

# Erträge und Bodenparameter nach 20 Jahren Direktsaat und Pflug

Andreas Chervet<sup>1</sup>, Lorenz Ramseier<sup>1</sup>, Wolfgang G. Sturny<sup>1</sup>, Marc Zuber<sup>1</sup>, Matthias Stettler<sup>2</sup>, Peter Weisskopf<sup>3</sup>, Urs Zihlmann<sup>3</sup>, Ingrid Martínez G.<sup>3</sup> und Thomas Keller<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern, Fachstelle Bodenschutz, 3052 Zollikofen, Schweiz

<sup>2</sup>Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, 3052 Zollikofen, Schweiz

<sup>3</sup>Agroscope, Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften INH, 8046 Zürich, Schweiz

Auskünfte: Thomas Keller, E-Mail: thomas.keller@agroscope.admin.ch



Abb. 1 | Dauerbeobachtungsfläche Oberacker, Inforama Rütli, Zollikofen. Luftaufnahme vom 29.06.2004.

(Foto: Gabriela Brändle, Agroscope)

## Einleitung

Für oder gegen die Anwendung von Direktsaat (DS) sprechen ökologische, ökonomische und klimatische Argumente. Verschiedene Studien zeigen, dass DS bei heftigen Niederschlagsereignissen nicht nur den Oberflächenabfluss reduziert, sondern – aufgrund einer ungestörten und mit Pflanzenresten bedeckten Bodenoberfläche – auch die Bodenerosion einschränkt (Soane *et al.* 2012). Zudem trägt DS zur Verminderung von Unterbodenverdichtungen bei, da bei diesem System die Traktorräder vollumfänglich auf der Bodenoberfläche fahren und nicht wie im Pflugsystem (PF) teilweise in der Pflugfurche in 25 cm Tiefe abgestützt werden

(Chamen *et al.* 2003). Hingegen soll DS im Vergleich zu PF die Produktivität reduzieren (Karlen *et al.* 2013; Soane *et al.* 2012; Pittelkow *et al.* 2014). Abgeschwächt werden muss dieses Argument, wenn die Fruchtfolge der DS angepasst und mit Pflanzenrückständen eine permanente Bodenbedeckung angestrebt wird (Pittelkow *et al.* 2014).

Bodenbearbeitung, Fruchtfolge und Umgang mit Pflanzenrückständen üben einen entscheidenden Einfluss auf den  $C_{org}$ -Gehalt und die Nährstoffdynamik des Bodens aus. Da Ernterückstände bei fehlender Bodenbearbeitung nicht eingearbeitet werden, kommt es bei DS im Vergleich zu PF zu höheren  $C_{org}$ -Konzentrationen in den oberflächennahen Bodenschichten.

Neben dem  $C_{org}$ -Gehalt sind Bodentyp und Klima weitere Faktoren, die bei der Wahl des Anbausystems entscheiden. In den gemässigten Klimazonen Mitteleuropas werden die Vorteile der DS auf sandigen Lehmen wenig genutzt.

## Material und Methoden

### Standort, Versuchsdesign und Bodenbearbeitung

Die Dauerbeobachtungsfläche Oberacker wurde 1994 als Demonstrationsversuch am Inforama Rütli in Zollikofen bei Bern auf 557 m ü. M. angelegt (Abb. 1). Der schwach humose, sandige Lehmboden (18 % Ton, 23 % Schluff) ist als Braunerde (Eutric Cambisol) klassifiziert (WRB 2006). Der Standort weist eine mittlere jährliche Lufttemperatur von 9,3 °C und eine mittlere jährliche Niederschlagsmenge von 1109 mm auf. Auf sechs 18 m breiten, durch 3 m breite Grünstreifen abgegrenzten Parzellen werden in einem Streifenversuch mit sechs verschiedenen Kulturen die beiden Anbausysteme DS und PF (je 9 m breit) miteinander verglichen. Bei PF wurde bis 2002 konventionell rund 25 cm tief gepflügt und ab 2003 ein On-Land-Pflug eingesetzt (ab 2006 nur noch rund 15 cm tief). Die Saatbettbereitung erfolgte bei PF bis 2006 mit einem zapfwellengetriebenen Bodenbearbeitungsgerät; ab 2006 wurde auch auf die Saatbettbereitung verzichtet. Zum Niveauausgleich des Saatbetts wird dem Traktor mit angehängter Direktsaatmaschine beim Säen ein Frontpacker vorgehängt. Bei DS werden die Kulturen ohne vorangehende Bodenlockerung gesät. Mittels Scheibenscharen wird lediglich ein Säschlitz im Boden geöffnet und nach der Saatgutablage geschlossen. Bei diesem System wird der Boden einzig bei der Zuckerrübenernte bewegt. Seit 2007 wird folgende Fruchtfolge angebaut: Eiweisserbsen – Winterweizen – Ackerbohnen – Wintergerste – Zuckerrüben – Silomais. Bodenbearbeitung, Saat, Pflege und Ernte werden mit kommerziellen Maschinen von Lohnunternehmern ausgeführt.

