Bodenporosität und Gastransport nach 19 Jahren Direktsaat und Pflug

Andreas Chervet[1], Wolfgang G. Sturny[1], Peter Weisskopf[2], Marlies Sommer[2], Ingrid Martínez G.[2] und Thomas Keller[2]
[1]Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern, Fachstelle Bodenschutz, 3052 Zollikofen, Schweiz
[2]Agroscope, Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften INH, 8046 Zürich, Schweiz
Auskünfte: Thomas Keller, E-Mail: thomas.keller@agroscope.admin.ch

Abb. 1 | Das Pflügen lockert zwar den Oberboden, verdichtet aber untere Bodenschichten – auch bei flachem On-Land-Einsatz. (Foto: Liv Kellermann, HAFL)

Einleitung

Bei der Direktsaat (DS) werden die Kulturen ohne vorangehende Bodenlockerung gesät. Mittels Scheibenscharen wird lediglich ein Säschlitz im Boden geöffnet und nach der Saatgutablage geschlossen. Gründe für eine Anwendung der DS sind z. B. die weitgehende Verhinderung der Erosion, der massiv kleinere Treibstoffverbrauch bei der Feldbestellung oder die Reduzierung des Arbeits- und Kostenaufwandes (Soane *et al.* 2012). Der Verzicht auf die Bodenlockerung hat zudem positive Auswirkungen auf die Bodenstruktur. Als Bodenstruktur wird die räumliche Anordnung der festen Bodenbestandteile und der Hohlräume im Boden bezeichnet. Sie bestimmt wichtige bodenphysikalische Funktionen wie z. B. die Tragfähigkeit des Bodens oder den Transport und die Speicherung von Wasser und Gas im Boden. Sind diese Funktionen günstig ausgeprägt, beeinflussen sie bodenchemische

Reaktionen und bodenbiologische Aktivitäten positiv. Der Gastransport (d. h. die Luftdurchlässigkeit und die Gas-Diffusivität) ist dabei ein Schlüsselfaktor, weil er (i) Informationen zur Charakteristik des Porensystems im Boden liefert (Ball 1981) und (ii) die Durchlüftung des Bodens und damit Bodenchemie, Bodenbiologie sowie Wurzelwachstum und Produktivität der Kulturen entscheidend mitgestaltet.

In luftgefüllten Bodenporen setzt sich der Gastransport aus der Diffusion entlang von Konzentrationsgradienten und dem Volumenstrom bei Advektion entlang von Druckschwankungen in der Nähe der Bodenoberfläche zusammen. Während die Diffusion fast unabhängig vom Porenradius ist, ist der Volumenstrom bei Advektion gemäss dem Gesetz von Hagen-Poiseuille proportional zur vierten Potenz des Porenradius. Entsprechend ist die Diffusion überwiegend eine Funktion der luftgefüllten Porosität, während die Luftdurchlässigkeit durch kontinuierlich verlaufende gröbste Bodenporen bestimmt wird (Ball *et al.* 1988). Folglich lassen sich die Gastransporteigenschaften eines Porensystems durch die Kombination von Diffusion, Luftdurchlässigkeit und deren Verhältnis zur luftgefüllten Porosität beschreiben. Diese Parameter geben auch Auskunft über die Kontinuität und Tortuosität des Porensystems eines Bodens (Ball *et al.* 1988).

Wird wie bei DS auf eine Bodenbearbeitung verzichtet, kann dies die Entwicklung der kontinuierlich verlaufenden gröbsten Bodenporen (oft Bioporen) fördern und somit günstig für die Gastransporteigenschaften eines Bodens sein (Hartman *et al.* 2012). Dadurch werden jedoch auch präferenzielle Fliesswege gefördert, die eine rasche Tiefenverlagerung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln begünstigen (Jarvis 2007). Im Vergleich zu gepflügten Böden besteht bei DS eine Tendenz zu dichter gelagerten Oberböden, was zu eingeschränkter Durchlüftung und für die Wurzeln zu erhöhtem Eindringwiderstand führt (Kay und VandenBygaart 2002; Schjønning und Thomsen 2013). Demgegenüber hat die herkömmliche Bodenbearbeitung mit dem Pflug (PF) ungünstige Auswirkungen auf die Regenwurmpopulation und die Porenkontinuität (Kay und VandenBygaart 2002). Beim Pflügen fördert das Abstützen der Traktorräder auf dem Furchengrund die Unterbodenverdichtung (Lipiec und Hatano 2003), was zur Ausbildung einer Pflugsohle mit eher horizontal ausgerichtetem Porensystem führt (Alaoui *et al.* 2011). Zu guter Letzt verändert die Bodenbearbeitung auch die Tiefenverteilung des organischen Kohlenstoffs, was wiederum die Bodenstruktur beeinflusst (Soane *et al.* 2012; Artikel auf S. 216 ff).

