humedad residual. Para el trigo, con un 86 % de materia seca y un 14 % de agua, y para la soja, con un 89 % de materia seca y un 11 % de agua. Esto significa que los rendimientos del trigo que se muestran aquí deben multiplicarse por un factor de 1,16 para que sean comparables con los rendimientos que se muestran en la práctica. El factor 1,12 se aplica a la soja. En la práctica, también se indican los rendimientos de materia seca para la pradera de trébol, como suele ocurrir con el maíz para ensilado. En el caso de las patatas, los rendimientos en materia fresca se utilizan para la comercialización.

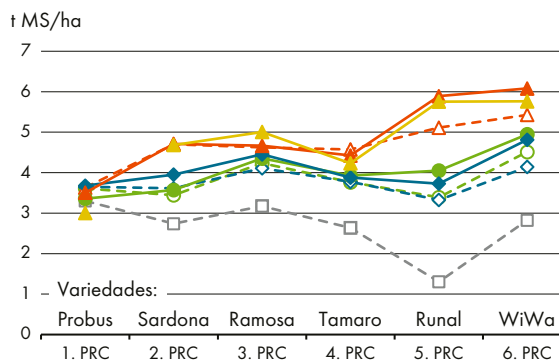
Trigo de invierno

Rendimiento del grano

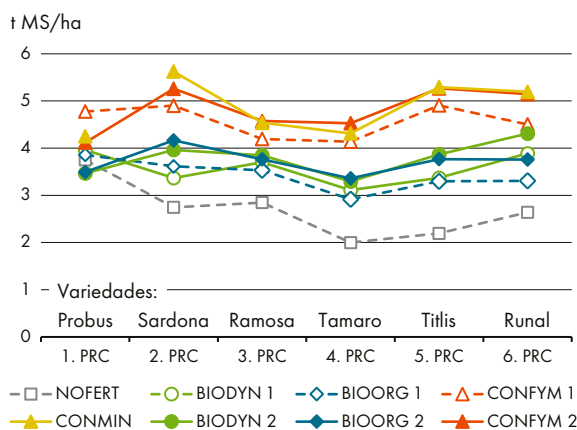
Siempre se cultivaron variedades de trigo panificable de muy buena calidad panadera. En el primer PRC, todos los sistemas obtuvieron rendimientos similares y probablemente siguieron beneficiándose de la gestión anterior. Los sistemas convencionales provocaron daños por encamado, por lo que la variedad de tallo largo Probus no pudo transformar el nitrógeno administrado en una elevada producción. Las parcelas en las que se estableció el sistema CONMIN permanecieron sin fertilizar en el primer PRC y, por lo tanto, mostraron rendimientos inusualmente bajos. Desde 1985, los rendimientos del trigo de invierno en los sistemas ecológicos han sido por término medio un 21 % inferiores a los del sistema CONFYM convencional. A continuación,

Figura 11: Evolución del rendimiento en grano del trigo de invierno 1 y del trigo de invierno 2

Rendimiento del trigo de invierno 1



Rendimiento del trigo de invierno 2



las diferencias de rendimiento solo se analizan a partir del segundo período de rotación de cultivos.

En el mejor de los casos, los rendimientos de grano convencional alcanzaron las seis toneladas de materia seca por hectárea. Esto corresponde al nivel de rendimiento típico de la región de Baselland.

Tabla 4: Rendimiento medio del trigo de invierno 1 y 2 (1985–2019)

	0,7 UFO				1,4 UFO			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t MS/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 %	

Los dos sistemas ecológicos, así como los dos sistemas convencionales, solo difieren ligeramente en su curva de rendimiento (Figura 11). El cultivo de variedades modernas ha aumentado el rendimiento de todos los sistemas de cultivo. En los dos últimos periodos de rotación de cultivos, los rendimientos fueron superiores en el sistema biodinámico que en el bio-orgánico. Esto podría estar relacionado con el cultivo de la variedad Wiwa, obtenida de forma biodinámica, así como con la estructura ligeramente mejor del suelo y la mayor actividad biológica de BIODYN en comparación con BIOORG. El contenido de N_{min} en BIODYN también es siempre ligeramente superior en primavera que en BIOORG. También es interesante observar que el método NOFERT sin fertilizar sigue produciendo unas dos toneladas de grano por hectárea.

El trigo de invierno 1 ocupa una posición más favorable que el trigo de invierno 2 en la rotación de cultivos. En los cuatro primeros periodos de rotación de cultivos, se benefició del efecto favorable del cultivo precedente de patatas con o sin abono verde. La proximidad temporal de la pradera de trébol probablemente también influyó positivamente en el rendimiento del trigo 1.

Por término medio de los dos sistemas ecológicos, el trigo de invierno 1 tiene un 18 % menos de rendimiento en grano, y el trigo de invierno 2 un 23 % menos de rendimiento en grano que los dos sistemas convencionales. Esta pequeña diferencia puede estar relacionada con la posición en la rotación de cultivos. Desde el 6º PRC, la variedad mencionada (Wiwa) se utiliza para el trigo de invierno 1. La variedad convencional Runal se utiliza para el trigo de invierno 2. Hasta 2015, se cultivaron las mismas variedades de trigo en ambas posiciones de la rotación de cultivos.

En los niveles reducidos de fertilización, los rendimientos son, por término medio, un 8 % más bajos que con la fertilización estándar. En este contexto, cabe destacar que, a pesar de la reducción de las cantidades de abono, se obtiene un mayor rendimiento en el sistemas convencional CONFYM 1 que



Cosechando el borde de una parcela de trigo de invierno. Solo se utiliza la zona central de la parcela para determinar el rendimiento exacto.

en los sistemas ecológicos con fertilización estándar. Este resultado se debe probablemente también a la mayor eficacia de la protección vegetal química y a los fertilizantes de N directamente disponibles para las plantas en los sistemas convencionales. Sin embargo, con una fertilización reducida, disminuye el contenido de humus y, por tanto, también las reservas de nitrógeno del suelo (véase el capítulo “Dinámica de los nutrientes”).

Rendimiento de paja

El rendimiento en paja también es importante para la ganadería, ya que la paja se utiliza como cama y vuelve al campo a través del estiércol. Aunque en los métodos convencionales se utilizaron reguladores del crecimiento (CCC o Moddus), el rendimiento de paja en los sistemas ecológicos es entre un 8 y un 10 % inferior al de los sistemas convencionales. La reducción del rendimiento de la paja es menor que la del grano.

Tabla 5: Valor medio de los rendimientos de paja del trigo de invierno 1 y 2 (1985–2019)

		0,7 UFO			1,4 UFO			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
† MS/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 %	

Factores de rendimiento

En el trigo de invierno, los factores determinantes del rendimiento se comportaron significativamente mejor en los sistemas convencionales que en los ecológicos: El número de tallos con espigas por m² fue significativamente mayor en CONFYM 2 (571 tallos) que en BIOORG 2 (383 tallos). El peso de mil granos en CONMIN fue de 42 g frente a 39 g en BIOORG 2.

Calidad del producto

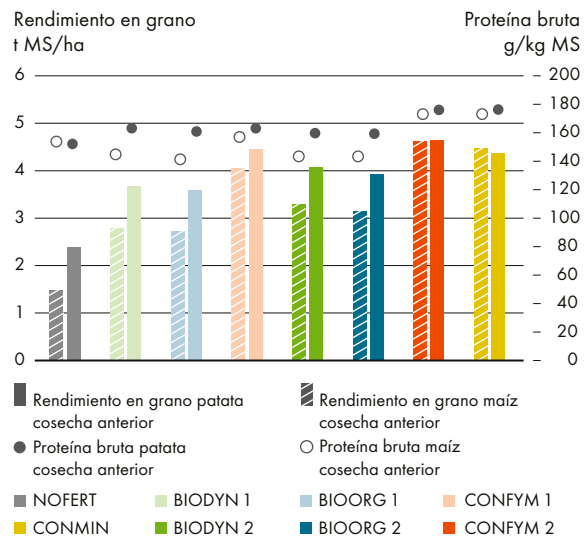
Parámetros como el contenido de minerales, hidratos de carbono, proteínas o ácidos grasos son características importantes de la calidad nutricional del trigo. La atención se centra también en las características técnicas de calidad que influyen, por ejemplo, en la calidad de la cocción. El ensayo DOK investigó si los sistemas de cultivo influyen en los criterios de calidad y de qué manera.

El contenido de proteína bruta del trigo convencional fue significativamente superior (Figura 12). Curiosamente, la diferencia entre el nivel de fertilizante 1 y el nivel de fertilizante 2 en los sistemas orgánicos no conlleva ninguna mejora significativa en el contenido de proteína bruta.

Por el contrario, el efecto del cultivo precedente de patatas en comparación con el maíz de ensilado tuvo un efecto significativamente mayor sobre el rendimiento en grano y el contenido de proteína bruta en los sistemas ecológicos. En cambio, la influencia del cultivo anterior no fue detectable en los sistemas convencionales. El trigo recibió un aporte de N más uniforme después del cultivo precedente de patata durante todo el desarrollo en los sistemas orgánicos que después del maíz, lo que también repercutió en el contenido de proteína bruta. En el sistema CONFYM 1 con fertilización reducida se midieron rendimientos de grano y contenidos de proteína bruta significativamente superiores a los de los sistemas ecológicos con fertilización convencional (BIOORG 2, BIODYN 2).

No se observaron influencias significativas relacionadas con el sistema en los micronutrientes, el contenido de aminoácidos y las propiedades de calidad panadera. Lo mismo ocurre con parámetros metabólicos como las concentraciones de elementos y azúcares. El potencial antioxidante tampoco difirió entre los sistemas.

Figura 12: Rendimiento y contenido de proteína bruta del trigo de invierno



Rendimientos del trigo de invierno en los sistemas de cultivo del DOK para subparcelas con maíz y patatas como cultivos anteriores. Los datos muestran valores medios para los años 2003 y 2010.



Los distintos sistemas de cultivo no influyen en muchas características cualitativas del trigo.

Micotoxina

Las micotoxinas desempeñan un papel importante en la calidad del trigo. Se trata de los tricotecenos, causados por infecciones del grano con hongos del género *Fusarium* y que pueden ser nocivos para la salud humana y animal incluso en bajas concentraciones. De una serie de micotoxinas analizadas, solo las micotoxinas deoxinivalenol (DON) y nivalenol (NIV) se detectaron en niveles bajos en todos los sistemas de cultivo sin que se observaran diferencias relacionadas con el tipo de sistema. La DON se forma con mayor frecuencia y es unas diez veces menos tóxica que la NIV.

Patatas

Se plantaron patatas de siembra germinadas previamente. En los métodos convencionales se solían rociar contra los hongos. Desde 2006, las patatas ya no se cultivan después de la pradera de trébol, sino después de la soja o del trigo de invierno, y desde entonces han mostrado una tendencia de rendimiento positiva en todos los sistemas.

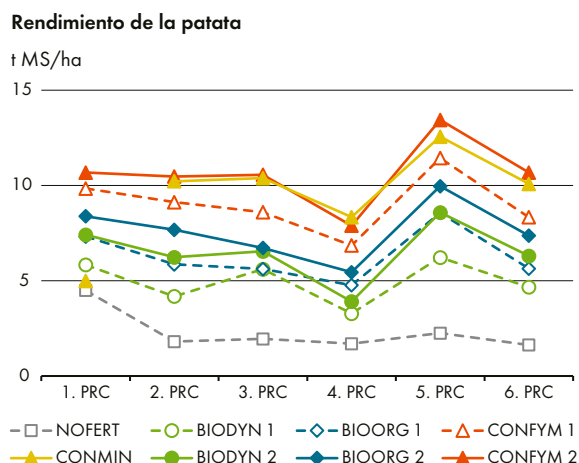
El rendimiento de patatas de BIOORG 2 fue por término medio un 35 % y el de BIODYN 2 incluso un 42 % inferior al de CONFYM 2. Las patatas cultivadas en sistemas ecológicos suelen ser deficientes en potasio y nitrógeno. El periodo vegetativo de las patatas en BIODYN también se acorta, ya que en este proceso no se autorizan fungicidas y, por tanto, las plantas son atacadas antes por el tizón tardío (*Phytophthora infestans*). Para proteger los tubérculos, el tallo suele cortarse relativamente pronto. Los tratamientos preventivos con productos que contienen cobre (hidróxido de cobre, oxisulfato de cobre, sulfato de cobre) permiten a la planta una fase de vegetación ligeramente más larga en BIOORG que



Plantas de patata amontonadas en el ensayo DOK.

en BIODYN, donde el cobre no está permitido. La cantidad de cobre permitida actualmente en el cultivo de la patata en Suiza es de 4 kg por hectárea, una cifra significativamente inferior a las anteriores. El cobre en el suelo representa una carga potencial permanente para microorganismos y moluscos, por lo que se buscan alternativas.

Figura 13: Desarrollo del rendimiento de los tubérculos



En CONFYM 2, se añade el 37 % de la cantidad de estiércol del PRC total, en BIOORG 2 solo alrededor del 25 %. La movilización de nutrientes del estiércol solo puede transformarse parcialmente en el corto periodo de vegetación de los sistemas ecológicos, por lo que los métodos convencionales con fertilizantes minerales resultan más nutritivos.

El método CONFYM 1 con fertilización reducida es especialmente eficaz, ya que en este caso los rendimientos también son superiores a los de los métodos ecológicos con fertilización estándar.

En el tercer PRC, no se utilizó cobre en BIOORG, por lo que los rendimientos aquí están al mismo nivel que en BIODYN. En los demás PRC, los rendimientos en BIOORG suelen ser superiores a los de BIODYN. Esto subraya la importancia de la protección vegetal en este cultivo tan sensible.

