

Einfluss des Pflügens auf das Bodengefüge

Peter WEISSKOPF und Urs ZIHLMANN, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Reckenholz (FAL), CH-8046 Zürich
 Conrad WIERMANN und Rainer HORN, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian Albrechts-Universität, D-24118 Kiel
 Thomas ANKEN und Etienne DISERENS, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökonomie und Landtechnik, CH-8356 Tänikon
 Auskünfte: Peter Weiskopf, e-mail: peter.weisskopf@fal.admin.ch, Fax +41 (0)1 377 72 01, Tel. +41 (0)1 377 73 27

Bei einem Vergleich von konventionellem Pflügen und Onland-Pflügen hat sich gezeigt, dass das konventionelle Pflügen unmittelbar unter der befahrenen Pflugfurche zu erheblich stärkeren Beeinträchtigungen der Wasserleitfähigkeit («Pflugsohlenbildung») führte und höhere Drücke im Unterboden verursachte als das Onland-Verfahren. Verursacht wurden diese Effekte in erster Linie durch die Antriebsräder des Traktors, während die Pflugscharen einen deutlich geringen Einfluss hatten.

Die FAL Zürich-Reckenholz, das Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel sowie die FAT Tänikon haben gemeinsam untersucht, ob «konventionelles Pflügen» und «Onland-Pflügen» das Bodengefüge tatsächlich unterschiedlich beeinflussen. Das

Onland-Pflugkonzept versucht, die Vorteile der Pflugarbeit mit den Zielen einer nachhaltigen Landbewirtschaftung zu verbinden: Im Unterschied zum konventionellen Pflügen fährt der Traktor mit allen vier Rädern auf der unbearbeiteten Bodenoberfläche, so dass in Furchentiefe

geringere Druckbeanspruchungen entstehen.

Vergleich konventionelles mit Onland-Pflügen

In beiden Verfahren (Abb. 1) wurde mit demselben Vierschar-Pflug (ALTHAUS Tierra) an demselben allradgetriebenen Traktor (Gesamtmasse 5,7 t) eine Naturwiese bei sehr feuchten Bodenverhältnissen (Tab. 1) umgebrochen. Die Schnittbreite (35 cm) und Arbeitstiefe der Pflugkörper (etwa 22 cm) waren in beiden Verfahren identisch. Der Traktor wurde ohne Doppel-