Zusammenfassung

Seit 1994 werden auf der Dauerbeobachtungsfläche Oberacker am Inforama Rütti 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 sechs Kulturen angebaut. Nach 19 Versuchsjahren wurden den Böden beider Anbausysteme ungestörte Zylinderproben in 10 cm und in 40 cm Tiefe entnommen. Ergänzt wurde die Probennahme mit Referenzproben aus den Dauergrünlandstreifen zwischen den Versuchsparzellen. An den Zylinderproben wurde die luftgefüllte Porosität (ε_a), die relative Gas-Diffusivität (D_p/D_0) und die Luftdurchlässigkeit (k_a) bei fünf verschiedenen Matrixpotenzialen zwischen –30 und –500 hPa bestimmt. Bei der Direktsaat und in den Dauergrünlandstreifen waren die Porensystem- und Gastransporteigenschaften sowohl im Ober- als auch im Unterboden ähnlich, im Oberboden allerdings ungünstiger. Im Gegensatz dazu zeigten die gepflügten Böden eine klare Schichtung: ε_a, D_p/D_0 und k_a waren im Oberboden günstiger, im Unterboden ungünstiger ausgeprägt als bei Direktsaat und in den Dauergrünlandstreifen. Die bioporenreichen Unterböden bei Direktsaat führten zu tendenziell höheren Erträgen. Bei einer Evaluation von Anbausystemwirkungen auf die Bodenqualität müssen das ganze Bodenprofil (d. h. Ober- und Unterboden) untersucht und zentrale Bodenfunktionen wie die Ertragsbildung in die Beurteilung miteinbezogen werden.

Material und Methoden

Standort, Versuchsdesign und Bodenbearbeitung sind im Artikel «Erträge und Bodenparameter nach 20 Jahren Direktsaat und Pflug» auf S. 216 ff beschrieben.

Probenahmen und Laborarbeiten

Um die langfristigen Auswirkungen unterschiedlicher Anbausysteme auf die luftgefüllte Porosität (ε_a), die relative Gas-Diffusivität (D_p/D_0) und die Luftdurchlässigkeit (k_a) zu untersuchen, wurden im Frühjahr 2013 bei DS und PF ungestörte Zylinderproben (Höhe: 60 mm, Durchmesser: 100 mm) aus den beiden Bodentiefen 8–14 cm und 35–41 cm (nachfolgende Bezeichnungen: 10 cm bzw. 40 cm) entnommen. Die Beprobung 19 Jahre nach Versuchsbeginn erfolgte auf drei der sechs Parzellen ungefähr ein halbes Jahr nach der letzten Bodenbearbeitung bei PF. Ergänzt wurden die Probenahmen mit Referenzproben von zwei zwischen den Versuchsparzellen liegenden Dauergrünlandstreifen (DG).

Im Labor wurden die Zylinderproben mit Wasser gesättigt und schrittweise über fünf verschiedene Matrixpotenziale (Ψ) bei folgenden Stufen entwässert: –30 hPa (pF 1,5; wobei pF = log[$-\Psi$]), –60 hPa (pF 1,8), –100 hPa (pF 2,0), –200 hPa (pF 2,3) und –500 hPa (pF 2,7). Bei jedem Matrixpotenzial wurden die Zylinderproben gewogen und ε_a, D_p/D_0 sowie k_a gemessen. Bei jedem Matrixpotenzial wurde der jeweilige Porenklassendurchmesser (d, in µm) anhand der Gleichung $d = 3000/\Psi$ (Ψ = Matrixpotenzial in hPa) berechnet (Schjønning *et al.* 2002). k_a wurde mit einer Steady-State-Methodik gemessen. Bei D_p/D_0 wurde ebenfalls ein Steady-State-Ansatz mit Sauerstoff (O_2) als diffundierendem Gas gewählt.

Resultate und Diskussion

Lagerungsdichte und luftgefüllte Porosität

Bei PF ist die Lagerungsdichte (Tab. 1) im Oberboden signifikant ($p < 0{,}05$) geringer (1,35 g cm^{-3}) als bei DS (1,47 g cm^{-3}) und DG (1,46 g cm^{-3}). Demgegenüber ist im Unterboden die Lagerungsdichte bei PF (1,54 g cm^{-3}) leicht höher als bei DS und DG (1,49 bzw. 1,48 g cm^{-3}). Während bei DS und DG sowohl im Ober- als auch im Unterboden ähnlich hohe Lagerungsdichten auftreten, wurden bei PF zwischen Ober- und Unterboden signifikant unterschiedliche Dichten festgestellt. Zudem sind die Volumina der Poren mit den grössten Durchmessern (d >100 µm) bei DS und DG im Oberboden kleiner als im Unterboden (Abb. 2). Die im Vergleich zu DS und DG im Oberboden bei PF festgestellte geringere Lagerungsdichte ist weitgehend auf das grössere Volumen der Poren mit d >100 µm zurückzuführen. Bei diesen Poren handelt es sich um Bioporen (Wurzelkanäle oder Regenwurmgänge) oder um Interaggregatporen (Hohlräume zwischen Bodenfragmenten, die bei der Bodenbearbeitung entstehen). Bei den übrigen Porenklassen sind zwischen den Anbausystemen kaum Unterschiede festzustellen. Nur die Volumina der Poren mit d < 6 µm sind bei DS, PF und DG im Oberboden grösser als im Unterboden. Dexter *et al.* (2008) erklären dies mit geringeren C_{org}-Gehalten im Unterboden. Sehr kleine Porendurchmesser (d <3 µm) bieten Schutzräume für Mikroorganismen gegenüber Räubern (Schjønning *et al.* 2002).