Tabla 6: Valor medio del rendimiento de patatas en 15 años de cultivo (1985–2019)

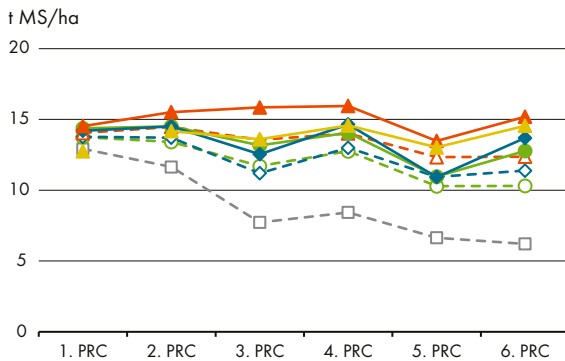
	NOFERT	0,7 UFO			1,4 UFO			CONMIN
		BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	
t MS/ha	1,87	4,79	6,09	8,87	6,32	7,44	10,61	10,32
0,7/1,4		76 %	82 %	84 %	100 %	100 %	100 %	
BIO/CON			61 %	100 %		66 %	100 %	

Pradera artificial de trébol

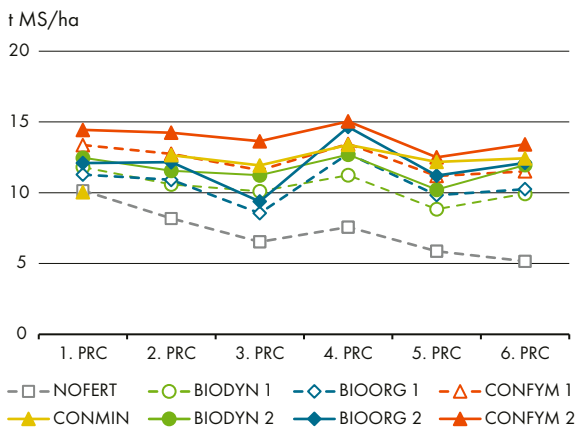
Los rendimientos de materia seca de la pradera de trébol que se muestran son el resultado de los totales respectivos de hasta cinco cortes al año durante los dos años de cosecha (Figura 14).

Figura 14: Evolución del rendimiento del césped de trébol

Rendimiento de la pradera de trébol (1º año de cosecha)



Rendimiento de la pradera de trébol (2º año de cosecha)



Rendimiento de la pradera de trébol en el primer y segundo año de cosecha como suma de 4-5 cortes al año.

Aquí no se tienen en cuenta los cortes de limpieza en el año de siembra o a principios de la estación de crecimiento. La pradera de trébol se siembra en septiembre y no se vuelve a labrar hasta la tercera



Las mezclas bienales de trébol forman la columna vertebral de la rotación de cultivos de siete años en el ensayo DOK. Las gramíneas ya dominan los rodales convencionales de trébol en el segundo año, mientras que en los sistemas ecológicos el trébol suele permanecer más tiempo.

primavera después de la siembra, de modo que no se labra el suelo durante dos años y medio.

La diferencia de rendimiento entre los sistemas orgánico y convencional en el primer año con el mismo nivel de fertilización es relativamente pequeña, del 10 al 11%. CONFYM 2 obtuvo el rendimiento medio más elevado. Los dos métodos ecológicos con fertilización reducida tuvieron un 19% menos de rendimiento que CONFYM 2 (Tabla 7) y el método sin fertilización un 40% menos.

En el segundo año, los rendimientos fueron por término medio un 12% inferiores a los del primer año. Las diferencias relativamente pequeñas de rendimiento entre los sistemas de cultivo ecológico y convencional pueden explicarse por la presencia del trébol en la mezcla de especies de la pradera, que fija más nitrógeno del aire a través de las bacterias de los nódulos en los sistemas ecológicos. El largo periodo de crecimiento de trébol y el intenso enraizamiento en el suelo en estas mezclas de especies también desempeñan un papel. La capacidad de fijación del trébol en la mezcla fue de 178 a 300 kg de N por hectárea y año. Además, las raíces del trébol estaban bien colonizadas por hongos micorrícicos. Los hongos micorrícicos ayudan a absorber los nutrientes.

Tabla 7: Valor medio de los rendimientos de pradera de trébol en 30 años por sistema

		0,7 UFO			1,4 UFO			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t MS/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%	

Maíz

El maíz se introdujo en el ensayo DOK en el cuarto período de rotación de cultivos porque desempeña un papel cada vez más importante en la práctica agrícola como fuente de forraje para el ganado.

Con hasta 20 toneladas de materia seca por hectárea, el rendimiento del maíz es claramente superior al de la pradera artificial (Figura 15), pero es menos versátil como fuente de alimento.

Con la fertilización estándar, los rendimientos de maíz en los sistemas ecológicos fueron un 11 y un 15 % inferiores a los de COMFYM 2. Con una fertilización reducida, la diferencia con CONFYM 1 seguía siendo del 10 %, solo la mitad creció en las subparcelas no fertilizadas en NOFERT. La baja reducción del rendimiento del maíz en los sistemas orgánicos en comparación con los sistemas convencionales puede explicarse por el hecho de que el maíz tiene una larga temporada de crecimiento y puede absorber el nitrógeno mineralizado del suelo y del estiércol de granja hasta el otoño. Hasta ahora, la incidencia de enfer-

medades y plagas en el maíz también ha sido baja. El taladro del maíz europeo se controla en todos los sistemas con avispijillas del género *Trichogramma*.

Figura 15: Evolución del rendimiento del maíz de ensilado

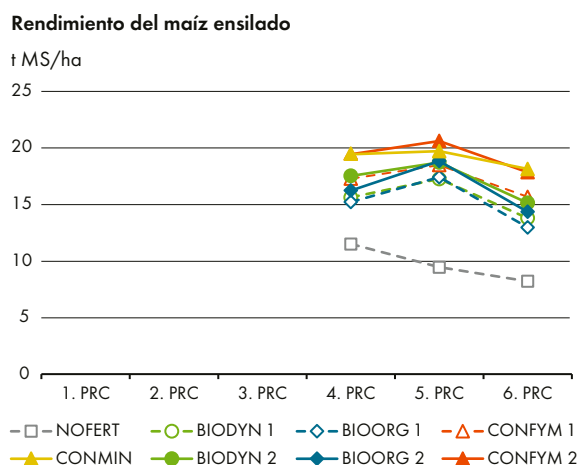


Tabla 8: Rendimiento medio del maíz en 9 campañas por método

	NOFERT	0,7 UFO			1,4 UFO			CONMIN
		BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	
t MS/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 %	



El maíz de ensilado de las parcelas de ensayo se cosecha a finales de verano.

Soja

De la misma manera que el maíz, la soja se introdujo en el cuarto periodo de rotación de cultivos. Los avances en la mejora genética han permitido cultivar variedades tolerantes al frío en regiones climáticas más septentrionales. La soja también tiene demanda, tanto para el consumo humano como para la alimentación animal. Gracias a su simbiosis con *Bradyrhizobium japonicum*, la soja es en gran medida autosuficiente en términos de nitrógeno, por lo que también es muy adecuada para la rotación de cultivos ecológicos. La bacteria debe añadirse a la semilla porque no se encuentra de forma natural en los suelos suizos. A diferencia de los demás cultivos de la rotación, el suministro de nitrógeno no es un factor limitante para la soja. Además, la presión de plagas y enfermedades en la soja sigue siendo baja.

Favorecida por estos factores, la soja alcanza los mismos rendimientos tanto en sistemas ecológicos como convencionales (Figura 16). No se realizó fertilización nitrogenada en ninguno de los sistemas. Todos los métodos de cultivo con fertilización estándar tienen rendimientos comparables, mientras que con fertilización reducida el método CONFYM 1 consigue rendimientos ligeramente mejores que los dos sistemas ecológicos de nivel de fertilización 1 (Tabla 9). Esto indica que el fósforo y también el potasio son elementos que limitan el crecimiento cuando se reduce la fertilización. Un buen suministro de P es esencial para una fijación biológica óptima del N.



Planta de soja en flor.

Figura 16: Evolución del rendimiento en grano de la soja

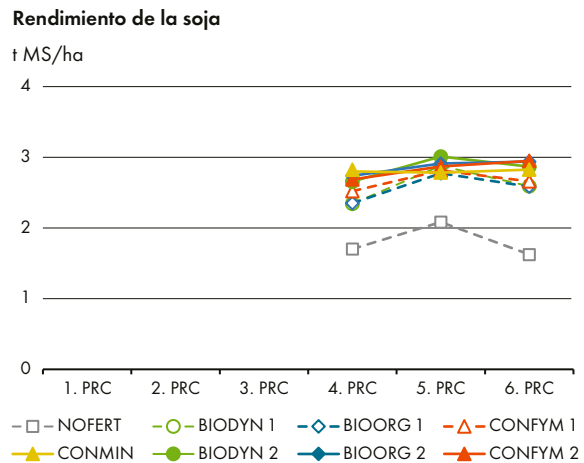


Tabla 9: Valor medio de los rendimientos de soja de 9 campañas por sistema

		0,7 UFO			1,4 UFO			
	NOFERT	BIODYN 1	BIOORG 1	CONFYM 1	BIODYN 2	BIOORG 2	CONFYM 2	CONMIN
t MS/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%	

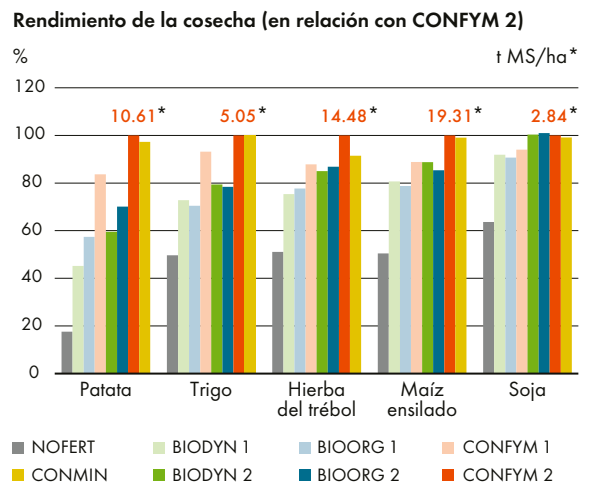


Cada año se cultivan tres cultivos en el ensayo DOK; en 2023 fueron maíz, patatas y soja.

Comparación de cultivos

La comparación de los rendimientos en la Figura 17 muestra la diferente sensibilidad de los cultivos al sistema de cultivo. Parece que a la soja no le impresiona ni lo orgánico ni lo no orgánico, a diferencia de la patata. Además de estar limitado por el nitrógeno y el potasio, las enfermedades y las plagas juegan un papel importante en el rendimiento de las patatas, mientras que la soja apenas tiene problemas al respecto. Los menores rendimientos con el nivel de fertilización reducido, incluso con leguminosas, muestran que en los sistemas orgánicos, el suministro de P y K se vuelve escaso incluso en un suelo fértil porque no se utilizan fertilizantes suplementarios o se utilizan pocos. A largo plazo, los métodos ecológicos dependen de fertilizantes comerciales minerales u orgánicos autorizados, o recurren a fertilizantes reciclados como el compost verde o los residuos sólidos o líquidos de fermentación.

Figura 17: Rendimiento medio de los principales cultivos



Rendimiento medio comparado con el método CONFYM 2 del segundo al sexto PRC, maíz y soja solo del cuarto al sexto.

En resumen: Rendimiento de los cultivos

En comparación con los sistemas convencionales, los sistemas ecológicos obtuvieron menores rendimientos con un menor uso de nutrientes y productos de protección vegetal. La soja constituye una excepción: Los rendimientos fueron igualmente elevados. En los sistemas ecológicos, el rendimiento de la pradera de trébol solo se redujo ligeramente, mientras que el de las patatas fue muy reducido. Es interesante observar que, con la mitad de intensidad de fertilización, los rendimientos del sistema convencional CONFYM fueron superiores a los de los sistemas ecológicos con fertilización estándar. Esto indica la influencia de la protección vegetal y de los nutrientes fácilmente solubles en el rendimiento, especialmente en patatas y trigo. Los cultivos previos, los abonos verdes y la mejora genética adaptada a la agricultura ecológica pueden aumentar el rendimiento.

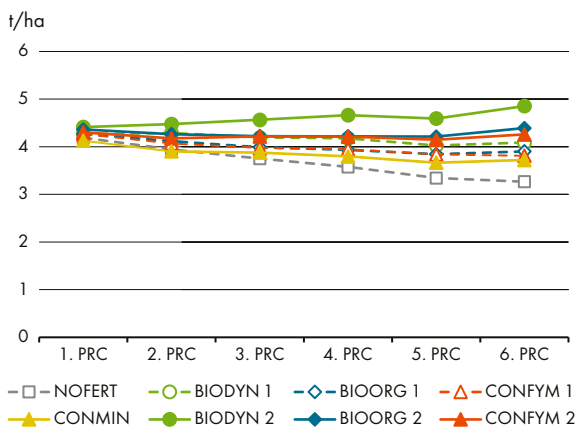
Dinámica de los nutrientes

Nitrógeno

La mayor parte del nitrógeno del suelo se encuentra en forma orgánica. El N mineral es muy importante para la nutrición de las plantas, ya que está directamente disponible. Por término medio en todos los sistemas, el contenido total de N en los 20 cm superiores del suelo fue de 1,6 g por kg de suelo. En la capa de suelo de 30 a 50 cm de profundidad, el contenido de Ntotal era solo la mitad.

La relación C/N de la materia orgánica del suelo apenas varió durante el periodo del ensayo DOK. El valor medio se mantuvo constante en $9 \pm 0,11$ y no mostró efectos procedentes del procedimiento.