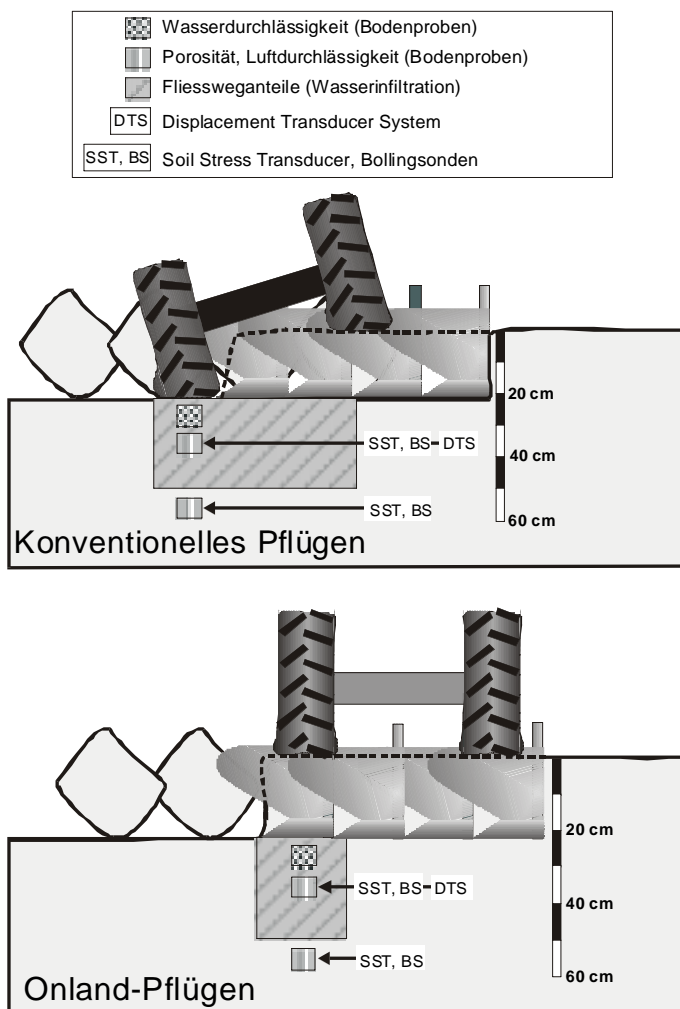


Abb. 1. Schematische Darstellung der beiden Pflugverfahren «konventionell» und «Onland» sowie Angaben zur Lage der Messgeräte beziehungsweise der Beprobungen.

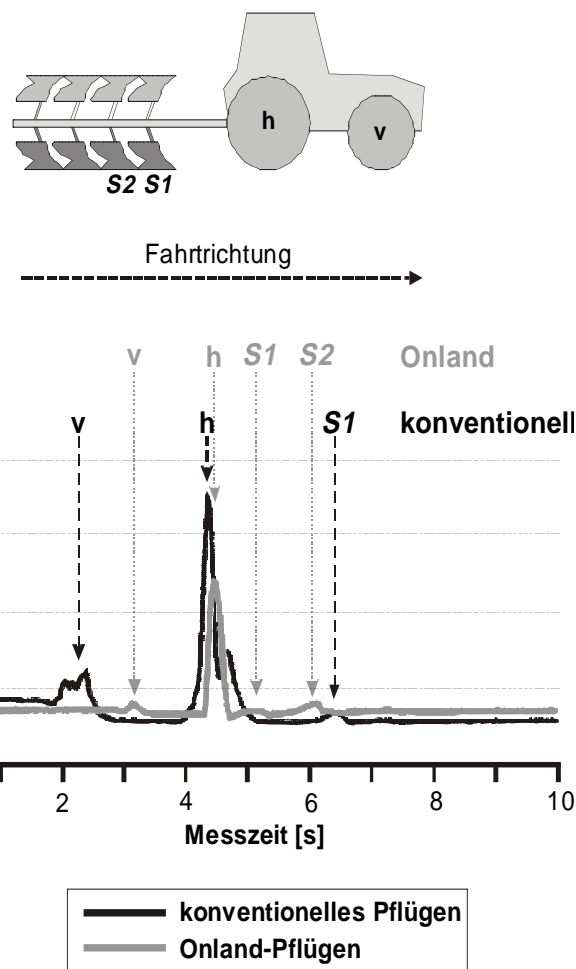


Abb. 2. Zeitlicher Verlauf der Druckbeanspruchungen in 35 cm Bodentiefe (1. Hauptspannung) als Folge der Überfahrten des Traktor-Pflug-Gespans bei konventionellem und bei Onland-Pflügen. Die Messungen erfolgten mit Soil Stress Transducern (SST's); S1 = 1. Pflugschar, S2 = 2. Pflugschar.

Tab. 1. Bodeneigenschaften und -zustand der Versuchsfläche (tiefgründiger, mittelschwerer, grundwasserbeeinflusster Boden: gleyige Braunerde, skelettarm, schwach humoser Lehm über tonigem Lehm)

Horizont ¹	Tiefe cm	Körnung Gew. %		organ. C Gew. %	Skelett Vol. %	pH (H ₂ O)	Gefüge ²	Gesamt- -PV Vol. %	Saug- spannung hPa	Wasser- gehalt Vol. %
		Ton	Schluff							
Ah	0-25	24	44	2,6	2	6,4	kr-sub	n.b.	n.b.	n.b.
B	25-45	29	40	1,7	2	6,4	sub	45	-11	38
Bg	45-80	32	39	1,3	0	6,6	pol	45	-6	40
BCgg	80-120	18	52	n.b.	3	7,5	koh	n.b.	n.b.	n.b.