Bei PF sind die ε_a-Werte im Oberboden bei allen Matrixpotenzialen signifikant grösser als bei DS und DG (Abb. 3A); im Unterboden hingegen sind die Werte bei DS und DG grösser als bei PF (Abb. 3B). Bei ε_a-Werten über der gestrichelten Linie von (Abb. 3A und B) ist das Wurzelwachstum gut (Grable und Siemer 1968; McGarry 1993; McHugh *et al.* 2009; Schjønning und Thomsen 2013). Bei PF wird diese Linie in beiden Bodentiefen schon beim höchsten Matrixpotenzial (pF 1,5), d.h. bei sehr feuchtem Boden, erreicht. Im Oberboden von DS und DG hingegen wird diese Grenzlinie erst bei den Matrixpotenzialen von pF 2,3 beziehungsweise pF 2,7, d.h. bei abgetrocknetem Boden überschritten.

Relative Gas-Diffusivität

Im Vergleich zu DS und DG ist D_p/D_0 bei PF im Oberboden bei allen Matrixpotenzialen signifikant höher, im Unterboden dagegen tiefer (Abb. 3C und D). Die D_p/D_0-Werte von DS und DG unterscheiden sich sowohl im Ober- als auch im Unterboden nicht (Ausnahmen: Mat-

Matrixpotenzial, pF-Wert und Feldkapazität

Das *Matrixpotenzial* ist die Bindungskraft, mit der das Wasser im Boden gehalten wird und entspricht der Bodenwasserspannung mit negativem Vorzeichen. Aus der Beziehung zwischen Matrixpotenzial und Wassergehalt lassen sich Rückschlüsse ziehen über das Porenvolumen und die Verteilung der Porengrössen im Boden. Je feiner die Poren, desto stärker ist das Bodenwasser gebunden. Der negative Logarithmus des Matrixpotenzials nennt man *pF-Wert*. Je höher der pF-Wert, desto trockener der Boden.
Die *Feldkapazität* bezeichnet den Wassergehalt des Bodens der sich einige Tage nach der Wassersättigung über die Entwässerung durch die Gravitationskraft einstellt.

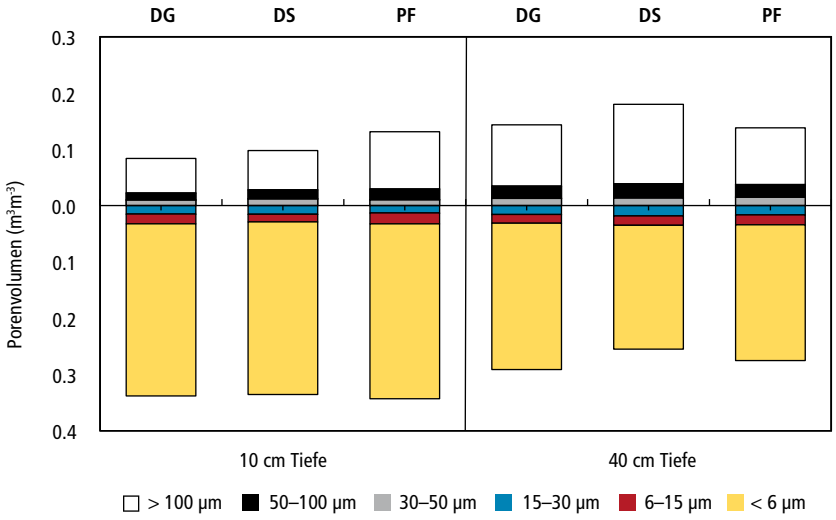

Abb. 2 | Volumina von sechs Porengrössenklassen, berechnet aufgrund von Messungen bei fünf Matrixpotenzialen für Dauergrünlandstreifen (DG) und die Anbausysteme Direktsaat (DS) und Pflug (PF) in 10 cm beziehungsweise 40 cm Bodentiefe.

rixpotenziale pF 1,5 und pF 1,8 im Unterboden). Wurde die gepunktete Linie bei D_p/D_0 = 0,005 als kritische Grenze für die Bodendurchlüftung vorgeschlagen (Stepniewski 1980, 1981), gibt die gestrichelte Linie bei D_p/D_0 = 0,02 die kritische Grenze für aerobe Bedingungen in sandigen Böden an (Schjønning *et al.* 2003). Die D_p/D_0-Werte übertreffen den 0,005-Wert bei jedem Matrixpotenzial, im Oberboden von DS und DG bei pF 1,5 allerdings nur knapp. Im Unterboden sind die D_p/D_0-Werte bei DS schon beim höchsten Matrixpotenzial (pF 1,5) über dem 0,02-Wert, bei DG ab einem Matrixpotenzial von pF 1,8 und bei PF erst bei pF 2,3. Im Oberboden hingegen wurde der 0,02-Wert bei PF schon beim Matrixpotenzial von pF 1,8 erreicht bzw. überschritten, bei DS und DG dagegen erst beim tiefsten Matrixpotenzial von pF 2,7.

