

Erhaltung der Nachhaltigkeit in Ackerbausystemen: Bilanz aus 50 Versuchsjahren in Changins

Sokrat Sinaj und Bernard Jeangros

Agroscope, 1260 Nyon, Schweiz

Auskünfte: Sokrat Sinaj, E-Mail: sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch



Langzeitversuch auf der Parzelle P24A zu den Auswirkungen von organischen Düngern und der Stickstoffdüngung auf die Bodeneigenschaften und den Ertrag der Kulturen. (Foto: Carole Parodi, Agroscope)

Einleitung

In den Industrieländern haben der wirtschaftliche Druck und die leichte Verfügbarkeit von Kunstdüngern zahlreiche Landwirtschaftsbetriebe dazu gebracht, auf den Mischbetrieb mit Ackerbau und Viehhaltung zu verzichten und sich zu spezialisieren. Dadurch verschwinden bei der Bewirtschaftung von Ackerkulturen die Wiesen in der Fruchtfolge und der Einsatz von Hofdünger.

Die Nachhaltigkeit von Anbausystemen beruht zum Grossteil auf der langfristigen Aufrechterhaltung der Bodenfruchtbarkeit. Der Begriff Bodenfruchtbarkeit wird aber sehr unterschiedlich verstanden. Für einige bezeichnet er einfach die Kapazität des Bodens, hochwertige Ernten für künftige Generationen nachhaltig zu produzieren. Für andere geht es um die Kapazität des Bodens, die physikalischen, chemischen und biologischen Bedingungen sicherzustellen, die für das Wachstum der Pflanzen, ihre Produktivität, ihre Vermehrung und ihre Qualität erforderlich sind. Dies muss an die Art der Pflanze, den Bodentyp und die klimatischen Be-

dingungen angepasst sein (Abbott und Murphy 2003). Einfacher ausgedrückt: Der Boden ist fruchtbar, wenn er seine Funktionen bei den lokalen Gegebenheiten zu erfüllen vermag. Schliesslich ist im Sinne des biologischen Anbaus die Bodenfruchtbarkeit das Ergebnis biologischer Prozesse und nicht der Verfügbarkeit von chemischen Elementen. Fruchtbare Böden tauschen aktiv mit den Pflanzen Stoffe aus und sind in der Lage, sich selbst zu strukturieren und zu regenerieren (Autorenteam 2013).

In den Sechzigerjahren wurden im Versuchsbetrieb in Changins verschiedene Versuche eingerichtet, um die langfristigen Auswirkungen verschiedener Anbaumethoden auf die Bodenfruchtbarkeit und den Ertrag von Ackerkulturen zu untersuchen. Als Schlüsselparameter für zahlreiche chemische, physikalische und biologische Eigenschaften des Bodens wurde seinem Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Dabei wurde insbesondere untersucht, ob sich mit einer Reduktion der Bodenbearbeitung, einer systematischen Rückführung des Getreidestrohs oder dem Einsatz von Gründüngern der Verzicht auf Hofdünger kompensieren und der Gehalt des Bodens an C_{org} aufrechterhalten lässt. In diesem Artikel sind die wichtigsten Ergebnisse aus fünf Versuchen zu diesem Thema zusammengefasst, wobei jeder dieser Versuche bereits Gegenstand spezifischer Publikationen war, die in dieser Fachzeitschrift oder in internationalen wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht wurden.

Material und Methoden

Klimatische Bedingungen in Changins (1963–2017)

Von 1963 bis 2017 schwankte die mittlere Jahresmitteltemperatur (Januar–Dezember) in Changins (Höhe 420 m) zwischen 9,0°C (1965) und 11,5°C (2015). Im Durchschnitt erreichte sie 10,2°C und die mittlere Temperaturzunahme während diesen 55 Jahren lag bei +1,8°C. Die Jahresniederschläge schwankten zwischen den einzelnen Jahren stark und lagen zwischen 1400

(1965) und 650 mm (1989) bei einem Durchschnitt von 1000 mm. Bei den Jahresniederschlägen lässt sich kein signifikanter Trend feststellen.

Bodeneigenschaften

Die wichtigsten Eigenschaften des Bodens, wo die fünf Versuche durchgeführt wurden, sind in Tabelle 1 beschrieben. Es handelt sich um mehr oder weniger ausgewaschene (pH 6,4 bis 7,9), ziemlich tiefgründige Braunerde (70 bis über 100 cm), über Grund- oder Oberflächenmoränen. Der Tongehalt des Bodens ist je nach Versuch sehr unterschiedlich und liegt zwischen 140 und 480 g/kg Boden. Bei Berücksichtigung des Tongehalts des Bodens konnte der C_{org} -Gehalt des Bodens zu Beginn der Versuche als zufriedenstellend bezeichnet werden (Flisch *et al.* 2017). Die anfängliche Verfügbarkeit an Nährstoffen (P, K und Mg) war insgesamt ebenfalls genügend.

Versuchsanordnungen

Drei der fünf Versuche wurden vor rund 50 Jahren eingerichtet (P11A, P29C und P20), ein weiterer Versuch begann vor etwas mehr als 40 Jahren (P24A; Tab. 2). Diese vier Versuche werden noch immer weitergeführt. Der fünfte Versuch dauerte nur zwölf Jahre (P24B). In drei Versuchen werden verschiedene Formen organischer Einträge und verschiedene Stickstoffgaben verglichen (P24A, P24B und P11A). Das wichtigste Ziel des Versuchs P29C ist es, die langfristigen Auswirkungen der Bodenbearbeitung zu untersuchen. Der letzte Versuch (P20) befasst sich mit den kombinierten Auswirkungen der Art der Bodenbearbeitung und der Fruchtfolge (Fruchtwechsel gegenüber Weizenmonokultur). Bei jedem Versuch wurden die Verfahren auf mindestens vier Parzellen von 63 bis 148 m² wiederholt.