¹ A=Oberboden, B=verwitterter Unterboden, C=Muttermaterial; g=wechsellnass, gg=periodische Vernässung
² kr=krümelig, sub=subpolyedrisch, pol=polyedrisch, koh=kohärent n.b. = nicht bestimmt

Tab. 2. Radlasten, Bereifungen, Reifeninnendrucke und Kontaktflächen des für die Pflugverfahren «konventionell» und «Onland» verwendeten Versuchstraktors

Achse	Rad	Bereifung	Reifen- innen- druck kPa	Kontaktfläche berechnet ¹ cm ²	Radlast ² kg		Kontaktflächen- druck berechnet ¹ kPa	
					Konv.	Onland	Konv.	Onland
vorne	links	14,9/13-24	130	1230	1060	1125	85	90
	rechts	14,9/13-24	130	1230	1090 ³	1290	87 ³	103
hinten	links	16,9 R 34	120	1950	1400	1500	70	75
	rechts	16,9 R 34	120	1950	2030 ³	1850	102 ³	93

¹ Berechnet nach der Formel von Inns und Kilgour (1978): Kontaktfläche = Reifendurchmesser x Reifenbreite x 0,2697
² Der Unterschied zwischen den Traktor-Gesamtmassen der beiden Verfahren ist auf das leicht unterschiedliche Abstützen des Pfluges zurückzuführen. ³ Furchenrad

Tab. 3. Schlupf- und Bodendruckwerte unter den Fahrspuren der Pflugverfahren «konventionell» und «Onland» (Mediane)

Verfahren	Tiefe cm	Achse, Schar	Schlupf %	max. Bodendruck Bollingsonde kPa	Bodendruck S1 SST ¹ kPa
Onland			7,4		
Konventionell	35	vorn		60	22
		hinten			70
Onland	35	1. Schar		36	13
		2. Schar			15
Konventionell	55	vorn		15	39
		hinten			20
Onland	55	1. Schar		16	24
		2. Schar			n.m.
Konventionell	55	vorn		15	n.m.
		hinten			n.m.
Onland	55	1. Schar		16	n.m.
		2. Schar			n.m.
kgD 05			4,4	11	

¹ S1 = Erste Hauptspannung n.m. = nicht messbar Gerastert: Statistisch signifikante Effekte

bereifung eingesetzt, das heisst beim Onland-Pflügen wurden die potenziell möglichen Vorteile dieses Verfahrens nicht vollständig ausgeschöpft. Abbildung 1 zeigt, wo die verschiedenen bodenkundlichen Messungen stattfanden. Der Versuch wurde mit 2 Verfahren in 4 Wiederholungsblöcken angelegt und ausgewertet.

Mechanische Belastung

Beim konventionellen Pflügen entstanden durch das Schrägstellen des Traktors

beim Fahren in der Pflugfurche Gewichtsverlagerungen auf die rechte Traktorseite (Tab. 2).

Der **Hinterrad-Schlupf** während des Pflügens war mit Werten um 10 % relativ gering (Tab. 3). Etwas höhere, jedoch statistisch nicht gesichert unterschiedliche Werte traten jeweils beim konventionellen Pflügen auf.

Der **Bodendruck** wurde sowohl mit Bollingsonden als auch mit Soil Stress Transducern (SST) gemessen. Während mit den Bollingsonden ein mittlerer unge-

richteter Druckwert gemessen wird, erlauben die SST's Aufzeichnung und Berechnung gerichteter Druckkomponenten (Haupt-, Normal- und Scherspannungen; Nichols *et al.* 1987).

In 35 cm Tiefe, das heisst etwa 15 cm unterhalb der Pflugtiefe, wurden im konventionellen Pflugverfahren mit beiden Messmethoden grössere Bodendrucke festgestellt als beim Onland-Pflügen (Tab. 3). Dies lässt sich durch eine unterschiedliche Druckkompensation («Druckabbau») im Boden erklären: Beim konventionellen Pflügen war die Bodenschicht zwischen Kontaktfläche und Messort nur etwa 15 cm mächtig, beim Onland-Pflügen immerhin etwa 35 cm. In 55 cm Bodentiefe konnten zwischen den Pflugverfahren dagegen keine wesentlichen Unterschiede mehr festgestellt werden. Die Druckwerte waren in dieser Bodentiefe auf kleine (Bollingsonden) bis nicht mehr nachweisbare Werte (SST) abgesunken. Dieser intensive Druckabbau könnte mit der nur mässig grossen Kontaktfläche der Reifen zusammenhängen. Wichtiger dürften aber die Bodenverhältnisse zum Versuchszeitpunkt gewesen sein: Während der kurzen Lastspitzen bei der Überfahrt konnte das Wasser im feinkörnigen, nassen Boden (Tab. 1) nicht rasch genug abfliessen, so dass es in den Poren eine tragende Funktion übernahm und die Druckausbreitung dadurch stärker in seitlicher Richtung erfolgte.