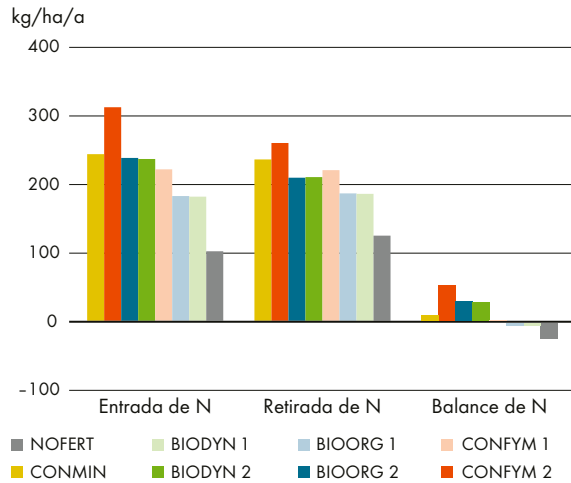
Figura 18: Existencias totales de nitrógeno en el suelo



Suministro de N en los 20 cm superiores del suelo. Valor medio de las mediciones durante cada período de rotación de cultivos. Los datos se calcularon a partir del contenido de Ntotal, teniendo en cuenta la densidad de almacenamiento del suelo, medida en el primer PRC.

Se midieron entre 3,2 y 4,9 toneladas de N por hectárea a una profundidad del suelo de 0 a 20 cm. En el sistema BIODYN 2, la reserva de N aumentó en 9 kg al año (Figura 18). En los sistemas BIOORG 2 y CONFYM 2, las reservas de N de esta capa de suelo fueron constantes a lo largo del tiempo. En todos los demás sistemas, las existencias de N disminuyeron hasta 20 kg al año en el sistema de control no fertilizado. Los resultados muestran que el suministro de N en el suelo no pudo mantenerse en los sistemas con fertilización reducida. Esto significa que la utilización del nitrógeno en estos sistemas no es sostenible.

Figura 19: Balance de nitrógeno



Balance del N a partir de la entrada procedente de la fertilización, la deposición, las semillas y la fijación del N de la atmósfera, así como la retirada a través del cultivo cosechado. Media de cinco periodos de rotación de cultivos entre 1985 y 2019.

Se calcularon los balances de la superficie del suelo para el periodo comprendido entre 1985 y 2019. Estos comparan la entrada de N con la retirada de N por el cultivo. Las variables de suministro de nitrógeno son:

- Fertilización
- Fijación simbiótica de N_2
- Depósito de N
- N en las semillas

En los sistemas con fertilización convencional, el balance entre entrada y retirada fue positivo y osciló entre un excedente de 23 kg (BIODYN 2 y BIOORG 2) y 46 kg (CONFYM 2) de nitrógeno por hectárea y año (Figura 19). En el sistema CONMIN, puramente fertilizado con minerales, el equilibrio era parejo. Los sistemas con fertilización reducida mostraron déficits anuales de entre 5 y 10 kg de nitrógeno por hectárea. En el sistema NOFERT no fertilizado, el déficit fue de 31 kg por hectárea y año (Tabla 10).

Pérdidas de nitrógeno por lixiviación

Los balances negativos de N con fertilización reducida y sin fertilización muestran que se libera más N de la materia orgánica del suelo del que se vuelve a incorporar. Sin embargo, las existencias de N aumentaron menos de lo que cabría esperar basándose en los balances de N cuando se aplicó fertilizante como de costumbre. En CONFYM 1 y CONMIN, en cambio, la reserva de N disminuyó más de lo que cabría esperar debido a los balances negativos.

Estas desviaciones pueden explicarse por el hecho de que las pérdidas de amoníaco durante la aplicación, las pérdidas por desnitrificación o la lixiviación de nitratos no se tienen en cuenta en el balance de la superficie del suelo. La suma de estas pérdidas asciende a entre 12 y 47 kg por hectárea y año con una fertilización estándar.

Los cambios en las reservas de N en las capas más profundas del suelo no se analizaron hasta más tarde: En 2019 y 2020, se tomaron muestras de suelo a una profundidad de entre 30 y 50 cm. Las existencias de N calculadas para esta capa mostraron diferencias significativamente menores entre los sistemas que en los suelos de 0 a 20 cm de profundidad. El efecto de la ausencia de fertilización solo pudo observarse en NOFERT a una profundidad de 30 a 50 cm.

Utilización eficaz del nitrógeno

La eficiencia de utilización del nitrógeno (NUE) también puede derivarse del balance de la superficie del suelo: Esto da una indicación de cuánto N suministrado es absorbido por las plantas. Una NUE

superior al 100 % significa que se elimina más N del que se añade y, por lo tanto, sugiere que se libera N de la materia orgánica del suelo (humus). En el caso de los métodos con fertilización convencional y CONMIN, la NUE se situó entre el 85 % y el 100 % (Tabla 10). La NUE se refiere aquí al suministro total de N, pero muestra que tanto el estiércol de granja como los fertilizantes minerales y el nitrógeno fijado biológicamente se utilizaron de forma eficiente en el ensayo DOK.

Fijación del nitrógeno atmosférico

Las leguminosas forman una relación simbiótica con los rizobios: En los nódulos visibles de las raíces, las bacterias convierten el nitrógeno molecular atmosférico (N₂) en amoníaco, que la planta puede utilizar para formar proteínas. La fijación simbiótica de N₂ fue la mayor fuente de N en todos los sistemas, excepto en los sistemas CONFYM 2 y CONMIN fertilizados mineralmente. Los métodos con fertilización reducida mostraron un rendimiento de fijación similar al de los métodos con fertilización estándar. En CONMIN, en cambio, el rendimiento de fijación fue significativamente inferior. La mayor cantidad de N fue fijada por el trébol en las praderas artificiales, seguido de la soja y los cultivos intermedios.

Para que los rizobios fijen el N es necesario un buen aporte de fósforo, potasio y oligoelementos. En el sistema no fertilizado, la fijación de N₂ disminuyó con el tiempo, lo que muy probablemente se deba a la disminución de los niveles de fósforo y potasio disponibles para las plantas en estos suelos.

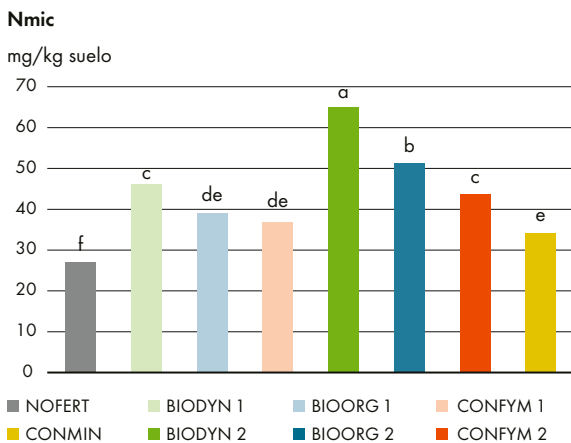
Tabla 10: Entrada y eliminación de nitrógeno en el ensayo DOK. Media de los cinco periodos de rotación de cultivos entre 1985 y 2019.

Datos en kg/ha/a	Abono	Fijación simbiótica	Deposición y semillas	Eliminación	Balance	Cambio en las reservas de suelo	Eficacia de utilización
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 %

Nitrógeno procedente de microbios

Los microorganismos del suelo pueden almacenar mucho nitrógeno en su biomasa (Nmic). La Figura 20 muestra el contenido de Nmic en el suelo. Teniendo en cuenta el volumen y la densidad de almacenamiento del suelo, los sistemas BIODYN 2 rinden hasta 150 kg de Nmic por hectárea. El nitrógeno de los microorganismos sirve como almacén temporal de N en el suelo, que se libera de nuevo tras la muerte de los microorganismos, por ejemplo debido a las heladas o a la desecación, cuando hay suficiente humedad en el suelo y está disponible para las plantas.

Figura 20: Biomasa microbiana



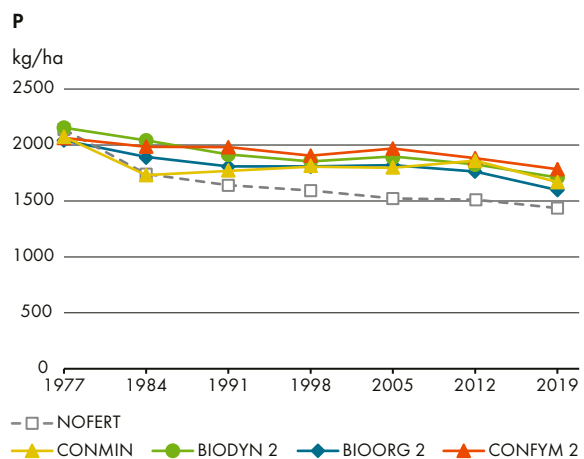
Nitrógeno ligado microbianamente en los ocho sistemas del ensayo DOK. Valor medio de los análisis de todas las parcelas en primavera de 1998, 2006, 2012 y 2019.

Las mediciones repetidas de la biomasa microbiana al final de los últimos cuatro períodos de rotación de cultivos muestran significativamente más nitrógeno ligado microbianamente en el sistema BIODYN 2 en comparación con BIOORG 2 y aún más claramente en comparación con CONFYM 2. El sistema CONMIN mostró valores similares a los sistemas con fertilización reducida. El proceso NOFERT mostró los niveles más bajos de Nmic.

Fósforo

Antes de establecer el ensayo DOK en 1977, se determinaron las reservas de fósforo en campo C: En ese momento, las reservas de P en los 20 cm superiores del suelo ascendían a unos 2100 kg/ha (Figura 21). Por lo tanto, el suelo estaba bien abastecido de P.

Figura 21: Reserva total de fósforo hasta 20 cm



Reservas de fósforo (P) en la capa de suelo de 0 a 20 cm de profundidad a lo largo de seis períodos de rotación de cultivos en el campo C (n = 4).



El estiércol se esparce a mano en las parcelas del ensayo DOK.

Desde entonces, se ha observado una tendencia decreciente en todos los sistemas de cultivo, mientras que las reservas en CONMIN (tras su creación en 1984; anteriormente NOFERT) se han mantenido relativamente constantes. La disminución de las reservas de P en NOFERT fue de casi el 20 %, mientras que los sistemas orgánicos tuvieron por término medio un 5 % menos de reservas de P que CONFYM 2.

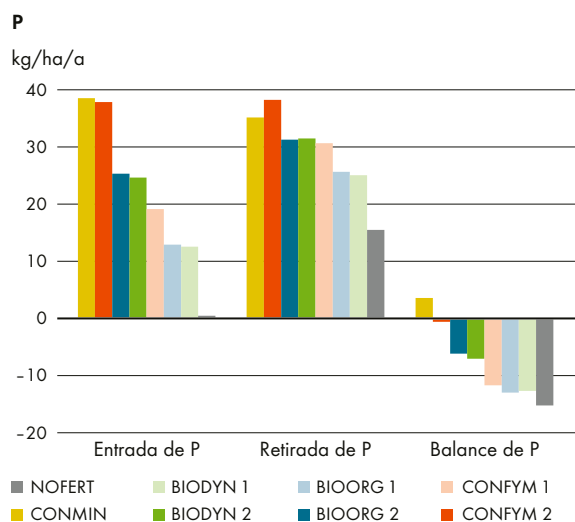
Balance de fósforo

El balance de fósforo tiene en cuenta el suministro a través de fertilizantes y semillas y la eliminación a través del cultivo cosechado (Figura 22). En el sistema CONFYM 2, el suministro medio fue de 40 kg de P por hectárea y año. En los sistemas BIODYN 2 y BIOORG 2, fue alrededor de un 38 % inferior con 25 a 26 kg de P por hectárea y año. Las proporciones entre los sistemas con fertilización reducida son similares, pero a un nivel inferior.

Con 32 kg, la eliminación de P por el cultivo cosechado fue solo un 16 % inferior en los sistemas ecológicos con fertilización convencional que en el sistema CONFYM 2 con 38 kg de P por hectárea y año. Esto indica que el P procedente de la fertilización se utiliza de forma más eficiente en los sistemas ecológicos. Al mismo tiempo, sin embargo, se produce un agotamiento continuo de las reservas de P en el suelo en todos los sistemas, a excepción del CONMIN.

Debido a la baja solubilidad del fósforo, los cultivos del primer PRC en particular se beneficiaron del suministro de P inicialmente elevado. Al mismo tiempo, al principio del ensayo DOK ya se pudieron identificar diferencias específicas entre sistemas en cuanto a la disponibilidad de P (Figura 23).

Figura 22: Balance de fósforo



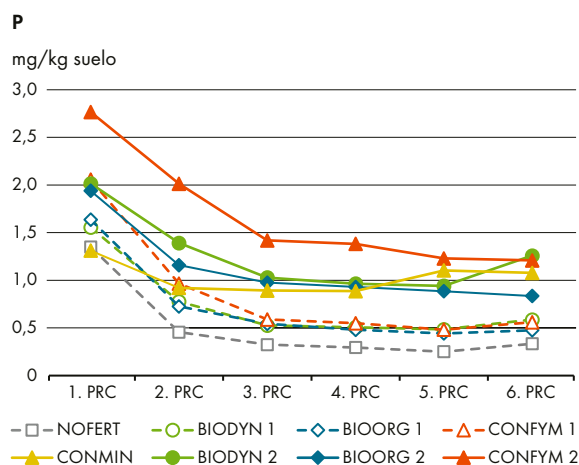
Equilibrio del fósforo a partir del suministro a través de la fertilización y las semillas y la retirada a través de la retirada del cultivo cosechado. Media de los cinco periodos de rotación de cultivos entre 1985 y 2019.

El sistema de cultivo CONFYM 2 tiene una mayor disponibilidad de P que BIODYN 2 y BIOORG 2 debido a la fertilización con abono mineral fácilmente disponible. Según las recomendaciones actuales

para la fertilización de GRUD, los sistemas de cultivo CONFYM 2 y BIODYN 2 seguían disponiendo de "suficiente" P después de 42 años (Figura 23).

Sin embargo, el sistema de cultivo BIOORG 2 y todos los sistemas con fertilización reducida ya mostraban un suministro "moderado" a partir del cuarto PRC como muy tarde. En la práctica agrícola, una posible reducción del rendimiento suele compensarse con una fertilización adicional. Las causas de la disminución del contenido de fósforo soluble son los balances negativos de P, la rápida fijación y la lixiviación hacia capas más profundas del suelo.