In Tabelle 2 sind für jeden Versuch die Fruchtfolge, die Bodenbearbeitungsart(en), die Form der organischen Einträge sowie die Stickstoffdüngung angegeben. Bei allen Versuchen erfolgte die Düngung mit P, K und Mg gemäss den offiziellen Empfehlungen (Sinaj *et al.* 2017). Detailliertere Beschreibungen der fünf Versuche sind im Literaturverzeichnis am Ende dieser Publikationen aufgeführt.

Wichtigste Beobachtungen und Messungen

In allen Versuchen wurden die Gehalte an C_{org} sowie an verschiedenen Makro- und Mikronährstoffen, die scheinbare Bodendichte und die Porosität im Bodenhorizont 0–20 cm mehrmals gemessen. In bestimmten Fällen wurden diese Messungen zusätzlich in den Horizonten 0–5 cm und 5–20 cm vorgenommen und in einigen Fällen

Zusammenfassung

Der Erhalt der Bodenfruchtbarkeit ist eine grosse Herausforderung für auf Ackerbau spezialisierte Landwirtschaftsbetriebe ohne Viehhaltung. Seit mehreren Jahrzehnten werden im Versuchsbetrieb von Agroscope in Changins verschiedene Versuche durchgeführt, in denen die langfristigen Auswirkungen verschiedener Anbaumethoden auf die Fruchtbarkeit des Bodens und auf den Ertrag von Ackerbaukulturen erforscht werden. In diesem Artikel werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Versuche zusammengefasst. Der Gehalt des Bodens an organischem Kohlenstoff lässt sich bei den Bedingungen in Changins mit organischen Düngern stabilisieren. Nur hohe Mistgaben können diesen Gehalt signifikant erhöhen. Durch eine Reduktion der Bodenbearbeitung lässt sich der Gehalt an organischem Kohlenstoff im Allgemeinen nicht aufrechterhalten, aber ein Rückgang lässt sich verzögern. Durch die Kombination regelmässiger Gaben von organischem Dünger, einer Reduktion der Bodenbearbeitung und einer diversifizierten Fruchtfolge lassen sich die Bodenfruchtbarkeit und die Erträge der Ackerkulturen langfristig erhalten. Langzeitversuche sind unverzichtbar, um die langfristigen Einflüsse der Anbaumethoden auf die Nachhaltigkeit von Ackerbausystemen zu verstehen und zu simulieren.

im Horizont 20–50 cm. In den Versuchen P24A und P11A wurden mit der Bestimmung verschiedener weiterer Parameter die biologischen Eigenschaften des Bodens genauer untersucht (Maltas *et al.* 2012; Blanchet *et al.* 2016).

Der Ertrag der Kulturen wurde jedes Jahr bei jeder Parzelle mit Hilfe einer Erntemaschine für kleine Parzellen bestimmt. Dabei wurden auch die Feuchtigkeit der Ernte und die üblichen Parameter zur Qualität gemessen. Alle angewendeten Methoden und beobachteten Parameter sind in den entsprechenden, im Literaturverzeichnis aufgeführten Publikationen ausführlich beschrieben.

Resultate und Diskussion

Organischer Kohlenstoff des Bodens

Auswirkungen der organischen Einträge und der Stickstoffdüngung

Die Einträge durch Hofdünger und/oder Ernterückstände liefern dem Boden bedeutende Mengen von organi-

Tab. 1 | Wichtigste Eigenschaften der Böden (0–20 cm) zu Beginn der fünf Langzeitversuchen in Changins.

Versuchsnummer	P24A	P24B	P11A	P29C	P20	Mittelwert
Bodentyp	ausgewaschene Braunerde	Kalkbraunerde	ausgewaschene Braunerde	ausgewaschene Braunerde	ausgewaschene Braunerde	–
Tiefe (cm)	70–100	70–100	> 100	> 100	70–100	90–100
Ton (g/kg)	143	230	196	480 ¹ /250 ²	253	296
Sand (g/kg)	475	360	345	150 ¹ /310 ²	485	327
C _{org} (g/kg)	11,5	11,9	20,3	27,9 ¹ /14,5 ²	19,2	17,6
pH	7,2	7,9	7,3	6,4 ¹ /7,2 ²	6,4	7,0
KAK (meq/kg)	80	111	103	226 ¹ /114 ²	117	116

C_{org}: organischer Kohlenstoff
KAK: Kationen-Austausch-Kapazität

¹ toniger Bereich
² lehmiger Bereich

schem Kohlenstoff (C_{org}). Wenn die Stickstoffdüngung optimal ist, wird dem Boden durch die verschiedenen organischen Einträge (Tab. 2) 25 bis 80 % mehr C_{org} zugeführt als im Kontrollverfahren ohne organische Einträge (Versuch P24A, Maltas *et al.* 2018). Dies äussert sich im Allgemeinen in einer Erhöhung des C_{org}-Gehalts des Bodens im Horizont 0–20 cm. Nur umfangreiche Einträge von Mist (70 t/ha alle drei Jahre) führen jedoch zu einer signifikanten Erhöhung des C_{org}-Gehalts im Boden (Abb. 1; Maltas *et al.* 2018). Dieser Versuch zeigt auch, dass für die Aufrechterhaltung der C_{org}-Reserven im Boden eine systematische Rückführung des Getreidestrohs oder der Eintrag von mindestens 35 t/ha Mist alle drei Jahre erforderlich ist (Abb. 1), was einem Eintrag von etwa 3,5 t Kohlenstoff pro ha und Jahr entspricht. Der durch Gründünger zugeführte C_{org} hat nur geringe Aus-

wirkungen auf den C_{org}-Gehalt des Bodens, da er rasch abgebaut wird – schneller als der durch Getreidestroh oder Hofdünger zugeführte C_{org} (Versuch P24A, Koishi *et al.* 2019). In einem anderen Versuch reichten zwölf Jahre nicht aus, um einen signifikanten Effekt der organischen Einträge nachzuweisen (Versuch P24B, Maltas *et al.* 2013).