Mit den SST's konnten die Druckeinwirkungen nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich stärker aufgelöst werden als mit den Bollingsonden. Aus diesem Grund lassen sich Bodenbeanspruchungen mit diesen Messungen direkt einzelnen Rädern beziehungsweise Pflugscharen zuordnen (Abb. 2). Die höchsten Bodendrucke wurden in 35 cm Tiefe immer durch die Hinterräder des Traktors verursacht, während die Druckwerte unter Vorderrädern und Pflugscharen jeweils deutlich geringer waren.

Veränderungen des Gefügestandes

Nach konventionellem Pflügen wies der Boden in 35 cm Tiefe eine geringere Lagerungsdichte sowie ein etwas grösseres Gesamtporenvolumen auf als im unbearbeiteten Ausgangszustand beziehungsweise nach Onland-Pflügen (Tab. 4). Aufgrund der Porengrössenverteilung wird deutlich, dass sich diese Unterschiede vor allem im Bereich der grössten Poren



Tab. 4. Gefügestandparameter unter den Fahrspuren der Pflugverfahren «konventionell» und «Onland» (Mediane)

Verfahren	Tiefe cm	Lagerungs-	Gesamtporen-	Poren	Poren	Poren	Poren
		dichte	volumen	<60	<1000	1000-15000	>15000
		g/100 cm ³	Vol. %	hPa Vol. %	hPa Vol. %	hPa Vol. %	hPa Vol. %
Unbearbeitet	35	144	44,8	5,9	10,0	11,2	22,9
Konventionell		139	47,9	9,7	14,0	11,5	22,6
Onland		142	46,1	7,0	11,6	10,5	23,8
kgD 05		3	1,2	1,2	1,5	1,3	1,5
Unbearbeitet	55	145	44,8	4,8	9,1	9,7	26,3
Konventionell		146	45,1	7,8	11,5	8,8	25,4
Onland		144	46,0	6,6	10,5	9,3	25,9
kgD 05		2	0,8	1,1	1,4	1,4	1,0

Gerastert: Statistisch signifikante Effekte

(«Makroporen» <60 hPa mit Äquivalentdurchmesser >50 µm) eingestellt haben: Nach dem konventionellen und in geringerem Ausmass auch nach dem Onland-Pflügen wies der Boden in 35 cm Tiefe ein grösseres Makroporenvolumen auf als zuvor! Bei den Poren mit kleineren Äquivalentdurchmessern liessen sich dagegen keine Unterschiede zwischen den Verfahren erkennen. Dieselbe Feststellung einer Zunahme des Makroporenvolumens liess sich, allerdings in geringerem Ausmass, selbst noch in 55 cm Bodentiefe machen (Tab. 4). Mögliche Ursachen dieser überraschenden Gefügeveränderungen werden im Zusammenhang mit den Messungen der Bodenbewegungen während des Pflügens später diskutiert.

Kontinuität des Porensystems

Veränderungen der Porosität liessen sich anhand der Luftdurchlässigkeitsmessungen kaum erkennen. Während in 35 cm Tiefe noch eine Tendenz zu grösseren Luftdurchlässigkeiten im konventionell gepflügten Teil zu beobachten war, konnten

in 55 cm Bodentiefe keinerlei Unterschiede mehr ausgemacht werden (Tab. 5).