### Ertragserhebung, Düngung und Pflanzenschutz

Die Fruchtfolge wurde über die Jahre mehrmals angepasst. Unter Berücksichtigung von Pflanzengesundheit und Unkrautunterdrückung achtete man bei minimalem Pestizideinsatz auf eine Optimierung der Bodenqualität und auf eine Maximierung des Fruchtfolgeertrages. Bei beiden Systemen erfolgt die Aussaat der Kulturen am selben Tag, und sämtliche Ernterückstände werden auf dem Feld belassen. Die Ertragserhebungen erfolgen bei den Dreschfrüchten über die gesamte Parzelle, bei Mais und Zuckerrüben wird der Ertrag auf 16 zufällig ausge-

**Zusammenfassung** ■ Seit 1994 werden auf der Dauerbeobachtungsfläche Oberacker am Inforama Rütli in Zollikofen auf einem schwach humosen sandigen Lehm die beiden Anbausysteme Direktsaat und Pflug miteinander verglichen. In einem Streifenversuch mit sechs verschiedenen Parzellen werden im Rahmen einer Fruchtfolge die sechs Kulturen Eiweisserbsen – Winterweizen – Ackerbohnen – Wintergerste – Zuckerrüben – Silomais angebaut. Nach 20 Versuchsjahren wurden die Nährstoffversorgung des Bodens untersucht und die Erträge statistisch ausgewertet. Die Bodenproben wurden schichtweise bis in eine Tiefe von 50 cm entnommen und auf organischen Kohlenstoff ( $C_{org}$ ), Stickstofftotalgehalt ( $N_{tot}$ ), Phosphor (P), Calcium (Ca), Kalium (K), Magnesium (Mg), pH-Wert und Lagerungsdichte untersucht. Im Gegensatz zum Pflugsystem waren bei Direktsaat  $C_{org}$ ,  $N_{tot}$ , K und Mg in der obersten Bodenschicht angereichert, der pH-Wert war tiefer und P und Ca zeigten leichte Konzentrationsmaxima bei rund 20 cm Tiefe. Über das ganze Bodenprofil betrachtet war der Vorrat an  $C_{org}$  und allen untersuchten Nährelementen in beiden Systemen vergleichbar hoch. Der über 20 Jahre gemittelte Relativertrag ist bei der Direktsaat im Vergleich zum Pflug um 2,6 % tendenziell, aber nicht signifikant höher. Bei der langjährig auf die Direktsaat abgestimmten Fruchtfolge (ab 2000 ohne Kartoffeln) mit permanenter Bodenbedeckung erbrachten Wintergetreide und Leguminosen im Direktsaatsystem sogar signifikant höhere Erträge als bei gepflügten Böden.

wählten Teilflächen erhoben. Verglichen werden die Relativerträge (PF = 100 %).

Die Düngung erfolgt gemäss den Vorgaben der GRUDAF (Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau, Flisch *et al.* 2009). Die seit 2008 ausgebrachten Düngergaben sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Sie sind in beiden Systemen für N, P, Mg, S und B fast identisch, für K und Ca bei PF höher. Die Gründüngungen (bis 2008 Sareptasenf, Ölrettich und Sommersaatwicke) wurden bei beiden Anbausystemen jeweils nach Getreide und Erbsen angesät. Seit 2009 wird eine

Tab. 1 | Mineraldüngergaben (kg ha<sup>-1</sup>) während der Zeitperiode 2008 bis 2014 in Abhängigkeit vom Anbausystem

Anbaujahr	N		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		K <sub>2</sub> O		CaCO <sub>3</sub>		Mg		S		B	
	DS	PF	DS	PF	DS	PF	DS	PF	DS	PF	DS	PF	DS	PF
2008/09	65	65	83	83	221	221	0	0	14	14	79	79	0	0
2009/10	66	66	81	81	210	210	0	0	0	0	60	60	0	0
2010/11	65	65	0	0	68	108	0	139	35	35	57	57	0	0
2011/12	71	71	0	0	0	112	19	145	0	38	88	68	5	0
2012/13	70	70	0	0	64	97	0	0	19	19	65	66	0	0
2013/14	71	71	0	0	92	138	0	0	23	23	74	74	2	2
Mittelwert	68	68	27	27	109	148	3	47	15	22	71	67	1	0,3

N = Stickstoff, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Phosphorpentoxid (x 0,436 = Phosphor), K<sub>2</sub>O = Kaliumoxid (x 0,83 = Kalium), CaCO<sub>3</sub> = kohlensaurer Kalk (x 0,4 = Kalk), Mg = Magnesium, S = Schwefel, B = Bor, DS = Direktsaat, PF = Pflug.

Mischung aus neun nicht-frostresistenten Gründüngungspflanzen eingesetzt.

Die Beikraut- und Krankheitsbekämpfung erfolgt entsprechend den Grundsätzen der Integrierten Produktion nach dem Schadschwellenprinzip. Sowohl bei DS als auch bei PF beschränkt sich der Pflanzenschutzmittelinsatz weitgehend auf selektive Herbizide. Bis 2006 wurde bei DS regelmässig Glyphosat zur Regulierung der Gründüngungskulturen und allfällig vorhandener Beikräuter appliziert. Seit 2007 wird der Glyphosat-Einsatz auch bei DS schrittweise reduziert. Im Vergleich dazu werden bei PF Gründüngungspflanzen, Beikräuter und Ernterückstände durch die Pflugarbeit in den Boden eingearbeitet.