Die Ergebnisse des Versuchs P24A zeigen ebenfalls den positiven Effekt einer stärkeren Stickstoffdüngung auf den C_{org}-Gehalt im Boden (Maltas *et al.* 2018). Dies lässt sich hauptsächlich mit dem positiven Einfluss des Stickstoffs auf den Ertrag der Kulturen und damit auf die Einträge von C_{org} in den Boden erklären.

Auswirkungen der Bodenbearbeitung

Der C_{org}-Gehalt des Bodens nimmt in allen Verfahren mit unterschiedlicher Bodenbearbeitung von Versuch P29C kontinuierlich ab (Abb. 2). Bei minimaler Bodenbearbeitung ist dieser Rückgang jedoch schwach und statistisch nicht signifikant, während er beim Pflügen oder bei nicht-wendender tiefer Bodenbearbeitung ausgeprägter ist (Abb. 2; Büchi *et al.* 2017). Simulationen mit dem DayCent-Modell (Del Grosso *et al.* 2001) zeigten, dass eine reduzierte Bodenbearbeitung längerfristig zu einer Erhöhung des C_{org} im Boden führen könnte, insbesondere wenn regelmässig Zwischenfrüchte angebaut werden (Büchi *et al.* 2018).

In Versuch P20 nimmt der C_{org}-Gehalt des Bodens ebenfalls in beiden Verfahren der Bodenbearbeitung (Pflug und reduzierte Bodenbearbeitung) ab, insbesondere in den ersten zehn Jahren. Dies lässt sich in erster Linie mit dem Wechsel der Nutzung des Bodens erklären, der zuvor von einer Wiese bedeckt war. Mit einer reduzierten Bodenbearbeitung lässt sich dieser Prozess jedoch bremsen. Während den 50 Jahren des Versuchs enthielten die nicht gepflügten Parzellen durchschnittlich 7 % mehr C_{org} als die gepflügten Parzellen (Sanginés de Cárcer *et al.* 2019).

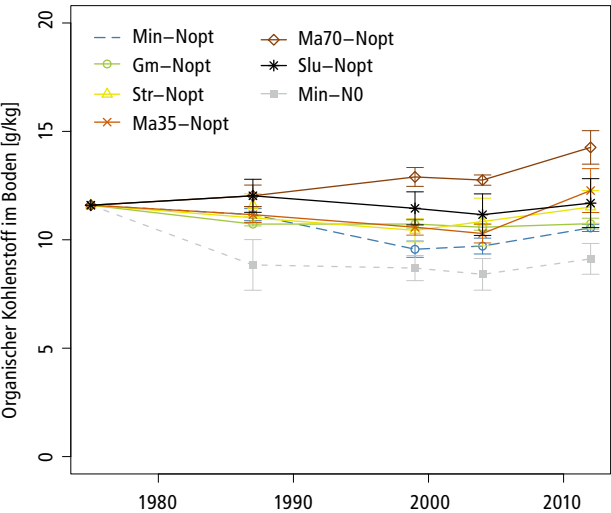


Abb. 1 | Zeitliche Entwicklung des Gehalts an organischem Kohlenstoff im Boden (0–20 cm) von 1975 bis 2012, je nach organischem Eintrag und Stickstoffdüngung (Versuch P24A; Min: kein organischer Eintrag, Gm: Gründünger, Str: Getreidestroh, Ma35 und Ma70: Mist, einfache bzw. doppelte Gabe, Slu: Vollgülle, Nopt: Stickstoff-Normdüngung, N0: keine Stickstoffdüngung; nach Maltas *et al.*, 2018).

Tab. 2 | Übersicht zu den fünf Langzeitversuchen in Changins.

Versuchsnummer		P24A	P24B	P11A	P29C	P20
Beginn – Ende d. Versuchs		1976 – ...	1997 – 2009	1963 – ...	1969 – ...	1967 – ...
Fruchtfolge		Mais – Weizen – Gerste – Raps – Hafer	Weizen – Mais – Weizen – Raps	Weizen – Mais – Weizen – Raps ⁸	Weizen – Mais – Weizen – Raps	unterschiedlich (siehe unten)
Bodenbearbeitung		Pflug (20–25 cm)	Grubber (pfluglos)	Pflug (20–25 cm)	unterschiedlich (siehe unten)	unterschiedlich (siehe unten)
Stickstoffdüngung		unterschiedlich (siehe unten)	unterschiedlich (siehe unten)	unterschiedlich (siehe unten)	gemäss Norm ⁴	gemäss Norm ⁴
untersuchte Faktoren	1. Faktor	1. Organische Einträge: 1.1. Kein Eintrag 1.2. Rindermist 35 ¹ 1.3. Rindermist 70 ² 1.4. Rindervollgülle 60 ³ 1.5. Strohrückführung 1.6. Gründünger	1. Organische Einträge: 1.1. Kein Eintrag 1.2. Rindermist 12 ⁵ 1.3. Rindermist 36 ⁶ 1.4. Rindervollgülle 22 ⁷	1. Organische Einträge: 1.1. Kein Eintrag 1.2. Rindermist 10 ⁹ 1.3. Ernterückstände	1. Bodenbearbeitung: 1.1. Pflug (20–25 cm) 1.2. Tief (25–30 cm) nicht-wendend, Direktsaat seit 2007 1.3. Grubber (10–15 cm) 1.4. Oberflächlich (5–10 cm)	1. Bodenbearbeitung: 1.1. Pflug 1.2. Oberflächlich (5–10 cm)
	2. Faktor	2. Stickstoffdüngung: 2.1. Kein Stickstoff 2.2. Norm ⁴ – 40 kg/ha 2.3. Norm ⁴ 2.4. Norm ⁴ + 40 kg/ha	2. Stickstoffdüngung: 2.1. 60 % Norm ⁴ 2.2. Norm ⁴	2. Stickstoffdüngung ¹⁰ : 2.1. 50 kg/ha/Jahr 2.2. 120 kg/ha/Jahr	2. Gründüngung ¹¹ : 2.1. Kein Gründünger 2.2. bis 2.7 Sechs verschiedene Reinsaaten ¹² 2.8. Mischung mit 11 Arten	2. Fruchtfolge: 2.1. Weizen-Monokultur 2.2. Weizen – Mais – Weizen – Raps
Versuchsanordnung		Split-Plot	Split-Plot	Split-Plot	Randomisierte Blöcke ¹³	Randomisierte Blöcke
Anzahl Wiederholungen		4	4	4	3 ¹⁴ /4 ¹⁵	4
Parzellengrösse (m)		20 × 4,5	10,5 × 6	11 × 5	18,5 × 8	18,5 × 8