Luftdurchlässigkeit

Bei PF sind die k_a-Werte im Oberboden bei allen Matrixpotenzialen grösser als bei DS und DG (Abb. 3E), die mit den Volumina der Poren mit d >100 µm in 10 cm Tiefe korrelieren (Abb. 2). Bei einem Matrixpotenzial von pF 2,3 weisen die log(k_a)-Werte Beträge von 1,3 auf (entsprechend k_a = 20 µm²). Unter diesem k_a-Wert sind die Böden gemäss Fish und Koppi (1994) schlecht durchlässig und unzureichend belüftet. Im Vergleich zu DS und DG sind bei PF im Unterboden tiefere k_a-Werte zu beobachten, sie liegen aber bei allen Systemen und allen Matrixpotenzialen über dem Wert von log(k_a) = 1,3 (Abb. 3F). Trotz der geringeren k_a-Werte im Unterboden unterscheiden sich – verglichen mit dem Oberboden – bei PF die Volumina der Poren mit d >100 µm nicht (Abb. 2). Folglich scheint bei PF der ›

Tab. 1 | Ober- (10 cm Tiefe) und Unterbodeneigenschaften (40 cm Tiefe) in Abhängigkeit vom Anbausystem. Partikelgrösse der Körnungsklassen: Ton < 0,002 mm; Schluff 0,002–0,05 mm; Sand 0,05–2 mm. Die Zahl in Klammern entspricht dem Standardfehler des Mittelwertes.

Bodeneigenschaften	Oberboden (10 cm)			Unterboden (40 cm)		
	DS	PF	DG	DS	PF	DG
Ton (Gew.-%)	19,0 (1,7)	18,2 (1,2)	17,4 (1,1)	15,4 (4,3)	16,1 (3,5)	15,4 (6,0)
Schluff (Gew.-%)	22,6 (1,8)	22,7 (0,5)	23,4 (1,5)	19,6 (4,7)	22,0 (1,1)	20,5 (0,0)
Sand (Gew.-%)	58,4 (3,3)	59,1 (0,5)	59,2 (0,9)	65,0 (8,5)	61,9 (2,9)	64,1 (6,0)
C_{org} (Gew.-%)	2,3 (0,3)	2,7 (0,2)	2,6 (0,6)	1,0 (0,3)	1,0 (0,2)	1,0 (0,0)
Lagerungsdichte (g cm⁻³)	1,47 (0,02)	1,35 (0,02)	1,46 (0,02)	1,49 (0,02)	1,54 (0,02)	1,48 (0,03)

DS = Direktsaat, PF = Pflug, DG = Dauergrünlandstreifen, C_{org} = organischer Kohlenstoff.