#### Probenahmen und Laboranalysen

Bei einem Wassergehalt nahe der Feldkapazität wurde im Frühjahr 2012 der Eindringwiderstand mit einem Penetrometer bis in eine Tiefe von 50 cm gemessen.

Die Bodenbeprobung erfolgte im Sommer 2014 nach der Getreide- und Leguminosenernte auf den vier abgeernteten Parzellen. Der Boden wurde entsprechend der sichtbaren Schichtung innerhalb eines festgelegten Volumens (Metallrahmen mit 50 cm Kantenlänge) bis auf eine Tiefe von 50 cm ausgehoben. Das Probenmaterial stammte bei DS aus den Tiefenstufen 0–2, 2–4, 4–8, 8–15, 15–30, 30–40 und 40–50 cm, bei PF aus den Tiefen 0–15, 15–25, 25–30, 30–40 und 40–50 cm. Die Lagerungsdichte wurde für jede Schicht aus der Masse des Bodens und der Schichtdicke abzüglich des gravimetrisch bestimmten Wassergehaltes berechnet. Die pH-, C<sub>org</sub>- und Nährstoffanalysen erfolgten gemäss den Referenzmethoden der eidgenössischen Forschungsanstalten (1996).

## Resultate

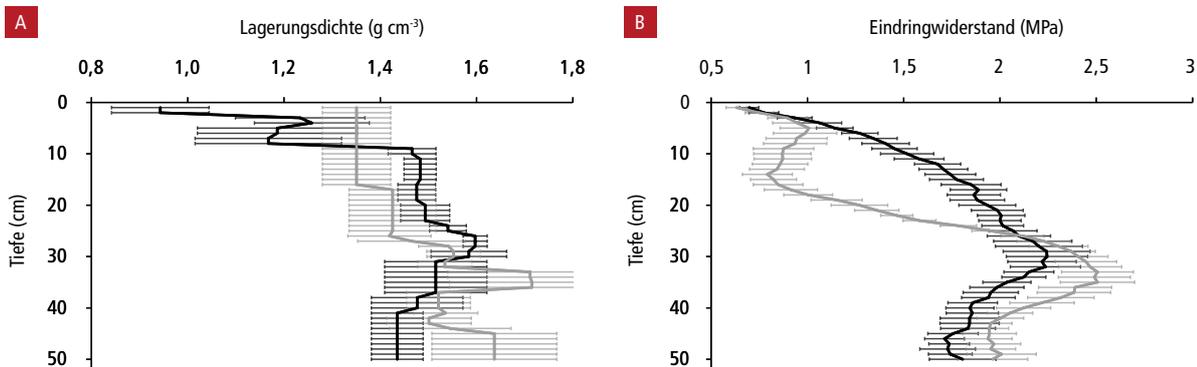
#### Bodenphysikalische Untersuchungen

Über das 50 cm tiefe Profil betrachtet sind die Kurvenverläufe von Lagerungsdichte (Abb. 2A) und Eindringwiderstand (Abb. 2B) grundsätzlich ähnlich. Beim Vergleich der beiden Anbausysteme weist DS in den obersten Zentimetern tiefere Lagerungsdichtewerte auf als PF, was vermutlich mit dem in dieser Schicht erhöhten C<sub>org</sub>-Gehalt bei DS zusammenhängt. Darunter sind die Werte beider Parameter bei DS gegenüber PF erhöht, was auf grössere Oberbodenbeanspruchungen beziehungsweise eine fehlende mechanische Lockerung bei DS schliessen lässt. Im Unterboden hingegen wurden bei DS leicht geringere Lagerungsdichten und Eindringwiderstände festgestellt als bei PF (Abb. 2). Dies weist auf grössere Unterbodenbeanspruchungen bei PF hin.

#### Bodenchemische Untersuchungen

Der pH-Wert (CaCl<sub>2</sub>) des Bodens wird mit zunehmender Bodentiefe geringfügig höher (Abb. 3). Zwischen DS und PF sind die Unterschiede im Unterboden klein. Grössere Unterschiede stellt man hingegen im Oberboden fest: Bei DS ändert sich der pH-Wert von 5,0 in der Schicht 5–10 cm auf 5,8 in 20–25 cm Tiefe, wogegen bei PF die Werte in diesen Tiefen konstant bei 5,4 bleiben.

Die C<sub>org</sub>- und N<sub>tot</sub>-Gehalte sind bei DS in den obersten Bodenschichten (0–10 cm) höher als bei PF (Abb. 4). Ursache dafür sind die bei DS auf der Bodenoberfläche verbliebenen Pflanzenrückstände sowie eine vermutlich höhere Wurzelkonzentration in dieser Schicht. Die Gehalte von C<sub>org</sub> und N<sub>tot</sub> nehmen bei beiden Anbausystemen mit zunehmender Bodentiefe ab. Bei beiden Parametern stellt man jedoch bei PF in 20–25 cm Tiefe



**Abb. 2** | Kurvenverläufe von A) Lagerungsdichte und B) Eindringwiderstand (bei einem Wassergehalt nahe der Feldkapazität) in Abhängigkeit von Anbausystem und Bodentiefe. Schwarze Linien = Direktsaat, graue Linien = Pflug. Die Fehlerbalken entsprechen den Standardfehlern der Mittelwerte.