¹35 t/ha Mist alle 3 Jahre²70 t/ha Mist alle 3 Jahre³60 m³/ha verdünnte Vollgülle (1:1), jährlich von 1976 bis 1994, dann alle 3 Jahre⁴gemäss Sinaj et al. (2017)⁵12 t/ha Mist jährlich⁶36 t/ha Mist alle 3 Jahre⁷22 m³/ha verdünnte Gülle (1:1) jährlich⁸Weizen – Mais – Weizen von 1963 bis 1972, Weizen – Mais – Weizen – Zuckerrüben von 1972 bis 2008⁹10 t/ha Mist jährlich¹⁰seit 1971¹¹nur von 2013 bis 2016¹²Brauner Senf, Daikonrettich, Futtererbse, Rauhafer, Ramtilkraut, Phacelia¹³Split-Plot von 2013 bis 2016¹⁴toniger Bereich¹⁵lehmiger Bereich

Auswirkungen der Fruchtfolge

Der C_{org}-Gehalt des Bodens wird durch die Abfolge der Kulturen nicht beeinflusst (Versuch P20, Sanginés de Cárcer et al. 2019). 2016, d.h. 50 Jahre nach Versuchsbeginn, lag der C_{org}-Gehalt des Bodens in den Parzellen mit Weizenmonokultur (14,8 g/kg) nahe beim Gehalt in den Parzellen mit Fruchtfolge (14,2 g/kg). Das Ausbleiben eines günstigen Einflusses der Fruchtfolge, bei der durch die höheren Erträge mehr C_{org} eingetragen wurde, lässt sich mit einer schnelleren Mineralisierung des C_{org} im Verfahren mit Fruchtfolge erklären (Sanginés de Cárcer et al. 2019).

Physikalische Eigenschaften des Bodens

Auswirkungen der organischen Einträge und der Stickstoffdüngung

Im Vergleich zum Verfahren ohne organische Einträge führen Verfahren mit organischer Düngung tendenziell zu einer höheren Gesamtporosität und folglich zu einer geringeren scheinbaren Bodendichte (Versuch P24A, Maltas et al. 2018). Ansonsten wurden die physikalischen Eigenschaften des Bodens durch die Art der organischen Düngung nicht signifikant verändert (Versuch

P24A, Maltas et al. 2018). Blanchet et al. (2016) weisen auf eine Verbesserung der physikalischen Eigenschaften des Bodens bei Einträgen in Form von Mist hin, während die anderen organischen Einträge keine signifikanten Auswirkungen haben (Versuch P11A).

Gemäss Maltas et al. (2018) führt die Stickstoffdüngung zu einer leichten Abnahme der Gesamtporosität des Bodens, hat aber keinen signifikanten Einfluss auf die scheinbare Bodendichte (Versuch P24A).

Auswirkungen der Bodenbearbeitung

Weder die Gesamtporosität des Bodens noch die scheinbare Bodendichte wurden durch die Bodenbearbeitung wesentlich beeinflusst (Versuch P29C, Vullioud et al. 2006). Die Makroporosität fiel bei den pfluglosen Verfahren manchmal unter die kritische Schwelle von 10 %. Die Strukturstabilität und der Eindringwiderstand waren ohne Pflügen durchgängig besser. Bei der reduzierten Bodenbearbeitung wird der C_{org}-Gehalt besser aufrechterhalten, woraus im oberflächlichen Horizont im Vergleich zum Pflügen ein höheres Kohlenstoff/Ton-Verhältnis resultiert. Dadurch wird tendenziell eine bessere Strukturstabilität erreicht (Versuch P29C, Büchi

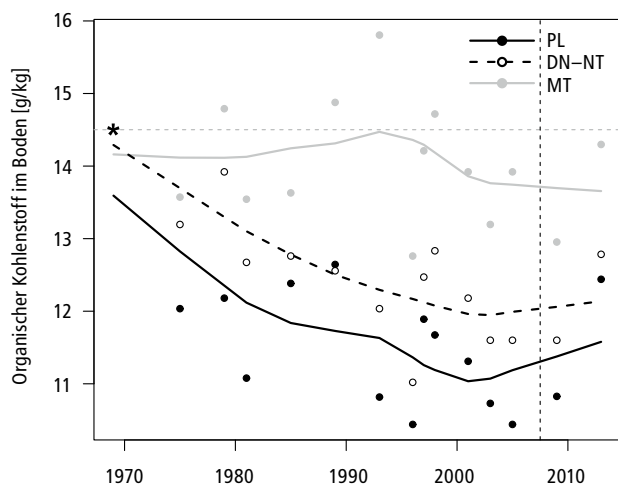


Abb. 2 | Zeitliche Entwicklung des Gehalts an organischem Kohlenstoff im Boden (0–20 cm) von 1969 bis 2013, je nach Art der Bodenbearbeitung (Versuch P29C, toniger Bereich; PL: herkömmliches Pflügen, DN-NT: tiefe, nicht-wendende Bodenbearbeitung bis 2006, Direktsaat seit 2007, MT: minimale Bodenbearbeitung; nach Büchi *et al.* 2017).