Figura 23: Fósforo soluble



Contenido de fósforo soluble del suelo en muestras de suelo después de la cosecha. Valores medios de muestreos anuales (1978-2006, 2008-2010) y bienales (2010-2018) por parcela, método CO₂.

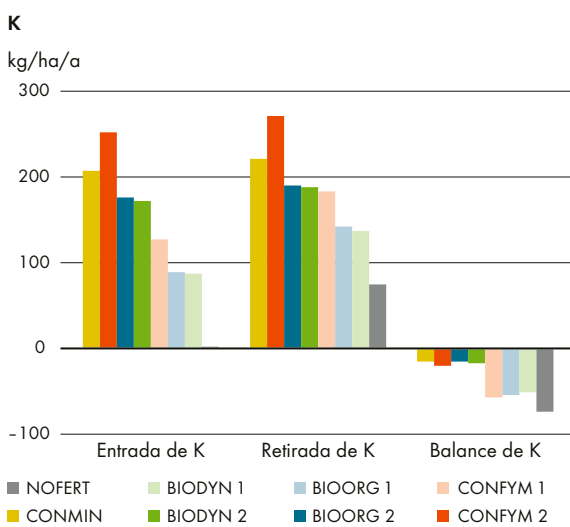


Debido al clima frío después de la siembra, los síntomas de deficiencia de P fueron visibles en los sistemas biológicos con fertilización reducida en maíz.

Potasio

El balance de potasio también se determina a partir de la diferencia entre el suministro a través de la fertilización y las semillas y la eliminación a través del cultivo. El método de cultivo CONFYM 2 recibió el mayor aporte de K, con 251 kg de K por hectárea y año. La extracción fue superior al suministro en todos los sistemas de cultivo, lo que dio lugar a un balance negativo en todos ellos (Figura 24).

Figura 24: Balance de potasio

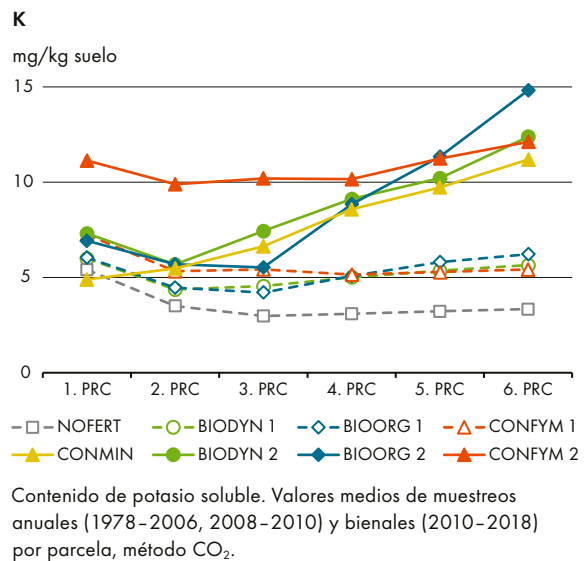


Balance del potasio a partir del suministro a través de la fertilización y las semillas y la retirada a través de la retirada del cultivo cosechado. Media de los cinco periodos de rotación de cultivos entre 1985 y 2019.

La disponibilidad de potasio muestra una clara diferenciación entre los sistemas de cultivo y los niveles de fertilización (Figura 25). Llama la atención el aumento de la disponibilidad de K en todos los sistemas de cultivo con fertilización estándar y en el método CONMIN, en el que la fertilización se dosifica con precisión desde los años 90. Durante este período, la entrada de potasio en los bioprocesos aumentó notablemente en algunos casos, pero la extracción no aumentó en la misma medida.

Sin embargo, actualmente todos los sistemas de cultivo pueden clasificarse en la clase de entradas “moderadas”. En la práctica agrícola, se recomendaría una mayor fertilización con K. El sistema de control sin fertilizar NOFERT ha estado en la clase de entradas “pobres” desde mediados de los años 1980. Varios estudios han demostrado que el modelo NOFERT limita el crecimiento de las plantas debido a la reducción de la disponibilidad de potasio.

Figura 25: Potasio soluble



Contenido de potasio soluble. Valores medios de muestreos anuales (1978-2006, 2008-2010) y bienales (2010-2018) por parcela, método CO₂.

Aportes de nutrientes a través de raíces y transferencia de nitrógeno

Los aportes de carbono y nitrógeno a través de las raíces son la principal fuente para mantener y formar materia orgánica del suelo (MOS). Los aportes de raíces consisten en las raíces y las sustancias liberadas por las raíces al suelo durante el período de crecimiento de la planta. Estos se denominan rizodeposición e incluyen sustancias como exudados radiculares solubles y mucigel (capa de mucílago en la superficie de las raíces), pero también células radiculares desprendidas, pelos radiculares y raíces finas, que los microorganismos del suelo descomponen rápidamente. La suma de los aportes se denomina aportes subterráneos de carbono y nitrógeno.

Aportes de carbono

Los modelos científicos que estiman los aportes de carbono (C) en los suelos, y que son la base de los informes climáticos internacionales, han asumido hasta ahora que los aportes de C subterráneo son proporcionales a la biomasa aérea: Cuanto mayor es el rendimiento de un cultivo, más C se añade al suelo subterráneo. Por el contrario, esto significaría que se libera más C al suelo en los sistemas de cultivo convencionales que en los sistemas orgánicos. Los resultados del ensayo DOK refutaron esta hipótesis para el trigo de invierno y el maíz.

Demuestran que los aportes bajo el suelo son en gran medida independientes de la producción de biomasa sobre el suelo y que los sistemas ecológicos tienden incluso a tener aportes de C bajo el suelo ligeramente superiores a pesar de los menores rendimientos. La parte de los aportes de C bajo el suelo en la asimilación total de C se situó entre el 18 y el 26 %. La rizodeposición tuvo una importancia fundamental para los aportes de C subterráneos y, a su vez, representó entre el 57 y el 63 % de los aportes de C subterráneos en el maíz y entre el 54 y el 58 % en el trigo de invierno (Figura 26).

Transferencia de nitrógeno en la pradera de trébol

Los aportes de C y N son igualmente fundamentales para el mantenimiento o el desarrollo de la MOS. En el ensayo DOK, la relación C/N del MOS se mantuvo constante alrededor de nueve. Esto significa que a largo plazo se fijan unos 0,11 kg de N por kg de C. Se trata de un valor comparativamente bueno, por lo que hay suficiente N disponible para los cultivos.

El ejemplo de la pradera de trébol en el DOK muestra cómo los aportes de raíces subterráneas de trébol afectan a la fijación biológica de N₂. En el trébol, a diferencia del C en el maíz y el trigo, los aportes de N por debajo del suelo fueron proporcionales a la asimilación de N por encima del suelo. Se observa que, en el primer año de utilización, el N fijado en las raíces y la rizodeposición de N aumentan a lo largo del período vegetativo. En el segundo año de la pradera, el N radicular disminuye de nuevo, pero los aportes vía rizodeposición aumentan significativamente. Esto indica una renovación muy elevada de las raíces, que se debe a los frecuentes cortes y al envejecimiento del trébol.

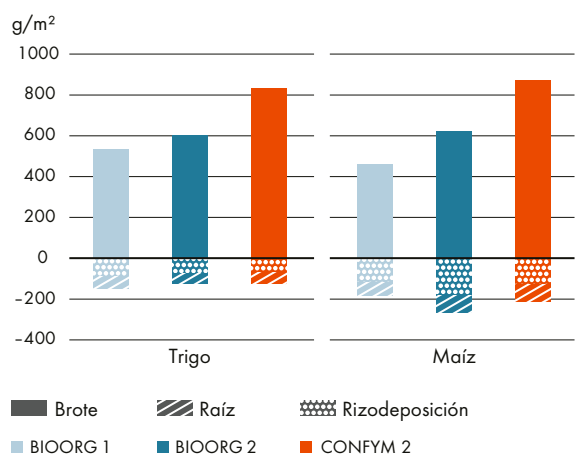
Los sistemas DOK difirieron significativamente en términos de asimilación de N, pero la proporción de N bajo el suelo fue siempre constante y totalizó alrededor del 29 % del N total. La proporción de

rizodeposición en el N subterráneo aumentó de alrededor del 35 % al 75 % desde el final del primer año de cosecha hasta el final del segundo año de cosecha.

Las hierbas se beneficiaron directamente de los aportes de N a través de la rizodeposición del trébol. Dos estudios independientes de DOK han demostrado que, en sistemas orgánicos, alrededor del 40 % del N absorbido por las gramíneas procede del trébol, que a su vez procede principalmente de la fijación biológica del N₂.

La consideración de los aportes de N bajo el suelo y la transferencia de N del trébol al resto de especies tiene una influencia significativa en la estimación de la cantidad fija de N en las praderas de trébol. Esta cifra es significativamente inferior si solo se toma como base el crecimiento por encima del suelo. En BIOORG 2 2007, por ejemplo, fue posible determinar 1,8 veces la cantidad de nitrógeno atmosférico fijado en comparación con los métodos de estimación convencionales.

Figura 26: Distribución de asimilados en brotes, raíces y rizodeposición en trigo y maíz



Comparación de los métodos BIOORG 1, BIOORG 2 y CONFYM 2.

En resumen: Dinámica de los nutrientes

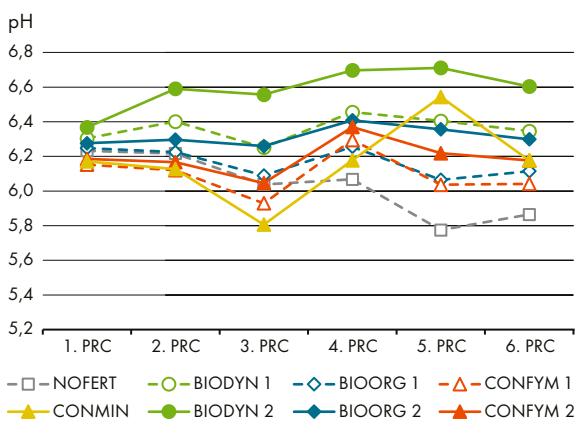
La reserva de nitrógeno en los 20 cm superiores aumentó, de forma similar a la reserva de carbono orgánico, exclusivamente en BIODYN 2. En BIOORG 2 y CONFYM 2 las reservas fueron constantes. La ausencia o la reducción de las aplicaciones de estiércol provocó una disminución de las reservas de nitrógeno. La fijación de nitrógeno atmosférico mediante la simbiosis de leguminosas con rizobios representó una proporción muy elevada del suministro total de nitrógeno en todos los sistemas, pero se redujo significativamente en los sistemas sin estiércol de granja (CONMIN y NOFERT). Las reservas de fósforo disminuyeron en todos los sistemas, más en los ecológicos que en los convencionales. Hasta ahora, con la excepción de NOFERT, rara vez se han producido síntomas de deficiencia, lo que indica una utilización eficaz del fósforo en los sistemas ecológicos. El suministro de potasio muestra un balance negativo en todos los sistemas, pero la disponibilidad de potasio muestra una tendencia positiva en los tres últimos periodos de rotación de cultivos.

Calidad del suelo

Valor de pH

En los sistemas ecológicos, el pH del suelo se mantuvo estable entre 6,6 y 6,3 durante todo el ensayo. En los sistemas convencionales, el valor del pH descendió durante los primeros 25 años hasta valores inferiores a 6, considerados críticos para este tipo de suelo según GRUD. Esta evolución se debe al efecto acidificante de los abonos minerales.

Figura 27: Curso de la reacción del suelo



Los procesos CONFYM y CONMIN se limitaron a los años 1999-2005 (n = 12).

Mantener un valor de pH superior a 6 es importante para la nutrición de las plantas, la actividad biológica y la estructura del suelo. Para elevar de nuevo el valor del pH en los sistemas convencionales, los suelos se encalaron con cinco toneladas equivalentes de CaO por hectárea y se abonaron con nitrato amónico de cal básica (sinónimo de cianamida cálcica) al inicio del cuarto PRC en 1999. El éxito de esta medida puede apreciarse en el aumento del pH en los sistemas convencionales (Figura 27). CONMIN recibió un encalado adicional porque el valor del pH seguía siendo inferior al de CONFYM. Sin embargo, la tendencia a la acidificación parece continuar tras el encalado.

Estructura del suelo

Agregados del suelo

Los agregados en el suelo están formados por partículas minerales de arcilla y partículas orgánicas que se depositan juntas. Están estabilizados por organismos del suelo con hifas y biopelículas. Esto crea estructuras relativamente sólidas que no se disuelven en el agua. La forma de los agregados es un indicador de la estabilidad estructural del suelo.

Los suelos con agregados más estables al agua se desmenuzan menos, se enarenan menos y están mejor protegidos contra la erosión gracias a una mejor infiltración del agua. Esto permite una mejor aireación y aporte de oxígeno a las raíces. El suelo de loess relativamente débil estructuralmente del ensayo DOK tiende a colmatarse. Los suelos de los sistemas orgánicos son menos propensos a colmatarse.