**Tab. 2** | Durchschnittserträge und Relativerträge (Pflug = 100 %) aller zwischen 1994 und 2014 angebauten Kulturen in Abhängigkeit vom Anbausystem. Ertragsangaben in dt ha<sup>-1</sup> (bei Getreide: 14 % H<sub>2</sub>O, bei Leguminosen: 13 % H<sub>2</sub>O, bei Mais: Trockensubstanz und bei Kartoffeln: Frischsubstanz) oder in t Zucker ha<sup>-1</sup> (bei Zuckerrüben). Werte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ( $p < 0,05$ ).

Kultur	n	Ertrag DS	Ertrag PF	Relativertrag (PF = 100 %)
Wintergerste	20	65,9 <sub>a</sub>	62,2 <sub>b</sub>	105,9
Zuckerrüben	20	11,5	11,9	96,6
Silomais	20	199,9	198,7	100,6
Winterweizen	20	55,0 <sub>a</sub>	51,9 <sub>b</sub>	105,9
Sommereiwisserbsen	8	42,5 <sub>a</sub>	37,3 <sub>b</sub>	113,7
Sommerackerbohnen	6	30,9 <sub>a</sub>	26,3 <sub>b</sub>	117,3
Winterroggen	6	59,5	58,6	101,5
Wintereiwisserbsen	5	32,1 <sub>a</sub>	26,6 <sub>b</sub>	120,9
Kartoffeln	5	341,1 <sub>b</sub>	399,5 <sub>a</sub>	85,4
Kunstwiese	2 <sup>1</sup>	–	–	–
Soja	2	26,3	29,4	89,7
Winterackerbohnen	1	23,6	29,0	81,2
Sommerweizen	1	60,5	49,7	121,5
Mittel aller Kulturen				102,6

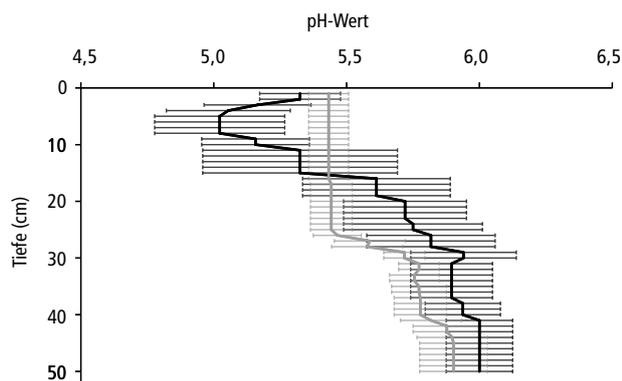
n = Anzahl Versuchsjahre mit entsprechender Kultur; DS = Direktsaat, PF = Pflug.  
<sup>1</sup> Ertrag wurde nicht erhoben.

tendenziell höhere Werte fest. Die C-Mengen über das ganze Profil betragen bei DS 70 und bei PF 73 t ha<sup>-1</sup>. Das C/N-Verhältnis liegt in beiden Anbausystemen über die ganzen 50 cm bei ca. 10; und Schichten mit hohen C<sub>org</sub>-Gehalten haben tiefe pH-Werte.

Die P- und Ca-Gehalte sind bis 50 cm Bodentiefe in beiden Systemen relativ homogen verteilt (Abb. 5A und B). Beide Nährelemente weisen jedoch bei DS in ca. 20–25 cm Tiefe ein Konzentrationsmaximum auf. Obwohl in den letzten Jahren kaum P-Dünger eingesetzt wurden (Tab. 1), sind die P-Vorräte beider Anbausysteme über das ganze Profil betrachtet hoch (>40 mg P kg<sup>-1</sup> Boden). Sowohl bezüglich K wie auch Mg wurden bei DS deutliche Konzentrationsmaxima in den obersten Zentimetern beobachtet (Abb. 5C und D). In der Schicht von 20–25 cm Tiefe war die K-Konzentration bei PF im Vergleich zu DS erhöht. Die K-Düngung wurde bei beiden Anbausystemen ab dem Anbaujahr 2010/11 stark reduziert: Waren die K-Gaben vorher bei beiden Systemen gleich hoch, wurde danach bei DS nur noch die Hälfte von PF gedüngt (Tab. 1).

### Erträge

Von allen während der gesamten Versuchsdauer von 1994 bis 2014 angebauten Kulturen werden in Tabelle 2 die Durchschnitts- und Relativerträge (PF = 100 %) aufgeführt. Über alle Kulturen betrachtet sind diese bei DS mit 102,6 % geringfügig höher als bei PF. Der Unterschied ist jedoch statistisch nicht signifikant ( $p = 0,28$ ). Beim Vergleich der Jahresrelativerträge (Abb. 6) konnten zwischen den Anbausystemen keine zeitlichen Trends gefunden werden. Bei den Kulturen Winterweizen, Wintergerste, Eiweisserbsen (sowohl Winter- als auch Sommerform) und Sommerackerbohnen wurde



**Abb. 3 |** Kurvenverlauf des Säuregrades (pH-Wert [CaCl<sub>2</sub>]) in den Böden, abhängig von Anbausystem und Bodentiefe. Schwarze Linie = Direktsaat, graue Linie = Pflug. Die Fehlerbalken entsprechen den Standardfehlern der Mittelwerte.

jedoch bei DS ein signifikant höherer Ertrag festgestellt ( $p < 0,05$ , Tab. 2). Umgekehrt erbrachten nur die bis 1999 angebauten Kartoffeln einen für PF signifikant höheren Ertrag. Bei Mais und Zuckerrüben zeigte die statistische Auswertung keine Signifikanz zwischen DS und PF.