In der Bodenschicht unmittelbar unter der befahrenen Pflugfurche (25 cm Bodentiefe) ergaben die Wasserleitfähigkeits-Messungen dagegen eine deutliche Reduktion im konventionell gepflügten Verfahren gegenüber dem Onland-Pflug beziehungsweise dem unbearbeiteten Ausgangszustand (Tab. 5). Die Untersuchung der Fliesswege des angefärbten Wassers im Boden ergab ähnliche Resultate: Während sich zwischen dem Onland-Verfahren und der ungepflügten Kontrolle keine wesentlichen Unterschiede im Ausbreitungsverhalten des Wassers zeigten, war das Fliesswegmuster unter der Fahrspur des konventionell gepflügten Verfahrens sowohl in 25 wie auch in 35 cm Bodentiefe räumlich deutlich eingeschränkt (Tab. 5). Wurde beim konventionellen Pflugverfahren dagegen nur der gepflügte Bereich neben der befahrenen Pflugfurche betrachtet, liessen sich keine Unterschiede zum unbearbeiteten Ausgangszustand beziehungsweise zum Onland-Pflügen erkennen. Der scheinbare Widerspruch zwischen der Beurteilung der Porenkontinuität

tät mittels Luftdurchlässigkeit beziehungsweise Fliessweguntersuchungen lässt sich mit folgender Vorstellung erklären: Ein Gefüge mag dank einzelner kontinuierlicher Makroporen eine hohe Luftdurchlässigkeit aufweisen; der gesamte Porenraum kann bei einem ansonsten wenig kontinuierlichen («tortuosen») Porensystem jedoch nur in geringem Ausmass (gemessen als Fliessweganteil) erschliessbar sein.

Bei der Porenkontinuität der Bodenschicht direkt unterhalb der Pflugtiefe ergaben sich die offensichtlichsten Unterschiede zwischen den beiden Pflugverfahren. Derartige Einschränkungen der Kontinuität des Porensystems durch Verdichtung und Verknetung des Bodengefüges sind in vielen Ackerböden als Pflugsohle anzutreffen.

Bodenbewegungen während des Pflügens

Mit Hilfe des Displacement Transducer Systems (DTS) konnten die Bodenbewegungen während des Pflügens mit hoher zeitlicher Auflösung erfasst werden (Kühner 1997). Dabei zeigte sich in beiden Pflugverfahren, dass die Bodenteilchen in 35 cm Tiefe während der Überfahrt entgegen üblichen Erwartungen nicht nur nach unten verschoben werden, sondern mit wechselnden Bewegungsrichtungen auch nach oben und in horizontaler Richtung (Abb. 3). Diese Messresultate können bodenmechanisch folgendermassen erklärt werden: Das Porenwasser wurde während der kurzzeitigen Druckbeanspruchungen nicht ausgepresst und übernahm eine tragende Funktion. Folglich entstanden Porenwasserüberdrücke, welche die Stabilität des Gerüsts aus festen Bodenteilchen kurzzeitig verringerten. In diesem Moment einwirkende Scherkräfte sowie Druckentlastungen nach der Durchfahrt führten zu den gemessenen Verschiebungen der Bodenteilchen und damit zu Veränderungen des Gefügebauaufbaus. Aufgrund von Porengrössenverteilung und Luftdurchlässigkeit könnte die festgestellte Zunahme des Gesamtporenvolumens auf wenig zusammenhängende Makroporenrisse zurückgeführt werden, die durch Scher- und Entlastungsbrüche verursacht worden sind. Deshalb ist unter den sehr feuchten Bodenverhältnissen zum Versuchszeitpunkt anzunehmen, dass 15 cm unterhalb der Pflugtiefe keine klassischen Verdichtungen mit Porenvolumenverlusten, sondern im Gegenteil Porenvo-

Tab. 5. Kontinuitätseigenschaften des Porensystems (Wasserleitfähigkeit, Fliessweganteile und Luftdurchlässigkeit) in den beiden Pflugverfahren «konventionell» und «Onland» (Mediane)

Verfahren	Beprobungsbereich	Tiefe cm	Gesättigte	Fliessweg-	Luftper-
			Wasserleitfähigkeit cm/d	anteil %	meabilität bei 60 hPa cm ² * 10 ⁻¹⁰
Unbearbeitet	in Fahrspur	25	33	9,5	1620
Konventionell			3	1,0	2390
Onland			143	7,5	1438
Konventionell			n.b.	11,1	n.b.
Unbearbeitet	neben Fahrspur	35		9,6	1562
Konventionell				0,8	2234
Onland				7,6	1870
Konventionell				11,7	n.b.
Unbearbeitet	in Fahrspur	55			
Konventionell					
Onland					

n.b. = nicht bestimmt

Gerastert: Statistisch signifikante Effekte (nichtparametrische Verfahren)