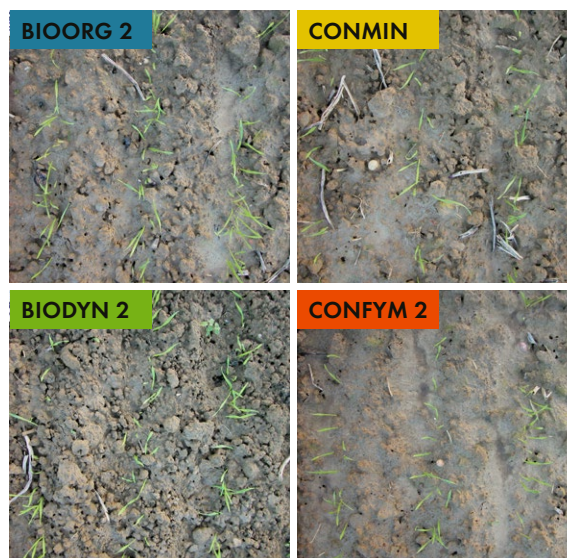
Curiosamente, la estabilidad de los agregados muestra una fuerte estacionalidad (Tabla 11). Especialmente en verano, cuando el suelo estaba seco, la estabilidad de los agregados en el suelo loess era baja en todos los sistemas. Los dos sistemas ecológicos seguían presentando la mayor proporción de agregados estables. Esto puede deberse al hecho de que hay más microorganismos y también más humus en BIODYN, lo que favorece la formación de agregados. Las diferencias eran menores en primavera. En condiciones de humedad, las hifas fúngicas y las biopelículas de bacterias siguen siendo eficaces como "adhesivos".

Tabla 11: Proporción de agregados estables al agua en los suelos del ensayo DOK

	Proporción de agregados estables	Significancia
BIODYN 2	50,1 %	a
BIOORG 2	44,2 %	ab
CONFYM 2	38,4 %	b
CONMIN	38,4 %	b
Media global de todos los procedimientos		
Marzo 2000	55,3 %	a
Marzo 2003	48,2 %	b
Julio 2003	24,8 %	c

Densidad aparente

La densidad aparente del suelo en el ensayo DOK es alta, ya que el suelo loess está formado principalmente por partículas de limo más finas. Mediante la estabilización biológica, por ejemplo con la ayuda de lombrices y raíces finas, este suelo puede seguir formando un sistema de poros finos y gruesos. Esto puede reducirse temporalmente con la labranza. Debido a la influencia de la rotación de cultivos y la labranza, la densidad aparente cambia a lo largo de una temporada de cultivo. Las densidades de aparentes solo difirieron ligeramente entre los sistemas de cultivo, aunque un cambio de más de una décima ya puede ser relevante para esta variable. En definitiva, el suelo sigue siendo pobre en poros gruesos, tiende a encharcarse y se calienta lentamente debido al tipo de material original.



La estabilidad de los agregados influye en la tendencia de los suelos a encenagarse.

Tabla 12: Densidad aparente en los suelos del ensayo DOK en kg/dm³

Nivel	Densidad aparente 1. PRC	DE	Densidad aparente 3. PRC	DE
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
Valor medio	1,32		1,22	

Carbono del suelo

A escala mundial, hay más carbono almacenado en el suelo que en la biomasa vegetal de la Tierra y en el dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera juntos. Por lo tanto, desempeñan un papel importante en el debate sobre el cambio climático, ya que los suelos cultivables en particular, que a menudo carecen de humus, tienen un gran potencial para acumularlo y almacenar así el CO₂ de la atmósfera.

Carbono orgánico

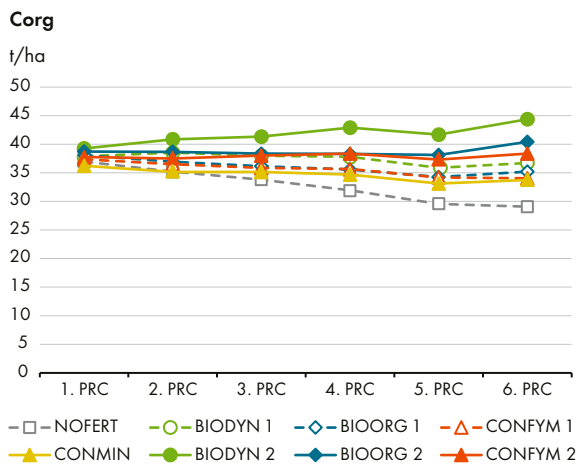
La materia orgánica del suelo (humus) se forma a partir de los residuos de la biomasa vegetal y animal

que se han transformado en el suelo. Por término medio, se compone de un 58 % de C. Por ello, para cuantificar la MOS se suele medir el contenido de carbono orgánico (Corg) ($MOS = 1,725 \times Corg$). La MOS es el indicador de suelo más utilizado para analizar la calidad de un suelo para el cultivo.

En el ensayo DOK, se tomaron muestras de suelo anualmente después de la cosecha a una profundidad de 0–20 cm y se archivaron. La mayoría de estas muestras a lo largo de todo el periodo de estudio se analizaron uniformemente tras el final del sexto PRC. Esto permitió excluir factores de influencia como el cambio de personal de laboratorio, los nuevos equipos y métodos, y mostrar la evolución real.

Los nuevos análisis arrojaron los siguientes resultados: El carbono orgánico (Corg) es claramente el más elevado en el sistema BIODYN 2 (Figura 28). Además, se confirmó estadísticamente una tendencia positiva en este proceso. En los sistemas BIOORG 2 y CONFYM 2, los contenidos se mantuvieron constantes; el ligero aumento registrado en este caso no pudo comprobarse estadísticamente. Los niveles de Corg disminuyeron en todos los sistemas con fertilización reducida y en CONMIN. Como era de esperar, la disminución más significativa se registró en NOFERT.

Figura 28: Reservas de carbono en el suelo



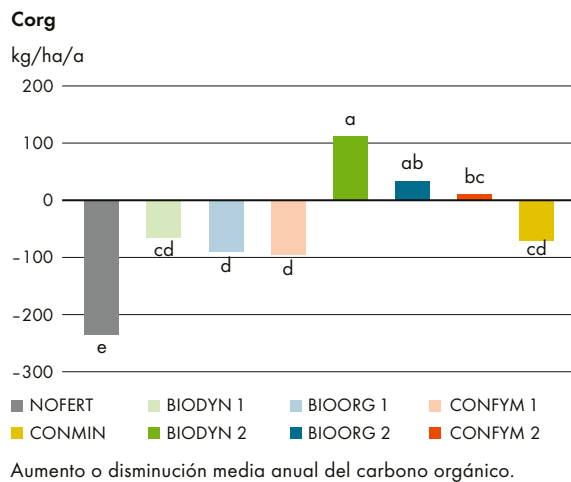
Reservas de carbono en los 20 cm superiores del suelo de los ocho sistemas de cultivo (n = 12). Estos datos se calcularon a partir del contenido de Corg y de la densidad aparente del suelo en el primer PRC. La conversión de Corg a MOS se realiza multiplicando por un factor de 1,725 ($MOS = 1,725 \times Corg$).

Cambios en las reservas de carbono

La reserva de carbono se refiere a la cantidad de carbono presente en el suelo de una zona definida. Para el ensayo DOK, se calculó para la capa superior del suelo hasta una profundidad de 20 cm por hectárea (Figura 28). La densidad aparente de una medición en el primer PRC se utilizó como base, cuando esta variable medida aún no estaba influida por los métodos de cultivo.

Entre el primer y el sexto PRC, se produjo un aumento significativo de las reservas de Corg del 12 % en BIODYN 2 y ningún cambio en las reservas en BIOORG 2 y CONFYM 2. En esta comparación, los métodos con fertilización reducida perdieron entre un 4 % (BIODYN 1) y un 9 % (BIOORG 1, CONFYM 1 y CONMIN). El sistema NOFERT sin fertilizar perdió un 22 % en comparación con la reserva de carbono del primer PRC.

Figura 29: Cambio de las reservas de carbono en el suelo

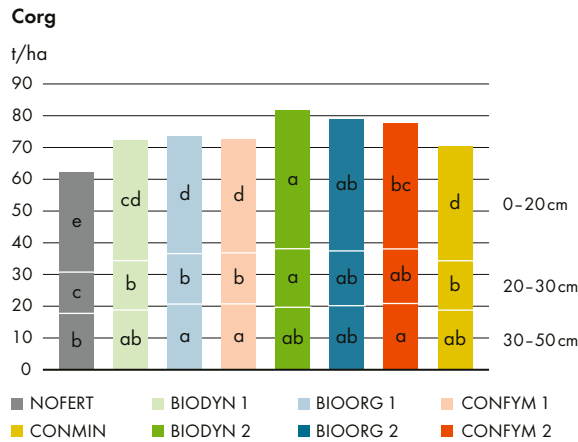


El aumento o la pérdida anual medio de las reservas de C se muestran en Figura 29. Solo los sistemas de cultivo con fertilización habitual lograron aumentar o mantener el suministro de Corg. Todos los sistemas con fertilización reducida y CONMIN tuvieron pérdidas de hasta 100 kg/ha/a. En NOFERT, las pérdidas ascendieron a 234 kg de Corg al año.

En la capa superior del suelo, de 0 a 20 cm, las diferencias entre los sistemas con respecto a Corg fueron más pronunciadas. En esta capa se encuentra la masa principal de raíces y se mezclan estiércol de granja, abono verde y residuos de cultivos. Aquí tienen lugar los procesos de conversión más intensos de la materia orgánica. Pueden ser estimuladas por el laboreo del suelo, pero también por los abonos minerales y las excreciones de las raíces. Otra parte del Corg se almacena en capas más profundas. El contenido de Corg disminuye con la profundidad porque se aporta menos materia orgánica fresca a través de las raíces o del estiércol de granja. A medida que aumenta la profundidad, la influencia del proceso también disminuye y solo es reconocible a una profundidad de 30 a 50 cm en NOFERT.

Con 81 toneladas por hectárea hasta una profundidad de 50 cm, medidas en 2019/20, el sistema BIODYN 2 logró la mayor reserva de Corg. En BIOORG 2 fue de 80,25 y en CONFYM 2 de 78,9 toneladas/ha. CONMIN, por su parte, tuvo casi nueve toneladas menos de corg que CONFYM 2. Estos dos sistemas recibieron el abono estándar y también produjeron cantidades similares de residuos de cosecha, de modo que la diferencia de nueve toneladas puede interpretarse como el efecto de la fertilización orgánica a lo largo de 35 años (CONMIN no recibió abono durante los siete primeros años).

Figura 30: Reserva de carbono orgánico



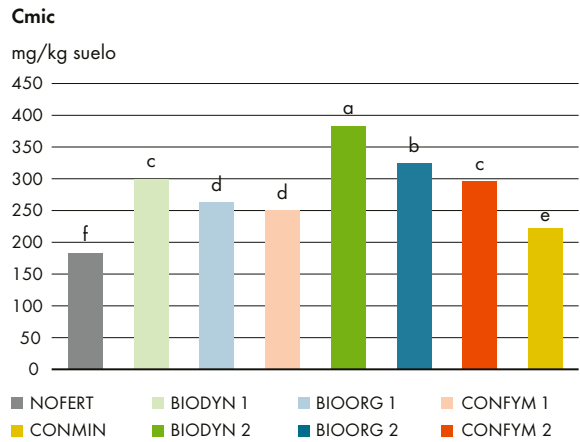
Reserva de carbono en capas del suelo de hasta 50 cm de profundidad tras 42 años de cultivo diferenciado. Las diferencias entre los sistemas disminuyen con la profundidad. Muestras de 2019 después de trigo de invierno y bajo hierba de trébol y 2020 después de trigo de invierno; n = 12.

En resumen, puede verse que solo los métodos con abono de granja estándar fueron capaces de mantener el Corg (contenido de humus) en el suelo, y que el estiércol compostado en BIODYN 2 incluso dio lugar a un aumento del humus a lo largo de 42 años. A pesar de los elevados rendimientos, el sistema convencional CONMIN, fertilizado con abonos minerales, perdió Corg, lo que resulta sorprendente si se tienen en cuenta las praderas de trébol, ricas en humus, y los abonos verdes. Sin embargo, los procesos del nivel 1 de abono también perdieron Corg con el tiempo. La reducción del laboreo del suelo y el uso de compost verde son medidas adicionales para acumular humus.

Biomasa microbiana

La biomasa microbiana está formada por organismos microscópicos del suelo, como bacterias, arqueas, microalgas y algunos hongos. Es la fracción viva de la materia orgánica del suelo. El carbono microbiano representa entre el 1 y el 3% del carbono del suelo. En esta sección, la biomasa microbiana se muestra como carbono ligado microbianamente (Cmic) (Figura 31) y en el capítulo “Dinámica de los nutrientes” como nitrógeno microbiano (Nmic) (Figura 20).

Figura 31: Biomasa microbiana



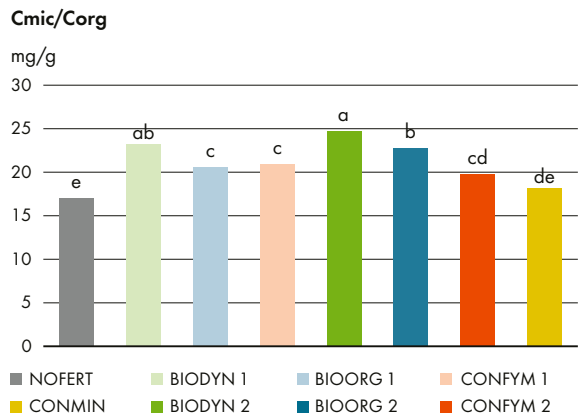
Carbono ligado microbianamente en los ocho sistemas del ensayo DOK. Valor medio de los análisis de todas las parcelas en primavera de 1998, 2006, 2012 y 2019.

El sistema BIODYN presentó la biomasa microbiana más elevada en ambos niveles de fertilizante. Por el contrario, CONMIN y NOFERT presentaron los contenidos más bajos de biomasa microbiana.

Relación entre Cmic y Corg

La proporción de microbios en el carbono orgánico se utiliza como indicador de la calidad de la materia orgánica. Este cociente muestra lo buenas que son las condiciones para el crecimiento microbiano en el suelo y es también un indicador precoz de un aumento del contenido de humus tras un cambio en la gestión (Figura 32).