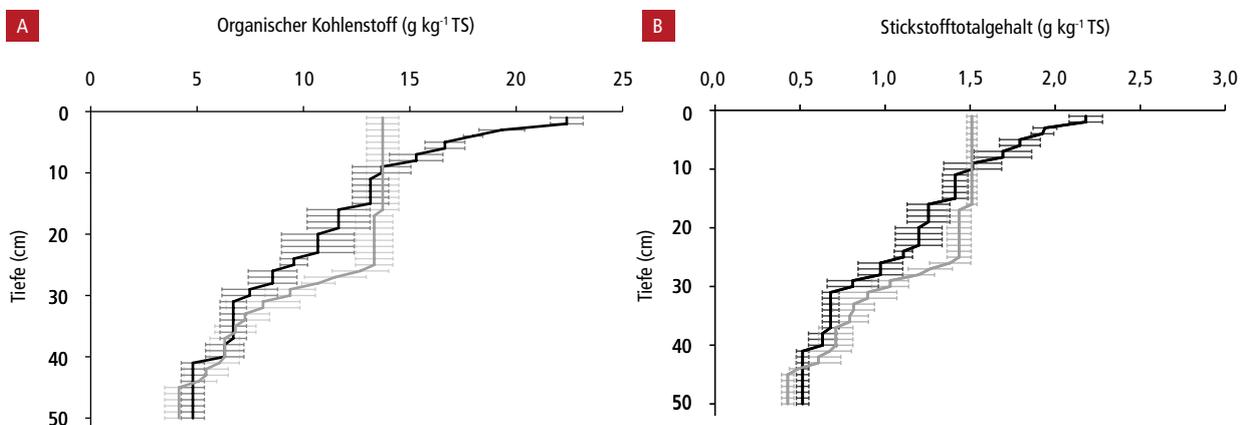
## Diskussion

Die Verteilung des organischen Kohlenstoffs im Bodenprofil wird stark durch das Anbausystem beeinflusst. In der obersten Schicht konnte bei DS ein deutlich höherer  $C_{org}$ -Gehalt festgestellt werden als bei PF. Im Gegensatz dazu wurde in 20–25 cm Tiefe bei DS ein geringerer Gehalt beobachtet als bei PF. Dies war aufgrund früherer Arbeiten zu erwarten (Soane *et al.* 2012). Die fehlende Bodenbearbeitung bei DS hatte in diesem System höhere  $C_{org}$ - und  $N_{tot}$ -Gehalte in den oberflächennahen Schichten zur Folge. Auch im Grenzbereich zwischen Ober- und Unterboden ist die ausbleibende Einarbei-

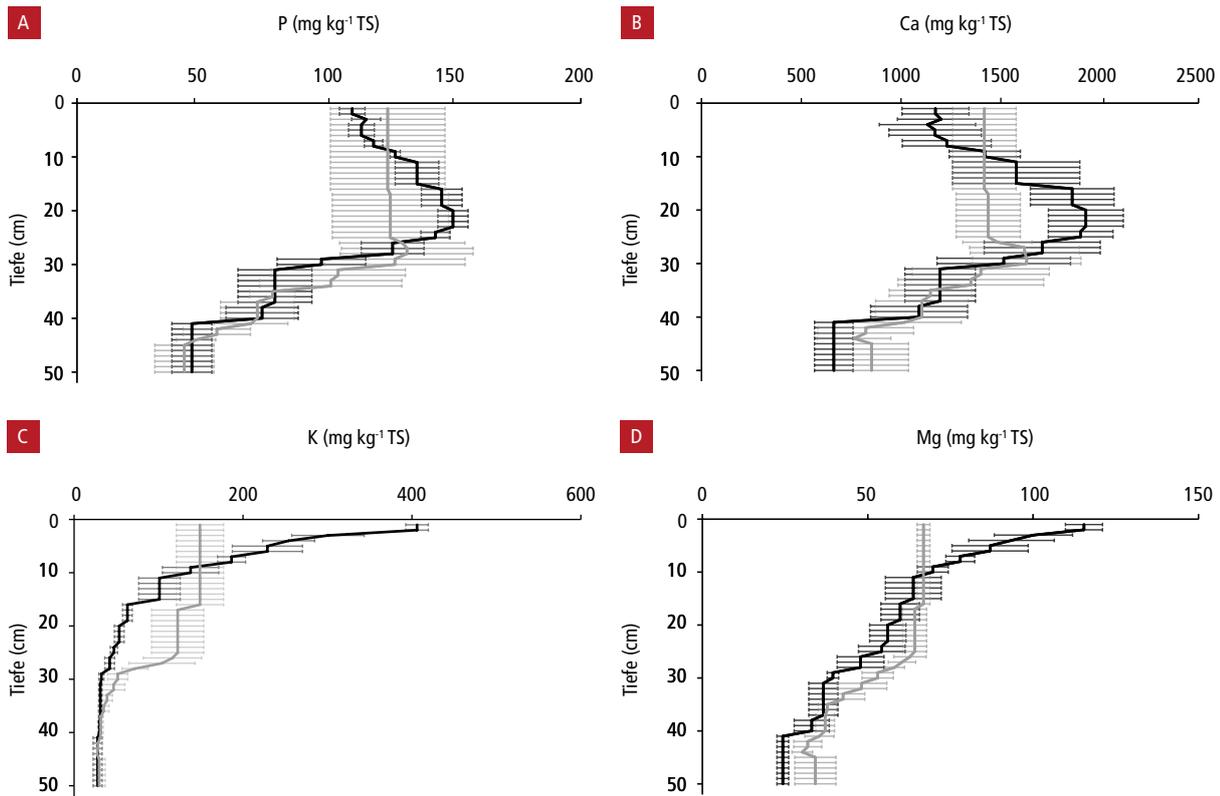
tung der Pflanzenreste bei DS die Hauptursache für die im Vergleich zu PF tiefen  $C_{org}$ - und  $N_{tot}$ -Konzentrationen (Franzluebbers 2002). In den Bodenschichten tiefer als 30 cm wurden zwischen DS und PF keine Unterschiede mehr beim  $C_{org}$ -Gehalt festgestellt. Addiert man die Werte über das ganze Profil, erhält man bei beiden Anbausystemen einen Vorrat von rund 70 t ha<sup>-1</sup>. Es konnte folglich kein Effekt des Anbausystems auf den C-Vorrat festgestellt werden, d. h. DS führte gegenüber PF zu keiner zusätzlichen C-Speicherung über das gesamte Bodenprofil.