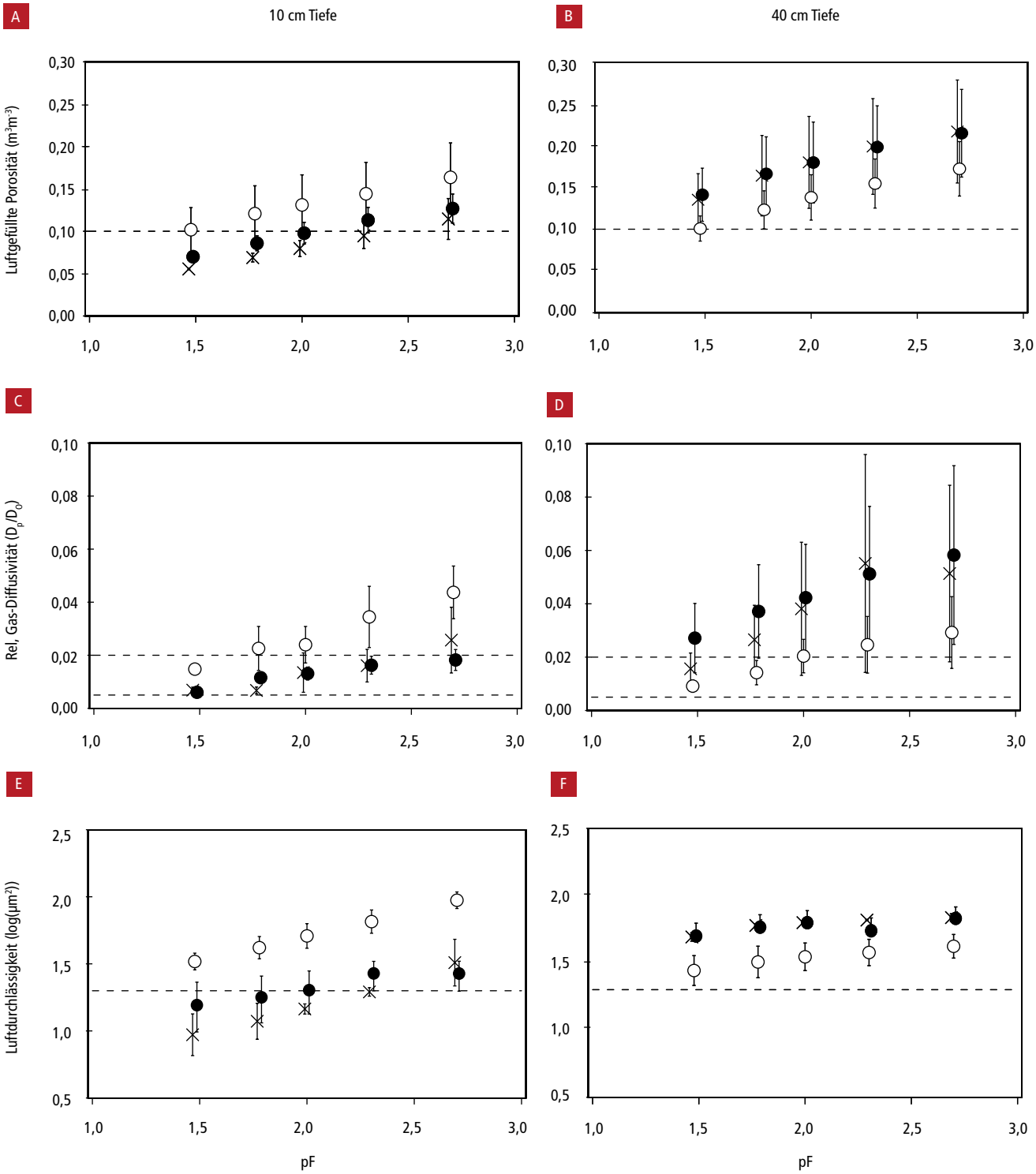

Abb. 3 | Luftgefüllte Porosität (ε_a; A, B), relative Gas-Diffusivität (D_p/D_0; C, D) und Luftdurchlässigkeit (k_a; E, F) in den Dauergrünlandstreifen (Kreuze) und den zwei Anbausystemen Direktsaat (schwarze Kreise) und Pflug (weisse Kreise) in 10 cm (A, C, E) und 40 cm Bodentiefe (B, D, F) als Funktion der Bodenfeuchte (pF = negativer Logarithmus des Matrixpotenzials). Die unterbrochenen Linien entsprechen den Grenzwerten für ε_a nach Grable und Siemer (1968), für D_p/D_0 nach Stepniewski (1980, 1981) bzw. nach Schjønning *et al.* (2003) und für k_a nach Fish und Koppi (1994). Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler des Mittelwertes.

Oberboden eine Makroporosität mit mehr Kontinuität (weniger verstopfte oder enge Poren) bzw. weniger Tortuosität zu besitzen als der Unterboden. Hingegen sind bei DS und DG im Oberboden die Volumina der Poren mit d >100 µm kleiner als im Unterboden (Abb. 2), und die k_a-Werte in 10 cm Tiefe liegen um den Wert von log(k_a) = 1,3 (Abb. 3E). Dies ist auf die fehlende Bodenbearbeitung zurückzuführen. Das Porensystem im Oberboden von DS und DG könnte stärker gewunden sein, was ebenfalls die geringen k_a-Werte erklären würde. Kann das Porensystem im Oberboden bei DS und DG eher als «schwammartig» bezeichnet werden, liegt beim PF-Oberboden eine eher «kanalartige» Porenausprägung vor (Schjønning *et al.* 2002; Schjønning *et al.* 2011). Bei PF sind die eher geringen k_a-Werte im Unterboden auf das Pflügen zurückzuführen: Das Abstützen der Traktorräder in der Furche führte an der Schnittstelle zwischen Ober- und Unterboden zu Scherungen bzw. Verschmierungen der Bioporen und zu einer Dezimierung der Regenwurmpopulation. Diese mechanische Bodenbeanspruchung durch das Pflügen beeinflusst im Unterboden die Porenkontinuität ungünstig, was das Wurzelwachstum reduziert (Munkholm *et al.* 2005; Olesen und Munkholm 2007). Die fehlende Bodenbearbeitung bei DS hingegen führt zu einer Zunahme der Regenwurmpopulation und – im Unterboden – zu mehr Bioporen (Kautz *et al.* 2013). Dies wird mit den vorliegenden Resultaten bestätigt: Im Vergleich zu PF wurden bei DS im Unterboden ein höherer k_a-Wert (Abb. 3F) und mehr Makroporen festgestellt (Abb. 2).