et al. 2017). In Versuch P20 ist die scheinbare Bodendichte bei reduzierter Bodenbearbeitung geringer als beim Verfahren mit Pflug, was auf einen weniger stark verdichteten Boden hindeutet, der gegenüber Erosion und Oberflächenabfluss unempfindlicher ist (Sanginés de Cárcer *et al.* 2019).

Chemische Eigenschaften des Bodens

Auswirkungen der organischen Einträge

Im Vergleich zu mineralischen Düngern verändern die organischen Einträge die chemischen Eigenschaften des Bodens nicht, wenn die Mengen der einzelnen zugeführten Nährstoffe vergleichbar sind. Die Art der organischen Düngung hatte ebenfalls keinen signifikanten Einfluss auf die chemischen Eigenschaften des Bodens (Versuch P24A, Maltas *et al.* 2018; Versuch P24B, Maltas *et al.* 2013). Blanchet *et al.* (2016) weisen auf eine leichte Verbesserung der chemischen Eigenschaften des Bodens bei der Verwendung von Mist hin (Versuch P11A).

Auswirkungen der Bodenbearbeitung

In mehreren Versuchen beeinflusste die Bodenbearbeitung den durchschnittlichen Gehalt des Horizonts 0–20 cm an den verschiedenen Nährstoffen kaum. Bei reduzierter Bodenbearbeitung oder Direktsaat liess sich dagegen eine Anreicherung bestimmter Nährstoffe im oberflächlichen Horizont beobachten. Eine deutliche Schichtung wurde beispielsweise bei den verschiedenen Formen von Phosphor sowie den pflanzenverfügbaren Formen von Kalium und Magnesium festgestellt (Ver-

such P29C, Büchi *et al.* 2017; Versuch P20, Sanginés de Cárcer *et al.* 2019). Diese Schichtung lässt sich bereits einige Jahre nach der Einführung der Direktsaat beobachten (Versuch P29C, Büchi *et al.* 2017).

Auswirkungen der Fruchtfolge

Im Vergleich zur Weizenmonokultur verändert eine Fruchtfolge die Konzentrationen bestimmter Nährstoffe im Boden leicht (Sanginés de Cárcer *et al.* 2019). Diese Wirkung lässt sich hauptsächlich mit den unterschiedlich grossen durch die Ernten exportierten Mengen an Nährstoffen erklären.

Biologische Eigenschaften des Bodens

Auswirkungen der organischen Einträge und der Stickstoffdüngung

Der Versuch P11A zeigt mehrere positive Wirkungen der organischen Einträge auf die biologische Aktivität im Boden. So steigt beispielsweise die Biomasse an Mikroorganismen und der Gehalt an Fettsäuren aus Phospholipiden (Blanchet *et al.* 2016). In Versuch P24A wurde kein signifikanter Einfluss der Art der organischen Einträge auf die Bodenatmung festgestellt, sie ist aber bei der Düngung mit Mist tendenziell etwas höher (Maltas *et al.* 2018). Ohne organische Einträge stimuliert die Stickstoffdüngung die über die Bodenatmung gemessene mikrobielle Aktivität (Versuch P24A, Maltas *et al.* 2018). Die Biomasse der Regenwürmer sowie der Anteil der epigäischen und endogäischen Regenwürmer wird durch die Stickstoffdüngung ebenfalls begünstigt (Versuch P11A, Blanchet *et al.* 2016).

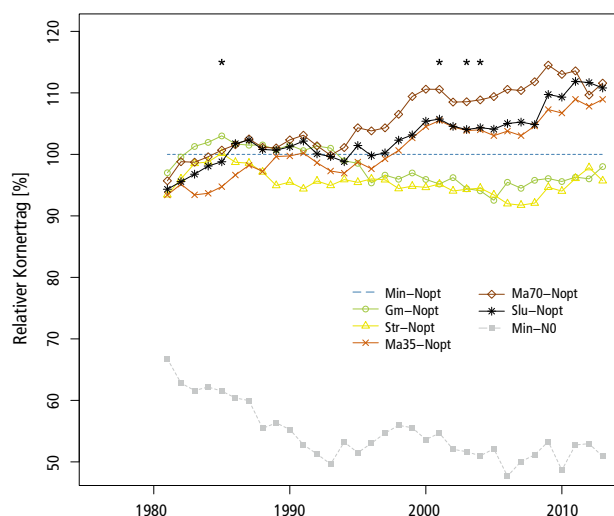


Abb. 3 | Entwicklung des relativen Kornertrags je nach organischem Eintrag (Versuch P24A; für die Abkürzungen siehe Abb. 1, Min-Nopt = 100%; nach Maltas *et al.* 2018).