Das Anbausystem beeinflusst den pH-Wert (CaCl<sub>2</sub>) des Bodens in den obersten Schichten stark. Die Werte waren im unbearbeiteten Oberboden tiefer als in den gepflügten Flächen. Während bei DS ein saurer (im Oberboden) bis leicht saurer (im Unterboden) Säuregrad festgestellt wurde, war derjenige bei PF über das ganze Profil einheitlich im leicht sauren Bereich. Es besteht eine enge Beziehung zwischen pH-Wert und  $C_{org}$ -Gehalt: Je höher der  $C_{org}$ -Gehalt im Oberboden, desto tiefer war der Säuregrad. Auch Hickman (2002), Houx *et al.* (2011) und Kautz *et al.* (2013) haben festgestellt, dass verrotende Pflanzenrückstände an der Bodenoberfläche und fehlende Bodenbearbeitung zu einer leichten Versauerung des Oberbodens führen können.

Über das ganze 50 cm tiefe Profil sind die P- und Ca-Vorräte bei beiden Anbausystemen ziemlich gleichmässig verteilt. Bei beiden Nährstoffen stellte man jedoch bei DS in ca. 20–25 cm Tiefe schwache Konzentrationsmaxima fest. In den letzten vier Jahren erfolgten auf den DS-Flächen weder P- noch Ca-Düngegaben. Durch die Freisetzung von Nährstoffen aus Pflanzenrückständen werden nachfolgenden Kulturen bedeutende Nährstoffmengen zur Verfügung gestellt (Noack *et al.* 2014). Die Konzentrationsmaxima in 20–25 cm Tiefe sind das Ergebnis (i) der



**Abb. 4 |** Kurvenverläufe von A) organischem Kohlenstoff und B) Stickstofftotalgehalt in Abhängigkeit von Anbausystem und Bodentiefe. Schwarze Linien = Direktsaat, graue Linien = Pflug. Die Fehlerbalken entsprechen den Standardfehlern der Mittelwerte. TS = Trockensubstanz.



**Abb. 5** | Kurvenverläufe von A) P-, B) Ca-, C) K- und D) Mg-Konzentration in Abhängigkeit von Anbausystem und Bodentiefe. Schwarze Linien = Direktsaat, graue Linien = Pflug. Die Fehlerbalken entsprechen den Standardfehlern der Mittelwerte. TS = Trockensubstanz.

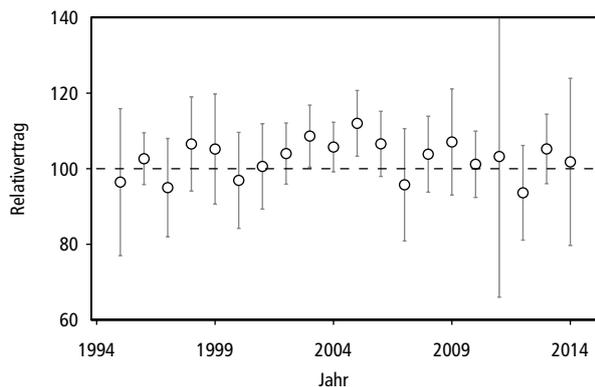
Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen in vorwiegend oberflächennahen Schichten, (ii) eines abwärts gerichteten Transports oder (iii) einer Kombination beider Prozesse. Der abwärts gerichtete Transport könnte durch die kontinuierlicher verlaufenden Makroporen bei DS gefördert werden. Im Unterboden bestanden zwischen DS und PF keine P- oder Ca-Gehaltsunterschiede. Der maximale P-Gehalt in Bezug auf die Tiefe scheint bei DS ein stabiles Phänomen zu sein: Sturny *et al.* (2007) stellten bei den P-Gehalten im Oberacker schon nach zehn Versuchsjahren eine Anreicherung bei 15–20 cm Tiefe fest.