Figura 32: Relación Cmic/Corg

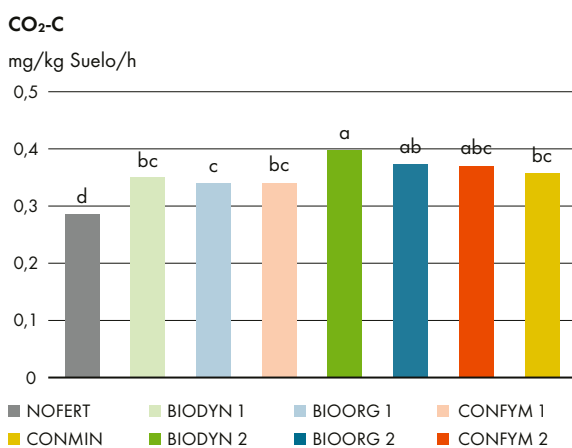


Proporción de Cmic en Corg, indicando lo adecuado que es un suelo con un alto contenido en materia orgánica como hábitat para los microorganismos.

Respiración del suelo

Los microorganismos del suelo se alimentan de la materia orgánica muerta y la descomponen en sus componentes minerales y CO₂. Este proceso es de vital importancia para el ciclo de los nutrientes. Junto con la biomasa microbiana, la respiración del suelo es uno de los parámetros edáficos más significativos. Se denomina respiración basal si se determina en condiciones normalizadas en el laboratorio. La producción de CO₂ es una medida de la actividad de los organismos del suelo, que también depende de la cantidad de fuentes de C fácilmente disponibles (Figura 33).

Figura 33: Respiración del suelo

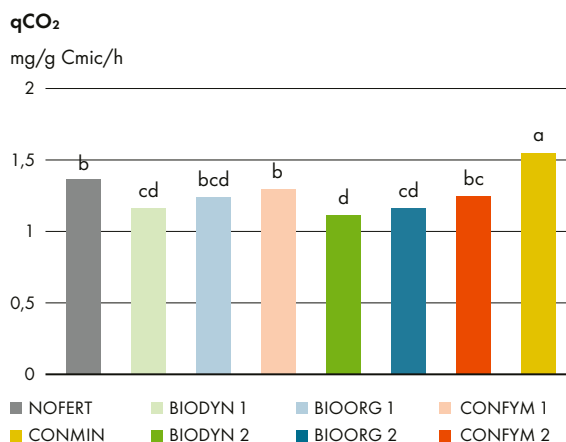


Respiración basal en los suelos del ensayo DOK. Datos del análisis de muestras de suelo de 2019. Un valor elevado indica una gran actividad de los organismos del suelo.

Cociente metabólico

La cantidad de CO₂ que necesitan los microorganismos del suelo para mantener su biomasa indica lo buenas que son sus condiciones de vida. La variable medida correspondiente es el cociente metabólico qCO₂. Cuanto más respiran los microorganismos, más energía utilizan para mantener su metabolismo. Un valor bajo indica que la comunidad de microorganismos utiliza eficazmente la energía disponible.

Figura 34: Cociente metabólico



Cociente metabólico para el CO₂ en los suelos del ensayo DOK. Datos del análisis de muestras de suelo del año 2019.

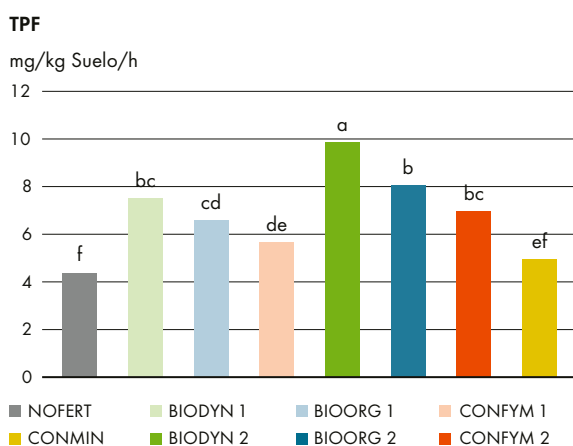
A pesar de su elevada respiración basal (Figura 33), la comunidad microbiana del suelo en BIODYN convierte la energía disponible de forma más eficaz; consume un 16 % menos de energía por unidad de biomasa para sus necesidades metabólicas que la comunidad microbiana de CONFYM (Figura 34). El sistema CONMIN tiene el cociente metabólico más alto. Esto significa que los microorganismos encuentran las mejores condiciones de vida en el sistema BIODYN y están más estresados en CONMIN.

Enzimas del suelo

Deshidrogenasas

Las enzimas del grupo de las deshidrogenasas desempeñan un papel importante en el metabolismo energético de los microorganismos. Son activos dentro de la célula y sirven como indicador de su actividad metabólica.

Figura 35:
Actividad de las deshidrogenasas



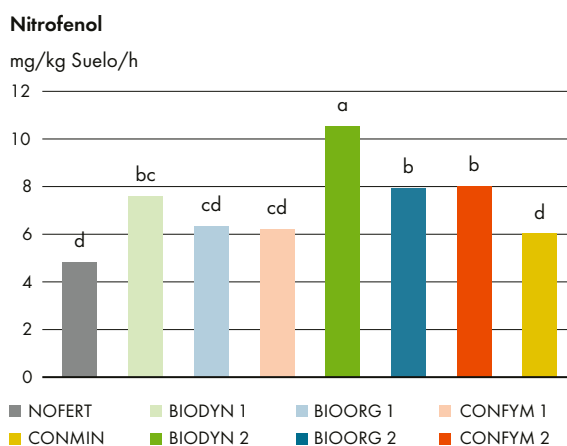
Actividad de las deshidrogenasas en los suelos del ensayo DOK. Datos del análisis de muestras de suelo 2016. Cuanto mayor sea el valor, más enzimas del grupo de las deshidrogenasas estarán activas en el suelo.

La elevada actividad de la deshidrogenasa en los procesos BIODYN muestra que en el suelo hay un número significativamente mayor de microorganismos que en los suelos de los otros procesos. Sin embargo, también puede significar que la actividad por unidad de microorganismos también es mayor.

Fosfatasa

Las plantas y los microorganismos segregan enzimas de la clase de las fosfatasa para descomponer los compuestos orgánicos de fósforo. Dado que la concentración de P disuelto en el agua del suelo es muy baja, la descomposición enzimática de los compuestos orgánicos de P puede contribuir a la nutrición de las plantas.

Figura 36:
Actividad de la fosfomonoesterasa alcalina



Actividad de la fosfomonoesterasa alcalina en el ensayo DOK. Datos del análisis de muestras de suelo 2019. Cuanto mayor sea el valor, más enzimas del grupo de las estarán activas en el suelo.

La actividad de las fosfatasa depende en gran medida de los sistemas de cultivo. La alta actividad de las fosfatasa en el sistema BIODYN muestra un alto potencial para descomponer compuestos orgánicos de fósforo, haciendo que el P liberado esté disponible para las plantas.

En resumen: Calidad del suelo

Tras 20 años de cultivo convencional, el pH del suelo había bajado tanto que hubo que corregirlo encalándolo. Los suelos de los sistemas ecológicos mostraron una menor tendencia compactación y una mejor estabilidad estructural que los de los sistemas convencionales. El contenido y las reservas de carbono orgánico fueron constantes en los sistemas con fertilización estándar y estiércol de granja. Sin abono orgánico o con una fertilización reducida, el suelo ha perdido carbono orgánico. Con la aplicación de compost de estiércol, el proceso BIODYN 2 logró contenidos de carbono orgánico significativamente más altos que todos los demás sistemas. La biomasa microbiana, su actividad y eficiencia fueron significativamente mayores en los sistemas ecológicos que en los convencionales. Todos los indicadores de fertilidad del suelo mostraron mejores valores en los sistemas ecológicos y especialmente en el sistema BIODYN. La fertilidad del suelo de BIODYN con fertilización reducida alcanzó o superó la de CONFYM con fertilización estándar.

Biodiversidad

En varios ámbitos, la actividad humana y económica ha hecho que se sobrepasen los límites de nuestro planeta. Esto se aplica en particular a la pérdida de biodiversidad.

El ensayo DOK con sus parcelas de 100 m² solo permite hacer afirmaciones sobre la frecuencia y la actividad de las especies que habitan en esta zona. No obstante, algunas especies tienen un radio de acción mayor que las dimensiones de la parcela en función del tamaño y su movilidad.

Por ello, el ensayo DOK se centró en las lombrices de tierra, los microorganismos y las de malas hierbas. Sorprendentemente, sin embargo, también se produjeron grandes efectos sobre los animales que habitan principalmente en la superficie del suelo, a pesar de que estos organismos pueden recorrer distancias considerables cada día.

Al analizar la flora vegetal, también cabe esperar una influencia en las parcelas vecinas debido a la dispersión de semillas.

Banco de semillas de malas hierbas

Como resultado de la gestión específica de los sistemas del DOK, la población de la flora arvensel ha cambiado. Cada cultivo tiene su propia flora arvensel y cada estación hace aflorar plantas diferentes en el campo. El análisis del banco de semillas del suelo es, por tanto, un método interesante que proporciona información sobre la emergencia de plántulas de malas hierbas a partir de semillas producidas a lo largo de periodos de tiempo más prolongados.

Tabla 13: Número de semillas y número de especies arvenses

	Reserva de semillas			
	Tipos		Semilla/m ²	
BIODYN 2	42	114%	14 413	233%
BIOORG 2	40	108%	19 622	317%
CONFYM 2	37	100%	6195	100%
CONMIN	33	89%	8404	136%
NOFERT	44	119%	69 468	1121%

La flora arvensel cumple importantes funciones en el ecosistema: Proporciona refugio y alimento a los insectos beneficiosos, protege el suelo de la compactación y la erosión y también sirve para absorber el nitrógeno mineralizado tras la cosecha y protegerlo así de la lixiviación. Además, también liberan compuestos de carbono al suelo a través de sus exudados radiculares y sus raíces.



Amapola de maíz en las parcelas de trigo de invierno del ensayo DOK.

Las malas hierbas son un componente importante de la biodiversidad en los paisajes agrícolas, a menudo monótonos, e importantes huéspedes intermediarios para los hongos simbióticos de las raíces (micorrizas).

Sin embargo, también existe un riesgo considerable de infestación de malas hierbas o cultivos debido a la elevada reserva de semillas. Además de la rotación de cultivos, que suprime muchas malas hierbas con dos años de pradera de, la escarda y la grada fueron capaces de limitar la competencia de malas hierbas en los sistemas ecológicos. La soja es una excepción: En las parcelas ecológicas, las malas hierbas también se eliminan a mano con regularidad (aprox. 25 h/ha).

Debido a la ausencia de herbicidas y a la menor densidad de los cultivos, se encontraron más especies en las parcelas gestionadas ecológicamente que en las convencionales. En términos de número de semillas germinables por unidad de superficie, las parcelas ecológicas tienen entre dos y tres veces más semillas en el suelo que las parcelas convencionales. Por tanto, en los sistemas ecológicos se ha formado una reserva de semillas que hay que vigilar.

Animales del suelo

Lombrices de tierra

Son los animales más conocidos entre los invertebrados que viven en el suelo. El hábitat de las especies excavadoras profundas se extiende hasta una profundidad de aproximadamente un metro en los suelos profundos de loess del ensayo DOK. Hay cavidades en las que el gusano se refugia cuando la superficie está demasiado seca o hace demasiado frío.

Las lombrices de tierra pueden clasificarse en grupos ecológicos en función de su hábitat preferido:

- Las especies epigeas viven bajo la superficie del suelo, donde se alimentan principalmente de heces de animales y material vegetal muerto. Son de color oscuro para protegerlas de la radiación UV.
- Las especies endogeas viven en la parte superior del suelo mineral. Son pálidas y casi transparentes, ya que rara vez salen a la superficie.
- Las formas anécicas son excavadoras verticales y también buscan capas de suelo más profundas, de un metro y más. Estas especies favorecen la mezcla del suelo mineral con el humus y arrastran los residuos vegetales y el estiércol hacia el suelo.



La recogida de lombrices mediante selección manual o expulsión requiere mucho tiempo y, debido a su actividad, solo tiene sentido en primavera u otoño.

La biomasa de lombrices de tierra en el ensayo DOK está dominada por especies anécicas, que son relativamente grandes y, por tanto, van por detrás de las especies endogeas, relativamente pequeñas, en cuanto a su número.

La metodología de recogida de datos con extracción y selección manual e identificación de los animales es muy compleja. Además, la metodología comporta que parcelas DOK sufran una intensa perturbación. Por lo tanto, solo fue posible realizar estos análisis para algunos de los sistemas. La dinámica de las lombrices de tierra es muy amplia tanto a lo largo del año como del día y depende en gran medida de la humedad y la temperatura.

Tabla 14: Número y biomasa de lombrices de tierra en las parcelas DOK entre 1990 y 1991, 2001 y 2005

	Lombrices de tierra 1990, 1991				Lombrices de tierra 2001–2005			
	Cantidad (ind./m ²)		Biomasa (g/m ²)		Cantidad (ind./m ²)		Biomasa (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 %

Hasta 1998, los sistemas convencionales seguían utilizando productos de protección vegetal muy tóxicos para las lombrices (carbendazima, dinoseb, metiocarb). Por lo tanto, los primeros estudios muestran un número y una biomasa de lombrices de tierra significativamente inferiores en estos sistemas. El cambio a la producción integrada con el inicio de la tercera rotación de cultivos y la eliminación

progresiva de muchos de los antiguos productos altamente tóxicos es la explicación más probable de la recuperación de las poblaciones de lombrices en CONFYM y CONMIN. Por otra parte, el encalado entre 1999 y 2005 y el cambio a abonos nitrogenados alcalinos también pueden haber influido positivamente en el hábitat de las lombrices.

Escarabajos de tierra y estafilínidos

Los escarabajos de tierra y los estafilínidos pertenecen a dos familias del orden de los coleópteros. Muchas de sus especies aún no se han investigado en detalle. El nivel de conocimientos sobre la autoecología de los escarabajos de tierra es mayor que el de los estafilínidos. La densidad de actividad de estos animales se determina con ayuda de trampas de intercepción situadas en el suelo del campo. Como los animales son muy móviles, no pueden asignarse directamente a una zona pequeña. Sin embargo, la frecuencia con la que visitan una parcela puede estimarse fácilmente a partir de las cifras de capturas.