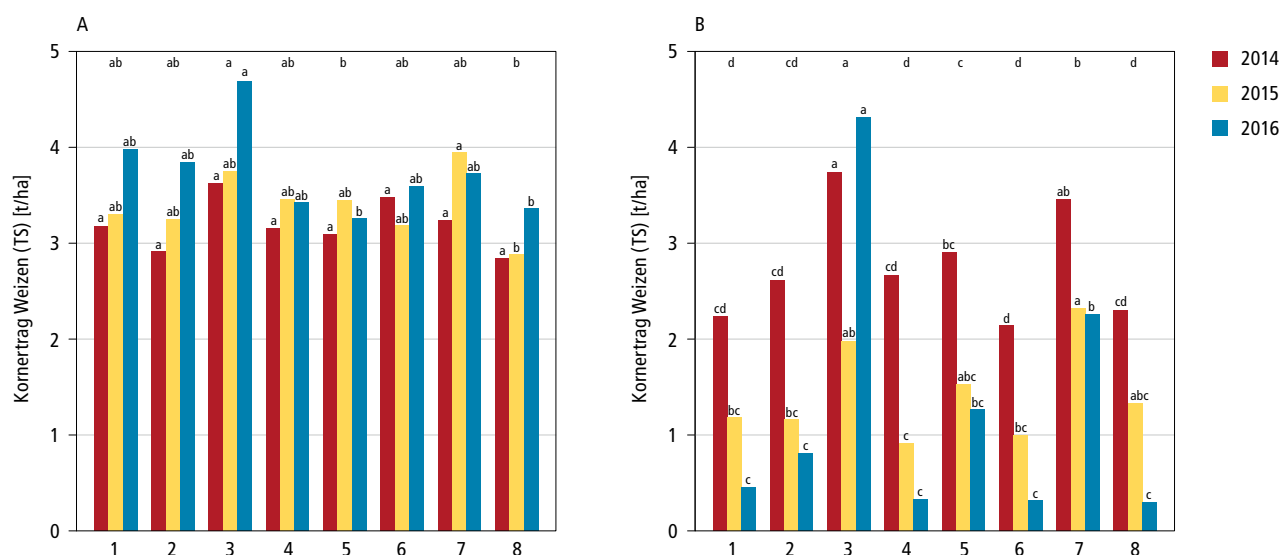


Abb. 4 | Korntrag des Weizens (t/ha) 2014, 2015 und 2016 nach Art der Bodenbearbeitung (A: minimale Bodenbearbeitung, B: Direktsaat) und nach Gründüngung vor der Weizenkultur (1: Brauner Senf, 2: Daikonrettich, 3: Futtererbse, 4: Rauhafer, 5: Ramtillkraut, 6: Phacelia, 7: Mischung mit 11 Arten, 8: Kontrolle ohne Gründünger; Versuch P29C nach Büchi *et al.* 2018).

Ertrag der Kulturen

Auswirkungen der organischen Einträge und der Stickstoffdüngung

Maltas *et al.* (2013) beobachten einen Anstieg des Ertrags der Kulturen um 2 bis 13 % bei den Verfahren mit Hofdünger im Vergleich zum Verfahren mit ausschliesslich mineralischem Dünger, wobei Vollgülle eine ausgeprägtere Wirkung als Mist hatte (Versuch P24B). Die Hofdünger-Einträge führten auch in Versuch P24A zu einem Anstieg des Ertrags, während die Rückführung des Getreidestrohs und die Gründüngung einen Rückgang des Ertrags um 5 beziehungsweise 2 % zur Folge hatten (Abb. 3; Maltas *et al.* 2018). Dies lässt sich mit einer geringeren Verfügbarkeit des Stickstoffs für die Kulturen erklären, weil Stickstoff durch die Bodenmikroorganismen immobilisiert wird, welche die organische Substanz abbauen (Maltas *et al.* 2018). Versuch P11A bestätigte den positiven Effekt von Mist, aber nicht der negativen Effekt der Rückführung des Strohs. In diesem Versuch unterschied sich der Ertrag des Verfahrens mit Rückführung des Getreidestrohs nicht signifikant vom Ertrag des Verfahrens mit mineralischem Dünger (Blanchet *et al.* 2016).

Die organischen Einträge können den Ertrag auf zwei Arten beeinflussen. Einerseits können sie die Menge der für die Kultur verfügbaren Nährstoffe verändern insbesondere von Stickstoff. Organische Einträge mit einem hohen C/N-Verhältnis, wie beispielsweise Getreidestroh, vermindern tendenziell die Verfügbarkeit des Stickstoffs, während im Gegensatz dazu Einträge mit niedrigem C/N-Verhältnis, wie ein leguminosenreicher Gründünger, den Kulturen Stickstoff liefern (Büchi *et al.* 2018). Andererseits können organische Einträge die physikalischen und biologischen Eigenschaften des

Bodens, das Pflanzenwachstum und folglich den Ertrag der Kulturen günstig beeinflussen, indem indirekt die Verfügbarkeit der Nährstoffe verbessert wird (Blanchet *et al.* 2016).

In Versuch P24B führt die Reduktion der Stickstoffdüngungsnorm um 40 % zu einer durchschnittlichen Reduktion des Ertrags um 14 %. Der Ertragsrückgang liegt dabei zwischen 9 % bei ausschliesslich mineralischem Dünger und 16 % bei Düngung mit Vollgülle (Maltas *et al.* 2013). Blanchet *et al.* (2016) beobachten einen durchschnittlichen Rückgang des Ertrags um rund 10 % bei den meisten Kulturen, wenn der Eintrag mineralischen Stickstoffdüngers von 120 auf 50 kg N/ha gesenkt wird. In diesem Versuch liess sich der Unterschied zwischen beiden Verfahren der Stickstoffdüngung erst nach