Gastransport und Pflanzenwachstum

Durch hohe D_p/D_0- und k_a-Werte wird der Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre gefördert (Aufnahme von O_2 in den Boden bzw. Abgabe von CO_2 und toxischen Gasen aus der Wurzelzone in die Atmosphäre). Tiefe D_p/D_0- und k_a-Werte hingegen führen im Boden zu tendenziell anaeroben Zuständen, was die Treibhausgasemission fördert. Bezogen auf den von Schjønning *et al.* (2003) für sandige Böden vorgeschlagenen Diffusionsgrenzwert (D_p/D_0 = 0.02) zeigen die an einem sandigen Lehm vorgenommenen Messungen bei feuchten Bodenzuständen tiefe D_p/D_0-Werte im Oberboden bei DS und DG (Abb. 3C). Allerdings blieben die Werte stets über der von Stepniewski (1980, 1981) vorgeschlagenen kritischen Grenze (D_p/D_0 = 0,005). Bei DS könnten jedoch andere Werte gelten, da diese Diffusionsgrenzwerte in gepflügten Böden hergeleitet wurden (Reichert *et al.* 2009). Bei vorgegebenem Matrixpotenzial ist die Transportkapazität für Gas bei PF im Oberboden am höchsten und gleichzeitig im Unterboden am tiefsten. Aufgrund der D_p/D_0-Werte lassen sich keine direkten Schlüsse auf Emissionen von Treibhausgasen (N_2O, CO_2) ziehen, da Faktoren wie Temperatur, Interaktionen zwischen verschiedenen Mikroorganismen-Gruppen und N- beziehungsweise C-Verfügbarkeit nicht berücksichtigt werden, obwohl sie einen wesentlichen Einfluss auf den Gastransport haben (Ball 2013).

Vorausgesetzt, dass im Oberboden die biologische Aktivität und das Wurzelwachstum grösser sind als im Unterboden, müsste bei PF im Vergleich zu DS und DG auf generell günstigere Wachstumsbedingungen geschlossen werden. Demgegenüber trocknet der Oberboden bei PF schneller ab (Abb. 3C), und tiefe Gastransportkapazitäten bei DS und DG beschränken sich auf den Oberboden (Abb. 3E und F) und begrenzte Zeiträume (bei nassem Bodenzustand bis pF 2,0). Kritisch tiefe Werte werden auch bei PF im Unterboden erreicht. In den Sommermonaten Juni bis August wurden von Chervet *et al.* (2006) Matrixpotenzial- und TDR-Messungen in wachsendem Mais durchgeführt. Bei DS fand man an der Oberfläche leicht feuchtere durchschnittliche Bodenbedingungen und im Unterboden leicht trockenere Bedingungen als in PF. Gut *et al.* (2015) fand dagegen keinen Unterschied zwischen DS und PF bezüglich der langfristigen Matrixpotenzial-Durchschnittswerte in 30 cm Tiefe.

Da Pflanzen einen Grossteil ihres Wasser- und Nährstoffbedarfes aus dem Unterboden beziehen, bewirken Unterbodenverdichtungen dauerhafte Ertragsrückgänge (Kautz *et al.* 2013). Einen mit Pflanzenwurzeln gut erschlossenen Unterboden belegen die im Vergleich zu PF bei DS signifikant höheren Erträge bei den Kulturen Gerste, Weizen, Ackerbohnen und Eiweisserbsen (s. Artikel auf S. 216 ff.) Umgekehrt könnten die tendenziell höheren Zuckerrübenerträge mit locker gelagerten PF-Oberböden begründet werden. Im Artikel auf S. 216 ff wird postuliert, dass bei DS die grössere Dichte des Oberbodens durch höhere Nährstoff- und C_{org}-Konzentrationen in 0–10 cm Tiefe kompensiert wird.

Im Vergleich zu DS ist die Regenwurmbiomasse bei PF nach zehn Versuchsjahren um rund 50 % kleiner (Maurer-Troxler *et al.* 2005). Insbesondere die tief grabende anözische Art *Lumbricus terrestris* ist bei DS viel häufiger vertreten als bei PF. Diese Erkenntnisse korrelieren mit den tieferen D_p/D_0- und k_a-Werten im Unterboden bei PF und belegen, dass bei DS mehr durchgehende Bioporen vorhanden sind (Dao 1996). Dies erleichtert den Pflanzenwurzeln die Erschliessung des Unterbodens (Kautz *et al.* 2013), was auf dem Oberacker bei einzelnen Kulturen zu signifikant höheren DS-Erträgen beigetragen hat.