Los grandes escarabajos de tierra voraces comen hasta 2,5 veces su propio peso al día.

Tabla 15: Frecuencia de escarabajos de tierra y estafilínidos en parcelas de trigo de invierno

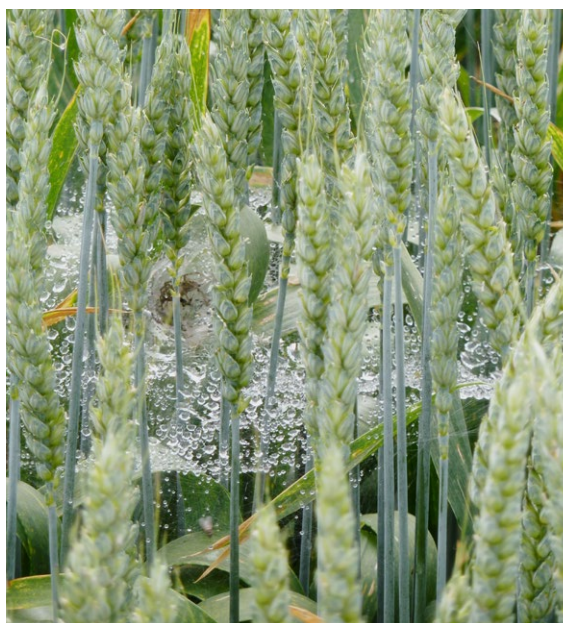
	Individuos de escarabajo de tierra						Individuos de estafilínidos					
	1988		1990		1991		1988		1990		1991	
BIODYN 2	208	a	72	a	60	a	42	a	58	a	20	a
BIOORG 2	156	ab	75	a	57	a	44	a	50	a	17	a
CONFYM 2	89	b	46	b	31	a	20	b	33	b	15	a

Las abundancias medias a lo largo del año de estos dos grupos de animales en las parcelas ecológicas son de aproximadamente el doble que en las parcelas convencionales. Los escarabajos de tierra amantes del calor y la sequedad y los que se alimentan principalmente de semillas se encontraron con más frecuencia en zonas orgánicas. Los escarabajos depredadores son importantes en el campo para controlar plagas como los pulgones. Ya están activos en primavera cuando las mariquitas son menos eficaces para controlar las plagas a temperaturas más bajas.

Tabla 16: Densidad de arañas en individuos por m²

	Arañas tejedoras		Arañas depredadoras	
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

Los sistemas ecológicos tienen una densidad significativamente mayor de arañas. Las arañas depredadoras son casi el doble de comunes en las parcelas ecológicas que en las convencionales.



Una araña tejedora en una parcela de trigo DOK.

Nematodos

Los nematodos o gusanos filamentosos es uno de los filo de animales más ricos y extendidos. Debido a las especializaciones morfológicas de las distintas especies de nematodos, pueden ocupar una gran variedad de nichos ecológicos. Desempeñan un papel clave en la regulación de los ciclos biogeoquímicos y los procesos ecosistémicos. Ejemplos de ello son la mineralización y la acumulación de materia orgánica en el suelo.

Sin embargo, algunas especies individuales pueden causar daños a los cultivos, en parte debido a su estilo de vida parasitario. Debido a su gran diversidad, la composición de la comunidad de nematodos puede utilizarse como un importante indicador de las condiciones ambientales y ecológicas.



Los nematodos son fáciles de reconocer al microscopio.

Tabla 17: Número de nematodos en individuos por m²

	Bacterívoros		Herbívoros		Fungívoros		Omnívoros	
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

Los estudios realizados en el ensayo DOK muestran que tanto el número de especies como la biomasa de nematodos dependen en gran medida de la fertilización orgánica. Los nematodos, cuya fuente de alimentación preferida son las bacterias y los residuos vegetales, aparecen con mucha más frecuencia en los sistemas fertilizados orgánicamente. Los nematodos, que viven de los hongos, se encuentran con más frecuencia en los métodos fertilizados con minerales. Apenas se encontraron diferencias entre los sistemas con abonos orgánicos.

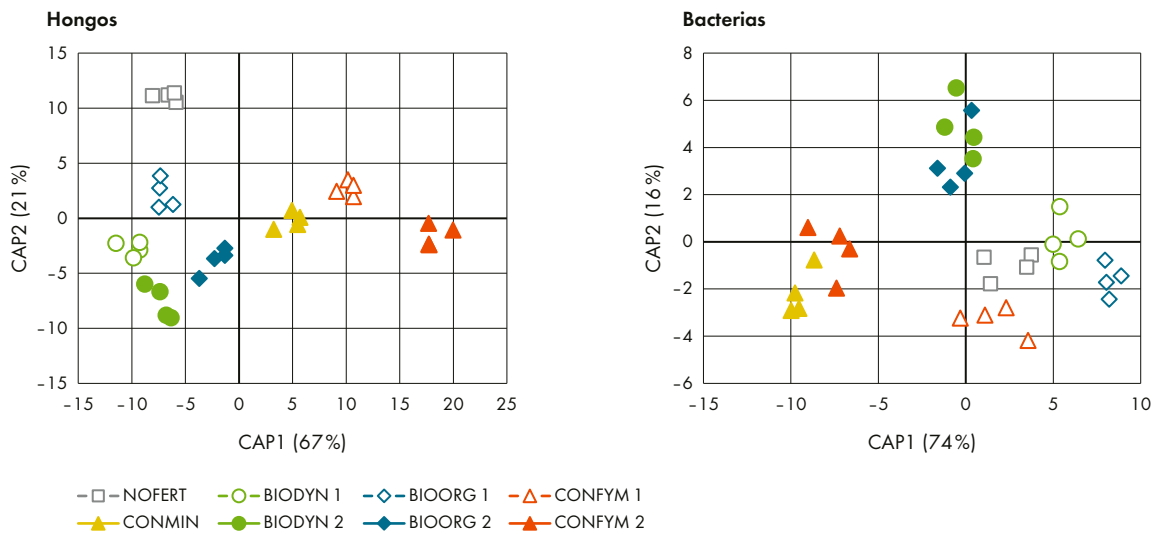
Diversidad de microorganismos

Las bacterias y los hongos son organismos extremadamente adaptables que muestran una gran diversidad en el suelo y colonizan los hábitats más pequeños del espacio poroso del suelo. Pueden describirse en función de su genética, su aspecto y su funcio-

nalidad. Muchos de los hongos y bacterias viven en interacción con otros microorganismos y forman comunidades en las que las diferentes vías metabólicas y estilos de vida se apoyan mutuamente.

Entre las propiedades importantes del suelo que afectan a su diversidad microbiana se encuentran el pH, el carbono y la textura. En el ensayo DOK cada sistema muestra una propia estructura comunitaria de hongos y bacterias. (Figura 37). Los hongos del suelo muestran una mayor sensibilidad al tipo de sistema agrícola. Esto se desprende de la estrecha agrupación espacial de los tres sistemas BIODYN, BIOORG y CONFYM (Figura 37). Las bacterias, a su vez, se ven influidas principalmente por la intensidad de la fertilización, como muestra la estrecha agrupación espacial de los sistemas con un nivel de fertilización menor (nivel 1) junto con el control no fertilizado.

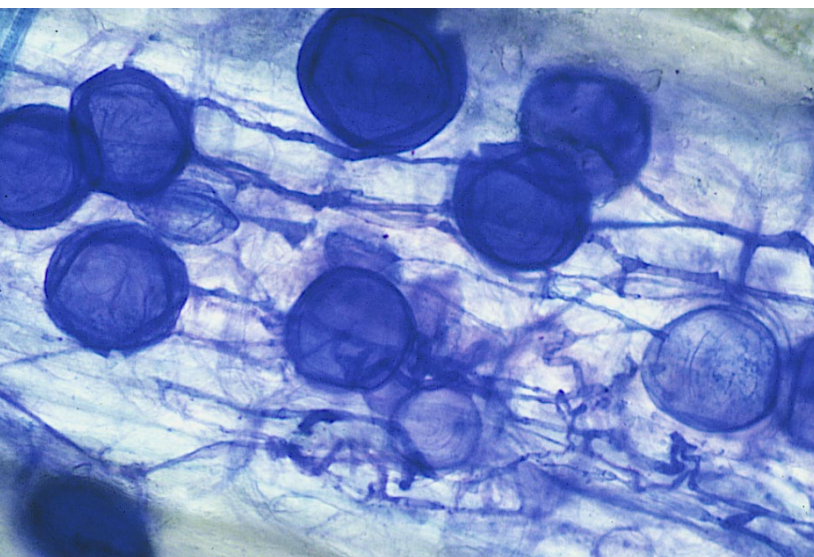
Figura 37: Estructura de la comunidad de hongos y bacterias del suelo



Estructura de la comunidad de hongos (izquierda) y bacterias del suelo (derecha) en el ensayo DOK. El diagrama muestra las similitudes entre las comunidades de microorganismos del suelo identificados a partir de genes marcadores. Cada punto corresponde a la estructura de la comunidad de una parcela (campo C). Cuanto más cerca estén los puntos, más similar será la estructura. Cuanto más separados estén los puntos, más diferente será la estructura de la comunidad.



Las malas hierbas en las parcelas de trigo pueden proteger el suelo de la lixiviación.



Simbiosis entre hongos micorrízicos y leguminosas: Se pueden observar órganos de reserva del hongo (vesículas) e hifas dentro de la corteza de la raíz.

La actividad metabólica de hongos y bacterias es crucial para muchos servicios ecosistémicos que proporciona el suelo. Por el contrario, los hongos y las bacterias garantizan suelos fértiles con una gran capacidad de almacenamiento.

Los hongos simbióticos, las micorrizas, permiten a las plantas cultivadas ampliar varias veces el radio de captación de nutrientes y agua en el suelo y asegurar así su suministro. Las llamadas endomicorrizas de la corteza radicular son relativamente

cíficas y pueden colonizar varias familias y géneros de plantas. Esto también las convierte en puentes entre las redes de raíces de diferentes especies de plantas en el suelo; incluso las plantas herbáceas y leñosas están conectadas a través de hilos fúngicos (hifas) y así intercambian carbohidratos y minerales.

En el ensayo DOK, se demostró una elevada colonización de las plantas cultivadas con hongos micorrízicos, sobre todo en los sistemas ecológicos y el no fertilizado. Los sistemas con fertilización mineral mostraron una clara disminución de la actividad simbiótica entre el hongo y la planta de cultivo. Esto puede estar relacionado con la disminución de la diversidad de las comunidades de hongos micorrízicos.

En un ensayo para simular la sequía en el ensayo DOK, se demostró un aumento de la abundancia de micorrizas en un sistema ecológico en comparación con uno convencional, mientras que otros indicadores ecológicos del suelo no se vieron afectados. En el sistema BIODYN, los hongos micorrízicos eran tres veces más frecuentes en condiciones secas que en el sistema CONMIN convencional. En un proyecto actual se están investigando los efectos sobre el equilibrio hídrico de las plantas. No todas las plantas cultivadas dependen de los hongos simbióticos. Sin embargo, sin micorrizas, el cultivo se vuelve más dependiente de los fertilizantes solubles y de los productos de protección vegetal. A largo plazo, la reducción de la actividad de los microorganismos del suelo provoca una pérdida de su estructura y de su calidad.

En resumen: Biodiversidad

El tamaño de las parcelas experimentales del ensayo DOK restringe la selección de especies e indicadores de biodiversidad. La diversidad vegetal en los sistemas ecológicos mostró más especies y de dos a tres veces más semillas en el suelo que en los sistemas convencionales. Los escarabajos de tierra, los estafilínidos y las arañas eran aproximadamente el doble de comunes en las parcelas ecológicas que en las convencionales. La fertilización orgánica favorece el número y la composición de especies de nematodos, que se alimentan de bacterias y plantas. Los nematodos, que se alimentan principalmente de hongos, se encontraron en mayor número en el sistema CONMIN. Los hongos y las bacterias del suelo tienen una composición muy diferente en cada uno de los sistemas: Las bacterias se vieron más influidas por la intensidad de la fertilización y los hongos más por las diferencias entre sistemas. Los hongos micorrízicos de las plantas cultivadas se detectaron con mayor frecuencia en los sistemas ecológicos y no fertilizado. Su masa aumentó en condiciones de estrés por sequía, sobre todo en BIODYN.

Cambio climático

El sector agrario es responsable de cerca del 14 % de las emisiones suizas de gases de efecto invernadero, por lo que contribuye de forma significativa al cambio climático. Al mismo tiempo, sin embargo, la agricultura también se ve gravemente afectada por el cambio climático. Las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero están aumentando y también se prevé que la probabilidad de sequías estivales unidas a fuertes tormentas aumente significativamente en Europa Central. Por tanto, la agricultura debe desarrollar tanto estrategias de mitigación climática para reducir los gases de efecto invernadero como estrategias de adaptación climática para aumentar la resiliencia ante condiciones meteorológicas inestables.

Adaptación al clima mediante la acumulación de humus

Las medidas que conducen a una mejor adaptación de la agricultura a las consecuencias del cambio climático suelen servir también para mejorar la calidad del suelo y la biodiversidad.

Un ejemplo son los métodos para acumular humus. Al acumular y estabilizar el humus, se elimina carbono de la atmósfera y se mejora la calidad del suelo. En el ensayo DOK, la evolución del contenido de humus ha sido objeto de seguimiento durante más de 40 años. Se comprobó que el contenido de humus solo podía mantenerse estable o aumentar

con la fertilización orgánica. La acumulación de humus es especialmente pronunciada en el sistema biodinámico, aunque la cantidad de abono orgánico aplicado aquí como estiércol compostado fue la más baja (véase el capítulo “El ensayo”). A pesar de la pérdida de carbono y nitrógeno durante el proceso de compostaje, la calidad del abono aplicado parece ser el factor decisivo para la estabilidad del carbono en el suelo. Al acumular carbono en el suelo, el uso de sistemas ecológicos puede ser una estrategia de mitigación del impacto climático y de adaptación al mismo. Sin embargo, el aumento del carbono del suelo es muy lento.

Comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero más importantes procedentes de la agricultura son el dióxido de carbono CO_2 , el óxido nitroso N_2O y el metano CH_4 . Estos tres gases se convierten en equivalentes de CO_2 para evaluar su impacto en el clima: El óxido nitroso tiene un factor de 300 y el metano un factor de 28. El óxido nitroso permanece más tiempo en la atmósfera y tiene un impacto climático 300 veces mayor.

Debido al elevado impacto climático del N_2O , las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con el nitrógeno desempeñan un papel decisivo en la evaluación climática de los cultivos



Daños por granizo en las parcelas de maíz del ensayo DOK en 2022.

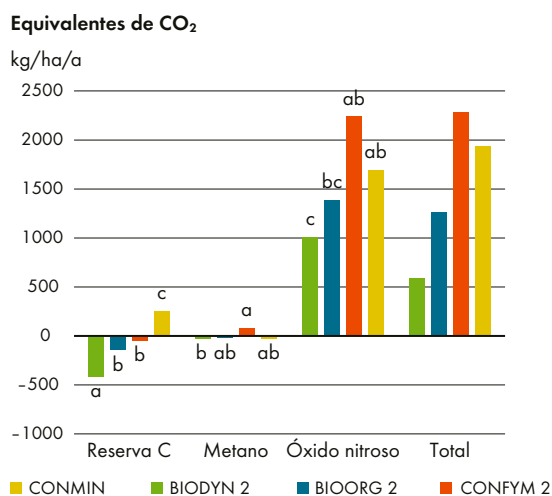
herbáceos con suelos bien aireados. A partir de 2012, se midieron las emisiones de N₂O y CH₄ durante 571 días praderas de trébol, maíz y abono verde y se compararon con la tasa media de cambio en las reservas de carbono del suelo (Figura 38). Las emisiones de N₂O más elevadas se midieron en el sistema convencional con estiércol de granja y abono mineral. La elevada aplicación de nitrógeno en el maíz fue probablemente el factor decisivo para el elevado efecto climático del proceso durante el periodo de medición. Evitar el nitrógeno mineral, un pH del suelo estable y una buena estructura del suelo son factores importantes que contribuyen a minimizar las emisiones de N₂O en los sistemas ecológicos.

Cabe destacar que el aumento de las reservas de carbono se observó en el sistema biodinámico junto con las menores emisiones de N₂O. Este resultado demuestra que el aumento del contenido de carbono del suelo con una estrategia de fertilización adaptada no conlleva necesariamente un aumento de las emisiones de N₂O. En relación con la superficie, se midieron un 44 % menos de emisiones de gases de efecto invernadero en BIOORG 2 y un 63 % menos en BIODYN 2 que en el sistema convencional, en cada caso con fertilización estándar.

Resistencia as estrés por sequía

El comportamiento de los sistemas de cultivo bajo estrés por sequía es una cuestión importante para su capacidad de adaptación al cambio climático. En la comparación experimental, la comunidad bacteriana más diversa en el suelo de BIOORG 2 significó que el estrés por sequía tuvo menos efecto sobre la actividad de las proteasas y la mineralización del N que en CONMIN. Como resultado, las plantas del BIOORG 2 se desarrollaron significativamente mejor en condiciones de estrés por sequía.

Figura 38: Impacto climático de los suelos del ensayo DOK



Equivalentes de CO₂ de los sistemas de cultivo totalmente fertilizados, mostrados para los cambios en el carbono orgánico del suelo (MOS, humus) a lo largo de los 42 años y las emisiones de óxido nitroso y metano de una campaña de medición de casi dos años bajo trébol, maíz y abono verde en el sexto PRC.

Los estudios actuales del DOK muestran que la evaporación directa del suelo es casi la misma en los sistemas de cultivo, al igual que la profundidad a la que las plantas extraen el agua. Sin embargo, la humedad del suelo en la zona radicular fue significativamente mayor en los sistemas ecológicos y las plantas pudieron utilizar el agua de forma más eficiente. Los resultados sugieren que los sistemas ecológicos presentan ventajas en la eficiencia agronómica del uso del agua y son más resistentes al estrés por sequía. Esto se está analizando en profundidad en dos grandes proyectos en curso.

En resumen: Cambio climático

De los distintos sistemas de cultivo, solo el sistema biodinámico con fertilización habitual almacenó carbono orgánico adicional en el suelo. El sistema BIODYN también registró las emisiones más bajas de óxido nitroso. Las elevadas tasas de emisión en CONFYM 2 y CONMIN se deben a la elevada fertilización nitrogenada. En conjunto, las emisiones de gases de efecto invernadero en BIODYN fueron un 63 % y en BIOORG un 44 % inferiores por unidad de superficie que en CONFYM, en cada caso con fertilización estándar. Durante los periodos secos, la comunidad bacteriana más diversa permanece activa durante más tiempo en las parcelas de agricultura ecológica, lo que puede tener un efecto positivo en la mineralización del nitrógeno y, por tanto, en el crecimiento de las plantas.

Agradecimientos

Gracias a la financiación a largo plazo del ensayo por parte de la Oficina Federal de Agricultura Suiza FOAG y a los incansables esfuerzos de los directores del ensayo de FiBL y Agroscope, a la energía de los equipos de campo y a la lealtad del grupo asesor de agricultores, el ensayo ha sobrevivido a seis periodos de rotación de cultivos de siete años cada uno y sigue aportando respuestas y nuevas preguntas a los proyectos de investigación agrícola y medioambiental. Los científicos utilizan intensamente este ensayo en proyectos financiados por la Fundación Nacional Suiza para la Ciencia, la Comisión Europea, la Oficina Federal de Medio Ambiente y muchas otras organizaciones de financiación.

Gracias por su generoso apoyo financiero

- Oficina Federal de Agricultura FOAG
- Oficina Federal de Medio Ambiente FOEN
- Fundación Nacional Suiza para la Ciencia
- Fondo Coop para la Sostenibilidad
- Comisión Europea

Gracias por la colaboración

- Agroscope
- ETH Zürich
- Uni Basel

Gracias por arrendar las valiosas zonas de ensayos agrícolas

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

Gracias a los empleados de Agroscope y FiBL

Jefe del ensayo DOK, Agroscope

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

Equipo de campo y gestión de datos Agroscope

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

Jefe del ensayo DOK, FiBL

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

Equipo de campo y gestión de datos FiBL

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

Gracias a los agricultores asesores, miembros del grupo de apoyo DOK

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

Agradecimientos a los colaboradores

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

Gracias a todos los científicos participantes y a los empleados de campo y laboratorio por su valioso trabajo de investigación

[†] fallecido

Publicaciones del ensayo DOK (revisadas por pares)

Publicaciones científicas

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., Gattinger, 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 Zoebel 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., Gättinger, 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., Gättinger, A., Müller, 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.

Capítulo de 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 International.
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. Ranggner, 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 International.
11. Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Jossi, W., Widmer, F., Oberson, A., Frossard, E., Oehl, F., Wiemken, A., Gättinger, 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).

Abreviaturas y explicaciones

a	Año	n	Tamaño de la muestra
Artrópodo	Artrópodos: Insectos, milpiés, crustáceos, arácnidos	N	Nitrógeno
Bacterívoro	Se alimenta de bacterias	N ₂	Nitrógeno atmosférico molecular
BODYN	Proceso DOK según los principios biodinámicos	N ₂ O	Óxido nitroso
BIOORG	Proceso DOK según los principios bio-orgánicos	NFP	Programa Nacional Suizo de Investigación
BT	<i>Bacillus thuringiensis</i> , los preparados BT contienen esporas o toxinas de la bacteria	NIR	Espectroscopia de infrarrojo cercano
C	Carbono	NIV	Nivalenol, una micotoxina
CaO	Cal viva, químicamente óxido de calcio	Nmic	Nitrógeno ligado a microbios
CH ₄	Metano	Nmin	Nitrógeno mineral procedente del amonio y el nitrato
Ciclo	En el ensayo DOK, los cultivos se distribuyen en tres campos escalonados: A, B, C	NMR	"nuclear magnetic resonance" = espectroscopia de resonancia magnética nuclear
Cmic	Carbono ligado a microbios	Ntotal	Nitrógeno total
Cmic/Corg	Relación entre carbono microbiano y carbono orgánico	NOFERT	Sistema DOK sin fertilización
C/N	Relación entre carbono y nitrógeno	NUE	Eficacia de la utilización del nitrógeno
CO ₂	Dióxido de carbono	Omnívoro	Que se alimenta de toda clase de sustancias orgánicas
Corg	Carbono orgánico	P	Fósforo
CONFYM	Sistema del DOK "conventional with farm yard manure" = convencional con estiércol de granja	P ₂ O ₅	Difosforpentóxido
CONMIN	DOK sistema convencional solo con abono mineral	Parcela	Unidad con el mismo procedimiento dentro del ensayo DOK
DE	Desviación estándar	PLFA	Patrones de ácidos grasos fosfolípidos y lípidos etéreos
Deshidrogenasas	Grupo enzimático de la cadena respiratoria de los microorganismos	PRC	Periodo de rotación de cultivos, en el ensayo 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
DOK	Dinámico, orgánico, convencional. Forma abreviada para el ensayo DOK con sistemas de cultivo biodinámico, bio-orgánico y convencional	PSM	Productos de protección vegetal
DON	Deoxinivalenol, una micotoxina	qCO ₂	Cociente metabólico: Un valor bajo indica que la comunidad de microorganismos utiliza eficazmente la energía disponible
Fertilización	Estiércol de granja en el ensayo DOK reducido = 1 = 0,7 UFO práctica estándar = 2 = 1,4 UFO	Remolacha	Betarraga
Fungívoro	Se alimenta de hongos	Réplica	Repeticiones de las unidades de ensayo
GRUD	Principios para la fertilización de los cultivos agrícolas en Suiza (2017)	Respiración basal	Respiración del suelo en condiciones estándar
Herbívoro	Se alimenta de plantas	Respiración del suelo	CO ₂ emitido por microorganismos
IP	Producción integrada	RFLP	Polimorfismo de longitud de fragmentos de restricción
K	Potasio	Rizodeposición	Aportes de las raíces y sustancias liberadas por éstas al suelo
Metabolito	Productos de reacciones catalizadas por enzimas	SIMS	Espectrometría de masas de iones secundarios
Metagenómica	El material genético se extrae directamente de muestras ambientales, se secuencian y se analizan	SNF	Fundación Nacional Suiza para la Ciencia
MO	Materia orgánica	t	Toneladas
MOS	Materia orgánica del suelo = Humus = 1,725 × Corg.	TPF	Trifenilformazán, colorante indicador
MS	Materia seca	UFO	Unidad de fertilizante orgánico (de granja). 1 UFO corresponde a la excreción anual de 105 kg de N y 15 kg de P ₂ O ₅
		15N	Isótopo estable del nitrógeno
		32P, 33P	Isótopos radiactivos del fósforo



Aviso legal

Editorial

Instituto de Investigación de Agricultura Orgánica FiBL
Ackerstrasse 113 , CP 219, 5070 Frick, Suiza
Tel. +41 (0)62 865 72 72
info.suisse@fibl.org, www.fibl.org

En colaboración con Agroscope y ETH Zurich

Autores: Andreas Fliessbach, Hans-Martin Krause (FiBL Suiza),
Klaus Jarosch, Jochen Mayer (Agroscope), Astrid Oberson (ETH Zúrich), Paul Mäder (FiBL Suiza)

Redacción: Vanessa Gabel, Simona Moosmann (FiBL Suiza)

Traducción: Sero Communications, F. Xavier Sans Serra

Revisión: Anna Bieber (FiBL Suiza)

Maquetación: Brigitta Maurer (FiBL Suiza)

Fotos: Thomas Alföldi (FiBL Suiza): p. 16, 22, 32; Andreas Fliessbach (FiBL Suiza): p. 1, 6, 8, 12, 18, 2, 24, 37, 39 (2); Tibor Fuchs: Foto de portada, p. 9; Dominika Kundel (FiBL Suiza): p. 13, 19, 41; Adrian Lustenberger: p. 27, 43; Paul Mäder (FiBL Suiza) S.21, 42; Simona Moosmann (FiBL Suiza): p. 8, 23, 38; Lukas Pfiffner (FiBL Suiza): p. 39 (1); FiBL p. 20, 28, 52, Wikimedia (CSIRO, CC BY 3.0), p. 40, Plataforma de geoinformación de la Confederación Helvética: p. 7

Permalink: orgrprints.org/id/eprint/54403/

Nº de pedido de FiBL: 1264

Cita sugerida: Fliessbach A., Krause H-M., Jarosch K., Mayer J., Oberson A., & Mäder, P. (2023). El ensayo DOK: Comparación de los sistemas de cultivo ecológico y convencional durante 45 años. Instituto de Investigación de Agricultura Orgánica FiBL, Frick.

Toda la información de este dossier se basa en los mejores conocimientos y experiencia de los autores. A pesar del máximo cuidado, no se pueden descartar imprecisiones y errores de aplicación. Por lo tanto, los autores y editores no pueden aceptar responsabilidad alguna por cualquier inexactitud en el contenido o por cualquier daño derivado de seguir las recomendaciones.

2024 © FiBL

La totalidad de esta publicación está protegida por derechos de autor. Cualquier uso sin la aprobación del editor está penado por la ley. Esto se aplica en particular a las reproducciones, traducciones, microfilmaciones y a la alimentación y procesamiento con cualquier sistema electrónico.