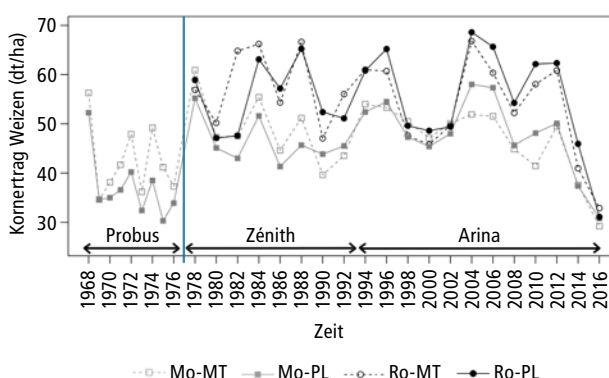


Abb. 5 | Entwicklung des Korntrags von Weizen von 1967 bis 2016 nach Art der Bodenbearbeitung und nach Fruchtfolge (Versuch P20; Mo-MT: Monokultur und minimale Bodenbearbeitung, Mo-PL: Monokultur und Pflug, Ro-MT: Fruchtfolge und minimale Bodenbearbeitung, Ro-PL: Fruchtfolge und Pflug; nach Sanginés de Cárcer *et al.* 2019).

rund einem Dutzend Jahren nachweisen. Diese Ergebnisse zeigen, dass sich die Stickstoffdüngung durch den Einsatz organischer Düngemittel deutlich reduzieren lässt, ohne den Ertrag der Kulturen allzu stark zu schmälern.

Auswirkungen der Bodenbearbeitung

Büchi *et al.* (2017) stellen fest, dass die verschiedenen Verfahren der Bodenbearbeitung langfristig (1967–2013) bei Weizen, Raps und Mais zu ähnlichen Erträgen führen (Versuch P29C). Im Vergleich zum Verfahren mit Pflug führen die minimale Bodenbearbeitung und die Direktsaat zu einer leicht höheren Stabilität der Erträge (Vullioud und Mercier 2004). Bei der Direktsaat ist eine leguminosenreiche Gründüngung vor Weizen erforderlich, damit der Ertrag dieser Kultur mit den Erträgen nach Pflügen oder nach reduzierter Bodenbearbeitung mithalten kann (Abb. 4; Versuch P29C, Büchi *et al.* 2018). Zwei weitere Versuche (P24B und P20, Abb. 5) bestätigen, dass sich der Ertrag von Kulturen nach reduzierter Bodenbearbeitung langfristig nicht signifikant von den Erträgen bei konsequentem Pflügen unterscheidet (Maltais *et al.* 2013; Vullioud 2007; Sanginés de Cárcer *et al.* 2019). Maltais *et al.* (2013) betonen, dass diese Feststellung gilt, wenn die Stickstoffdüngung nicht limitierend ist.

Auswirkungen der Fruchtfolge

Von 1978 bis 2016 war der Ertrag der Weizenmonokultur durchschnittlich 16 % niedriger als der von Weizen in einer Fruchtfolge (Abb. 5; Sanginés de Cárcer *et al.* 2019). Verschiedene Arten der Stoppelpbearbeitung, des Managements der Ernterückstände, der Sortenwahl, der Stickstoffdüngung oder des Fungizidschutzes vermochten die negativen Effekte der Monokultur nicht zu reduzieren (Vullioud 2007; Charles *et al.* 2011).

Schlussfolgerungen

- Organische Einträge sind geeignet, um den C_{org}-Gehalt des Bodens zu stabilisieren. Bei den Bedingungen in Changins sind bedeutende Düngergaben (70 t/ha alle drei Jahre) erforderlich, damit dieser Gehalt signifikant steigt. Der durch Gründüngung eingetragene C_{org} wird sehr rasch abgebaut, schneller als der durch Getreidestroh und Hofdünger gelieferte C_{org}, und hat oft nur eine geringe Wirkung auf den C_{org}-Gehalt des Bodens.
- Um die Bodenfruchtbarkeit (C_{org}-Gehalt und biologische Aktivität) aufrechtzuerhalten, scheinen Hofdünger insgesamt über die untersuchten Parameter den besten Kompromiss darzustellen und sind schwierig zu ersetzen.
- Durch die reduzierte Bodenbearbeitung kann die Abnahme des C_{org} im Boden in Ackerbausystemen gebremst werden. Ohne regelmässige organische Einträge lässt sich der C_{org}-Gehalt des Bodens bei reduzierter Bodenbearbeitung jedoch im Allgemeinen nicht aufrechterhalten.
- Mit einer diversifizierten Fruchtfolge, einer reduzierten Bodenbearbeitung und regelmässigen organischen Einträgen lassen sich die Bodenfruchtbarkeit und der Ertrag von Ackerkulturen langfristig erhalten. Der Stickstoffbedarf kann dabei steigen, dies lässt sich jedoch durch eine stärkere Gewichtung der Leguminosen in der Fruchtfolge – in Form einer Hauptfrucht und/oder Zwischenfrucht (Gründüngung) – kompensieren.
- Langzeitversuche sind unerlässlich, um die langfristigen Auswirkungen verschiedener Anbaumethoden auf die Nachhaltigkeit von Ackerbausystemen zu verstehen und zu simulieren. ■