Schlussfolgerungen

Die Werte von ε_a, D_p/D_0 und k_a sind bei langjähriger DS ähnlich jenen bei DG, mit geringen Unterschieden zwischen Ober- und Unterboden. Bei PF dagegen unterscheiden sich die D_p/D_0- und k_a-Werte zwischen Ober- und Unterboden deutlich. Während das Porensystem im lockeren Oberboden bei PF durch die Bodenbearbeitung geprägt ist, scheinen bei DS und DG die Poren in 10 cm Tiefe stärker gewunden zu sein. Der Unterboden dagegen ist bei PF dichter gelagert als bei DS und DG und weist aufgrund der geringeren Anzahl durchgehender Bioporen ungünstigere D_p/D_0 und k_a-Werte auf. Dies beeinflusst auch Bodenfunktionen wie Wasseraufnahmefähigkeit und Erosionswiderstand. Kritisch tiefe Werte können D_p/D_0 und k_a unter nassen Bodenbedingungen bei DS und DG im Oberboden und bei PF im Unterboden erreichen. Da die Ergebnisse der Bodenqualitätsbeurteilung zwischen Ober- und Unterboden genau entgegengesetzt verlaufen können, muss eine Evaluation von Anbausystemen bezüglich Effekten auf die Bodenqualität die Eigenschaften des gesamten Bodenprofils berücksichtigen. Die ausgeprägten Systemunterschiede zwischen DS und PF haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Erträge der einzelnen Kulturen: Während Weizen, Gerste, Ackerbohnen und Eiweisserbsen bei DS signifikant höhere Erträge erbrachten, zeigten Zuckerrüben bei PF tendenziell höhere Erträge (s. Artikel S. 216 ff). ■

Literatur

- Alaoui A., Lipiec J. & Gerke H.H., 2011. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil Till. Res.* **115–116**, 1–15.
- Ball B.C., 1981. Modelling of soil pores as tubes using gas permeabilities, gas diffusivities and water release. *J. Soil Sci.* **32**, 465–481.
- Ball B.C., 2013. Soil structure and greenhouse gas emissions: a synthesis of 20 years of experimentation. *Eur. J. Soil Sci.* **64**, 357–373.
- Ball B.C., O'Sullivan M.F. & Hunter R., 1988. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. *J. Soil Sci.* **39**, 327–339.
- Chervet A., Ramseier L., Sturny W.G., Weisskopf P., Zihlmann U., Müller M. & Schafflützel R., 2006. Bodenwasser bei Direktsaat und Pflug. *Agrarforschung* **13**, 162–169.
- Dao T.H., 1996. Tillage system and crop residue effects on surface compaction of a Paleustoll. *Agron. J.* **88**, 141–148.
- Fish A.N. & Koppi A.J., 1994. The use of a simple field air permeameter as a rapid indicator of functional soil pore space. *Geoderma* **63**, 255–264.
- Grable A.R. & Siemer E.G., 1968. Effect of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **32**, 180–186.
- Gut S., Chervet A., Stettler M., Weisskopf P., Sturny W.G., Lamandé M., Schjønning P. & Keller T., 2015. Seasonal dynamics in wheel load-carrying capacity of a loam in the Swiss Plateau. *Soil Use Manage.* **131**, 132–141.
- Hartmann P., Zink A., Fleige H. & Horn R., 2012. Effect of compaction, tillage and climate change on soil water balance of Arable Luvisols in Northwest Germany. *Soil Till. Res.* **124**, 211–218.
- Jarvis N.J., 2007. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *Eur. J. Soil Sci.* **58**, 523–546.
- Kautz T., Amelung W., Ewert F., Gaiser T., Horn R., Jahn R., Javaux M., Kemna A., Kuzyakov Y., Munch J., Pätzold S., Peth S., Scherer H.W., Schloter M., Schneider H., Vanderborght J., Vetterlein D., Walter A., Wiesenberg G.L.B. & Köpke U., 2013. Nutrient acquisition from arable susoils in temperate climates: A review. *Soil Biol. Biochem.* **57**, 1003–1022.
- Kay B.D. & VandenBygaart A.J., 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.* **66**, 107–118.
- Lipiec J. & Hatano R., 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma* **116**, 107–136.
- Maurer-Troxler C., Chervet A., Ramseier L., Sturny W.G. & Oberholzer H.-R., 2005. Bodenbiologie nach zehn Jahren Direktsaat und Pflug. *Agrarforschung* **12**, 460–465.
- McGarry D., 1993. Degradation of soil structure. In: McTainish, G., Boughton, W. (Eds.), Land Degradation Processes in Australia. Longman Cheshire, London, pp. 271–305.
- McHugh A.D., Tullberg J.N. & Freebairn D.M., 2009. Controlled traffic farming restores soil structure. *Soil Till. Res.* **104**, 164–172.
- Munkholm L.J., Schjønning P. & Rüegg K., 2005. Mitigation of subsoil recompaction by light traffic and on-land ploughing: I. Soil response. *Soil Till. Res.* **80**, 149–158.
- Olesen, J.E., Munkholm, L.J., 2007. Subsoil loosening in a crop rotation for organic farming eliminated plough pan with mixed effects on crop yield. *Soil Till. Res.* **94**, 376–385.
- Reichert J. M., Suzuki L. E. A. S., Reinert D. J., Horn R. & Håkansson I., 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.* **102**, 242–254.
- Reynolds W.D. & Clarke Topp G., 2008. Soil water analyses: principles and parameters. In: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), Soil Sampling and Methods of Analysis. 2nd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA, pp. 913–937.
- Schjønning P., Thomsen I.K., Petersen S.O., Kristensen K. & Christensen B.T., 2011. Relating soil microbial activity to water content and tillage-induced differences in soil structure. *Geoderma* **163**, 256–264.
- Schjønning P., Munkholm L.J., Moldrup P. & Jacobsen O.H., 2002. Modelling soil pore characteristics from measurements of air exchange: the long-term effects of fertilization and crop rotation. *Eur. J. Soil Sci.* **53**, 331–339.
- Schjønning P. & Thomsen I.K., 2013. Shallow tillage effects on soil properties for temperate-region hard-setting soils. *Soil Till. Res.* **132**, 12–20.
- Schjønning P., Thomsen I.K., Moldrup P. & Christensen B.T., 2003. Linking soil microbial activity to water and air-phase contents and diffusivities. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **67**, 156.165.
- Soane B.D., Ball B.C., Arvidson J., Basch G., Moreno F.& Roger-Estrade J., 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil Till. Res.* **118**, 66–87.
- Stepniewski W., 1980. Oxygen diffusion and strength as related to soil compaction: I. ODR. *Pol. J. Soil Sci.* **13**, 3–13.
- Stepniewski W., 1981. Oxygen diffusion and strength as related to soil compaction. II. Oxygen diffusion coefficient. *Pol. J. Soil Sci.* **14**, 3–13.