Eine Anreicherung in den obersten Bodenschichten von DS ist bei den Nährelementen Mg und K zu beobachten. Die Mg- und K-Konzentration war in der Schicht 0–2 cm um 50 % beziehungsweise 75 % höher als in 10–30 cm Tiefe. Obwohl bei PF im Vergleich zu DS höhere Düngergaben verabreicht wurden, verhinderte die Bodenbearbeitung bei PF die Bildung eines ähnlichen Konzentrationsgradienten.

Über alle Kulturen und die gesamten 20 Versuchsjahre hinweg unterscheidet sich der durchschnittliche Relativertrag bei DS (102,6 %) nicht signifikant von demjenigen bei PF. Soane *et al.* (2012), Derpsch *et al.* (2014) und Pittelkow *et al.* (2014) weisen darauf hin, dass bei einem erfolgreich umgesetzten DS-System die Pflanzen-

reste auf der Bodenoberfläche liegen bleiben sollen und eine ausgewogene, auf DS adaptierte Fruchtfolge (inkl. Gründüngung) angebaut werden soll. So konnte auf dem Oberacker bei DS ein im Vergleich zu PF tendenziell höherer Relativertrag erzielt werden, obwohl an diesem Versuchsstandort gemäss Klassifikation von Pittelkow *et al.* (2014) feuchte, d.h. für DS ungünstige klimatische Bedingungen vorherrschen. Ausserdem lag der Fokus des Versuchs nicht auf der Ertragsmaximierung einer einzelnen Kultur, sondern auf der Optimierung des Fruchtfolgeertrags. Da der Boden bei DS mechanisch nicht gelockert wird, wirkt sich in diesem System eine Bodenverdichtung besonders nachteilig aus. Damit ein solches Risiko z. B. bei der Zuckerrübenenernte minimiert werden kann, werden die Zuckerrüben relativ früh geerntet. Eine frühe Ernte wirkt sich jedoch negativ auf Rüben- und Zuckerertrag bei DS aus: Durch das langsamere Jugendwachstum entwickeln sich die Zuckerrüben bei DS im Vergleich zu PF verzögert und erreichen die Reife später.

Im Vergleich zu PF waren die DS-Erträge bei Kartoffeln signifikant und bei Zuckerrüben tendenziell geringer. Der für Wurzel- und Knollenfrüchte eher ungünstige, d.h. dichter gelagerte Oberboden bei DS könnte ein Grund dafür sein. Die Kartoffeln waren bis 1999 Teil der Fruchtfolge, wurden jedoch ab 2000 nicht mehr



**Abb. 6** | Relativertrag im Zeitraum 1994 bis 2014. Helle Kreise = Direktsaat; gestrichelte horizontale Linie = Pflug (= 100 %). Jeder helle Kreis entspricht dem Mittelwert von sechs Kulturen (= Jahresrelativertrag). Die Fehlerbalken entsprechen den Standardfehlern der Mittelwerte.

angebaut. Die bei DS für diese Kultur gewählte Anbautechnik – das Direktmulchlegen – war nicht ausreichend weit entwickelt, was bei der Ernte zu einem höheren Anteil beschädigter Knollen durch harte Schollen führte. Bei Leguminosen und Getreide waren die Relativerträge bei DS dagegen signifikant höher als bei PF. Die teilweise grossen Unterschiede lassen sich weder mit unterschiedlich hohem Beikraut- oder Krankheitsdruck noch mit dem feuchten mitteleuropäischen Klima erklären. Die Leguminosen entwickelten sich gut, obwohl sie gemäss Håkansson (2005) besonders empfindlich auf Bodenverdichtung reagieren. Der Oberboden bei DS weist grössere Eindringwiderstände auf und ist ab 10 cm Tiefe dichter gelagert als bei PF. Trotzdem entwickelten diese Kulturen genügend Wurzeln mit lebenswichtigen Rhizobien. Damit wird die These gestützt, dass gepflügte Böden nicht zwangsläufig die besten Voraussetzungen für ein optimales Pflanzenwachstum bieten (Reichert *et al.* 2009). Möglicherweise könnte die dichtere Lagerung durch die höheren Nährstoffgehalte im Oberboden kompensiert werden. Die höheren Getreideerträge bei DS sind hingegen einfacher zu erklären: Weizen und Gerste reagieren im Allgemeinen weniger empfindlich auf dicht gelagerte Böden (Håkansson 2005).

Ein weiterer Grund für die höheren Erträge bei DS könnte die bessere Wasserversorgung der Pflanzenwurzeln sein. Sturny *et al.* (2007) stellten fest, dass bei DS mehr pflanzenverfügbares Bodenwasser vorhanden ist, und sich direkt gesäte Pflanzen auch während Trockenperioden kontinuierlich mit Wasser versorgen können. Mit der Regression «Ertrag verschiedener Kulturen vs. Niederschlag in ausgewählten Wachstumsperioden» konnte jedoch keine ertragsrelevante Beziehung gefunden werden.