Literatur

- Abbott L. K. & Murphy D. V., 2003. Soil biological fertility - A key to sustainable land use in agriculture, Kluwer Academic Publishers.
- Blanchet G., Gavazov K., Bragazza L. & Sinaj S., 2016. Responses of soil properties and crop yields to different inorganic and organic amendments in a Swiss conventional farming system. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **230**, 116–126.
- Büchi L., Wendling M., Amossé C., Jeangros B., Sinaj S. & Charles R., 2017. Long and short term changes in crop yield and soil properties induced by the reduction of soil tillage in a long term experiment in Switzerland. *Soil & Tillage Research* **174**, 120–129.
- Büchi L., Wendling M., Amossé C., Necpalova M. & Charles R., 2018. Importance of cover crops in alleviating negative effects of reduced soil tillage and promoting soil fertility in a winter wheat cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **256**, 92–104.
- Charles R., Cholley E. & Frei P., 2011. Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, Sorte und Fungizidschutz in der Getreideproduktion. *Agrarforschung Schweiz* **2** (5), 212–219.
- Autorenteam, 2013. Grundlagen zur Bodenfruchtbarkeit. 2. Auflage FiBL, BioSuisse, 32 S.
- Del Grosso S. J., Parton W. J., Mosier A. R., Hartman M. D., Brenner J., Ojima D. S., Schimel, D.S., 2001. Simulated interaction of carbon dynamics and nitrogen trace gas fluxes using the DAYCENT model. In: Hansen, S., Shaffer, M.J., Liwang, M. (Eds.), *Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management*. CRC Press.
- Flisch R., Neuweiler R., Kuster T., Oberholzer H., Huguenin-Elie O. & Richner W., 2017. 2/Bodeneigenschaften und Bodenanalysen. In: *Grundlagen der Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz* (GRUD 2017) (Hrsg. W. Richner & S. Sinaj). *Agrarforschung Schweiz* **8** (6), Spezialpublikation, 2/1–2/33.

Riassunto**Salvaguardia della sostenibilità dei sistemi basati su seminativi: bilancio di 50 anni di prove a Changins**

La salvaguardia della fertilità dei suoli è un punto di fondamentale importanza per le aziende agricole prive di bestiame e specializzate in seminativi. Diverse decine di anni fa, nell'azienda sperimentale di Agroscope a Changins, sono iniziate numerose prove volte a studiare gli effetti, a lungo termine, di differenti pratiche agricole sulla fertilità del suolo e sulla resa delle colture da pieno campo. Questo articolo riassume i principali risultati evidenziati da queste sperimentazioni. Nelle condizioni di Changins, gli ammendamenti organici sono risultati utili per stabilizzare il tenore in carbonio organico del suolo, mentre apporti importanti di letame ne hanno consentito un aumento significativo. Per preservare la fertilità del suolo, i concimi aziendali sono difficili da sostituire. Una lavorazione ridotta del suolo permette di ridurre la diminuzione del tenore in carbonio organico del suolo, ma, senza apporti organici regolari, questa pratica non è sufficiente per stabilizzarne il contenuto. Combinando apporti organici regolari, riduzione delle lavorazioni del suolo e rotazione colturale diversificata, è possibile mantenere, sul lungo periodo, sia la fertilità del suolo sia la resa delle colture da pieno campo. Le prove di lunga durata sono essenziali per comprendere e simulare l'impatto, a lungo termine, delle differenti pratiche agricole sulla sostenibilità dei sistemi basati su seminativi.

Summary**Preserving the sustainability of field crop systems: overview of 50 years of trials in Changins**

Preserving soil fertility is a major challenge for farms without livestock specialised in field crops. Several decades ago, several trials were set up at the Agroscope experimental station in Changins to study the long-term effects of different cultural practices on soil fertility and crop yields. This article summarises the main results obtained in these trials. In the conditions at Changins, organic amendments have been useful for stabilising soil organic carbon content, and only high manure inputs have enabled its significant increase. To preserve soil fertility, farm manures are difficult to replace. Without regular organic amendments, reducing tillage is generally not enough to maintain soil organic carbon content, but can slow its decrease. By combining a diversified crop rotation, reduced tillage and regular organic inputs, it is possible to maintain soil fertility and crop yields on the long term. Long-term trials are indispensable for understanding and simulating the long-term impact of different cultural practices on the sustainability of field crop systems.

Key words: soil fertility, organic amendment, nitrogen fertilisation, soil tillage, crop rotation, crop yield.

- Koishi A., Maltas A., Bragazza L., Pfeifer H.-R. & Sinaj S., 2019. Long-term effects of organic amendments on soil organic matter quality in a Swiss conventional farming system. En préparation.
- Maltas A., Oberholzer H., Charles R., Bovet V. und Sinaj S., 2012. Langfristige Wirkung von organischen Düngern auf die Bodeneigenschaften. *Agrarforschung Schweiz* 3 (3), 148–155.
- Maltas A., Charles R., Jeangros B. & Sinaj S., 2013. Effect of organic fertilizers and reduced-tillage on soil properties, crop nitrogen response and crop yield: Results of a 12-year experiment in Changins, Switzerland. *Soil & Tillage Research* 126, 11–18.
- Maltas A., Kebli H., Oberholzer H., Weisskopf P. & Sinaj S., 2018. The effects of organic and mineral fertilizers on carbon sequestration, soil properties and crop yields from a long-term field experiment under a Swiss conventional farming system. *Land Degradation and Development* 29, 926–938.
- Sanginés de Cárcer P., Sinaj S., Santonja M., Fossati D. & Jeangros B., 2019. Long-Term Effects of Crop Succession and Soil Tillage on Wheat Yield and Soil Properties. *Soil & Tillage Research*, im Druck.
- Sinaj S., Charles R., Baux A., Dupuis B., Hiltbrunner J., Levy L., Pellet D., Blanchet G. & Jeangros B., 2017. 8/Düngung von Ackerkulturen. In: Grundlagen der Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017) (Hrsg. W. Richner & S. Sinaj. *Agrarforschung Schweiz* 8 (6), Spezialpublikation, 8/1-8/46.
- Vullioud P. & Mercier E., 2004. Résultats de 34 ans de culture sans labour à Changins. I. Evolution des rendements. *Revue suisse Agric.* 36 (5), 201-212.
- Vullioud P., 2007. Rotations de cultures chargées en blé : est-il possible d'en diminuer les inconvénients? *Revue suisse Agric.* 39 (1), 15–23.
- Vullioud P., Neyroud J.-A. & Mercier E., 2006. Résultats de 35 ans de culture sans labour à Changins. II. Evolution des propriétés du sol. *Revue suisse Agric.* 38 (1), 1–16.