Riassunto

Porosità del terreno e trasporto di gas dopo 19 anni di semina diretta e aratura

Dal 1994, sulla superficie di osservazione sul lungo periodo Oberacker presso il centro Inforama Rütti 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 superfici gestite, nell'ambito di una rotazione colturale vengono coltivate sei colture. Dopo 19 anni di sperimentazione, dai terreni coltivati con entrambi i sistemi sono stati prelevati campioni cilindrici indisturbati a 10 cm e a 40 cm di profondità. Il prelievo dei campioni è stato integrato con campioni di riferimento ricavati dalle strisce permanentemente inerbite tra le parcelle di sperimentazione. Nei campioni cilindrici sono stati determinati la porosità occupata dall'aria (ε_a), la diffusione relativa del gas (D_p/D_0) e la permeabilità all'aria (k_a) in presenza di cinque diversi potenziali matriciali compresi tra –30 e –500 hPa. Nella semina diretta e nelle strisce permanentemente inerbite le caratteristiche del sistema poroso e del trasporto di gas si presentavano simili sia nello strato superiore che in quello inferiore del suolo, per quanto nello strato superiore fossero più sfavorevoli. Al contrario, i terreni arati mostravano una chiara stratificazione: ε_a, D_p/D_0 e k_a erano più favorevoli nello strato superiore del suolo e più sfavorevoli in quello inferiore rispetto a quanto riscontrato nella semina diretta e nelle strisce permanentemente inerbite. Ricchi di biopori, gli strati inferiori dei terreni coltivati con il sistema della semina diretta hanno prodotto rese tendenzialmente maggiori. Nell'ambito di una valutazione degli effetti del sistema di coltivazione sulla qualità del terreno sarebbe necessario analizzare l'intero profilo del suolo (vale a dire strato superiore e inferiore) nonché contemplare anche le funzioni centrali del suolo, come la crescita del raccolto.

Summary

Soil porosity and gas transport properties after 19 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 in a strip trial with six adjoining plots. Nineteen years into the trial, undisturbed cylindrical samples were taken at 10 cm and 40 cm depth from both cropping systems. The sampling was supplemented with reference samples from the permanent-grassland strips between the experimental plots. The samples were used to determine air-filled porosity (ε_a), relative gas diffusivity (D_p/D_0) and air permeability (k_a) at five different matrix potentials between –30 and –500 hPa. For no-till and the permanent-grassland strips, pore-system and gas-transport characteristics were similar in both the topsoil and subsoil, although less favourable in the topsoil. By contrast, conventionally tilled soils exhibited a clear stratification: ε_a, D_p/D_0 and k_a were more favourable in the topsoil and less favourable in the subsoil than for no-till and the permanent grassland strips, respectively. With no-till, the biopore-rich subsoils tended to lead to higher yields than under conventional tillage. In an evaluation of impacts of cropping systems on soil quality, the entire soil profile (i.e. topsoil and subsoil) should be studied, and key soil functions such as productivity should be included in the assessment.

Key words: air-filled porosity, air permeability, gas diffusivity, tillage system, no-tillage, mouldboard ploughing.