## Schlussfolgerungen

- Die Nährstoffvorräte waren über das ganze 50 cm tiefe Profil betrachtet in beiden Anbausystemen bei allen untersuchten Elementen ähnlich hoch. Die Nährstoffe  $N_{\text{tot}}$ , K und Mg zeigten bei DS einen im Vergleich zu PF uneinheitlicheren Tiefenverlauf mit einer Anreicherung in der obersten Bodenschicht. Im Vergleich zu den anderen Nährstoffen waren P und Ca bei DS homogener über die Bodentiefe verteilt, jedoch konnten auch bei diesen Nährstoffen in rund 20–25 cm Tiefe Konzentrationsmaxima bei DS festgestellt werden. Bei langjähriger DS sind deshalb die Düngergaben beziehungsweise die GRUDAF entsprechend anzupassen.
- Der  $C_{\text{org}}$ -Gehalt war bei DS in der obersten Bodenschicht signifikant höher als bei PF. Über das ganze Profil hinweg konnte jedoch bei DS keine stärkere C-Sequestrierung festgestellt werden als bei PF.
- Der durchschnittliche Relativertrag über alle Kulturen hinweg war bei DS tendenziell höher als bei PF, nämlich um 2,6 %. Bei Wintergetreide und Leguminosen wurden bei DS signifikant höhere Relativerträge erzielt, wohingegen die bis 1999 angebauten Kartoffeln bei DS signifikant weniger Ertrag lieferten als bei PF. Im Vergleich zu PF wurden bei DS auch bei Zuckerrüben tendenziell geringere Erträge festgestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit DS auch im gemässigten mitteleuropäischen Klima ebenso hohe oder sogar höhere Erträge als mit PF erzielt werden können. Entscheidend für den Erfolg bei DS sind die Wahl einer geeigneten Fruchtfolge und das Belassen einer genügend grossen Menge an Pflanzenrückständen auf der Bodenoberfläche. ■

**Riassunto****Rese e parametri pedologici dopo 20 anni di semina diretta e aratura**

Dal 1994, sulla superficie di osservazione sul lungo periodo Oberacker presso il centro Inforama Rütli a Zollikofen, vengono confrontati i due sistemi di coltivazione della semina diretta e dell'aratura su argilla sabbiosa povera di humus. In una prova sulle file con sei diverse parcelle, nell'ambito di una rotazione colturale vengono coltivate le sei colture piselli proteici, frumento autunnale, fave, orzo autunnale, barbabietole da zucchero e silomais. Dopo 20 anni di sperimentazione è stato analizzato l'apporto di sostanze nutritive del suolo e sono state valutate statisticamente le rese. Prelevati a strati fino a una profondità di 50 cm, i campioni di terreno sono stati analizzati per rilevare carbonio organico ( $C_{org}$ ), contenuto totale di azoto ( $N_{tot}$ ), fosforo (P), calcio (Ca), potassio (K), magnesio (Mg), valore di pH e densità di stratificazione. A differenza di quanto riscontrato nel sistema dell'aratura, nella semina diretta è stato rilevato un arricchimento di  $C_{org}$ ,  $N_{tot}$ , K e Mg nello strato superiore del suolo, mentre il valore di pH era inferiore, e P e Ca presentavano lievi picchi di concentrazione a circa 20 cm di profondità. Osservandolo per tutto il profilo del suolo, il livello di  $C_{org}$  e di tutti gli elementi nutritivi esaminati era analogamente elevato in entrambi i sistemi.

In media la resa relativa nel corso del ventennio è tendenzialmente maggiore del 2,6 per cento nella semina diretta rispetto all'aratura, ma non è significativamente più alta. Nella rotazione colturale adeguata per molti anni alla semina diretta (dal 2000 senza patate) con copertura permanente del suolo, i cereali invernali e le leguminose coltivati con il sistema della semina diretta hanno prodotto rese addirittura significativamente più elevate che nei terreni arati.

**Summary****Crop yield, and nutrients in the soil profile after 20 Years of no-till and conventional tillage**

No-till and conventional plough tillage have been compared since 1994 in the Oberacker long-term field experiment at Inforama Ruetti in Zollikofen (Switzerland) on a slightly humic sandy loam soil. Crops were grown in a six-year crop rotation (peas, winter wheat, field beans, winter barley, sugarbeets and silage maize) in a strip trial with six adjoining plots. Twenty years into the trial, soil nutrient status was investigated and crop yields were statistically analysed. Soil was sampled layer-by-layer down to a depth of 50 cm, and analysed for soil organic carbon ( $C_{org}$ ), total nitrogen content ( $N_{tot}$ ), phosphorus (P), calcium (Ca), potassium (K) and magnesium (Mg) content, as well as pH and bulk density. Unlike in the conventional tillage system,  $C_{org}$ ,  $N_{tot}$ , K and Mg were concentrated in the surface layer in the no-till system; in addition, the pH was lower and P and Ca had slight concentration maxima at around 20 cm depth. Although the distribution of  $C_{org}$  and nutrients differed significantly between no-till and conventional tillage, stocks of  $C_{org}$  and of all investigated nutrients were similar in both systems. The relative yield averaged over 20 years was 2.6% higher in no-till than in conventional tillage, but the difference was not significant. Winter cereals and legumes had significantly higher yields in the no-till system than in conventionally tilled soils. We conjecture that one of the reasons for the higher crop yields in no-till in the Oberacker long-term field experiment (since 2000 without potatoes) was the well-balanced crop rotation, including cover crops.

**Key words:** tillage system, no-tillage, mould-board ploughing, yield, crop rotation, nutrient storage, soil organic carbon.

**Literatur**

- Das Literaturverzeichnis ist bei den Autoren erhältlich.