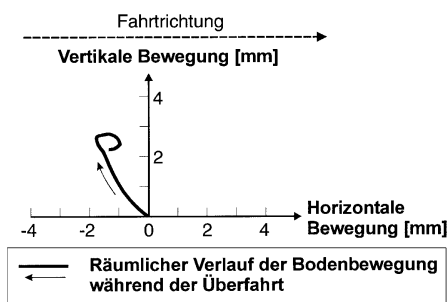


Abb. 3. Verlauf der Bodenbewegung in 35 cm Bodentiefe als Folge der Überfahrt des Traktor-Pflug-Gespans bei konventionellem Pflügen. Dargestellt wird die Bewegung eines Bodenelementes in 35 cm Tiefe im Verlauf der Befahrung. Vor Beginn der Befahrungen befindet sich das Bodenelement im Schnittpunkt der Achsen. Die Messungen erfolgten mit dem Displacement Transducer System (DTS).

lumen-Zunahmen aufgetreten sind. Die ökologische Funktionalität dieses neu entstandenen Makroporensystems dürfte allerdings gering sein, weil es Ober- und Unterboden nicht miteinander verbindet und damit keine zusätzlichen Transportmöglichkeiten schafft.

Zusammenfassung und Folgerungen

■ Beim konventionellen Pflügen traten - im Gegensatz zum Onland-Pflügen - Gefügeschäden unter der Furchen-Fahrspur auf, die sich als schlecht durchlässige Sperrschicht am Übergang zwischen Ober- und Unterboden («Pflugsohle») bemerkbar machten. Im Hinblick auf die mögliche Dauer von Gefügeschäden im Unterboden und deren pflanzenbauliche und ökologische Folgen (Hakansson *et al.* 1987; Voorhees *et al.* 1986) kann das Onland-Pflugkonzept deshalb als Beitrag zu einer nachhaltigen Bodenbewirtschaftung und damit auch zum physikalischen Bodenschutz betrachtet werden (Anken und Nadlinger 1996).

■ Das Schadbild der Pflugsohle wird durch scherende beziehungsweise knetende, das heisst den Boden in verschiedene Richtungen bewegende dynamische Druckbeanspruchungen verursacht und hat eine erhebliche Verringerung der Wassertransportkapazität des Porensystems zur Folge. Diese dynamischen Bodenbeanspruchungen werden besonders durch die in der Pflugfurche fahrenden Traktorräder mit ihrem Stollenprofil, kaum jedoch durch die Pflugschare verursacht.

Die beim Pflügen vor allem von den Traktorhinterrädern hervorgerufenen vertikalen Bodendruck-Komponenten waren bei

den gegebenen Versuchsbedingungen mit hoher Wassersättigung des Bodens dagegen von eher untergeordneter Bedeutung und verursachten keine wesentlichen Gefügeschäden im Sinne von Unterboden-Verdichtungen.

■ Sowohl beim Pflügen als auch beim Befahren müssen mechanische Bodenbeanspruchungen nicht zwangsläufig typische Verdichtungen (Anstieg der Lagerungsdichte bei gleichzeitiger Abnahme des Makroporenvolumens) zur Folge haben. Bei bestimmten Bodenzuständen können dynamisch einwirkende Kräfte im Gegenteil eine Zunahme des Makro- und Gesamtporenvolumens bei gleichzeitiger Abnahme der Lagerungsdichte hervorrufen, ohne dabei allerdings die Luftdurchlässigkeit wesentlich zu verbessern. Eine Zunahme des Makroporenvolumens ist deshalb nicht immer gleichbedeutend mit einer Verbesserung der Wasser- und Lufttransportkapazität und damit einer erhöhten ökologischen Funktionalität des Porensystems.

LITERATUR

- Anken T. und Nadlinger M., 1996. Onland-Pflüge: Aufschwung durch Bodenschutz. *Landtechnik* 51, 6-7.
- Hakansson I., Voorhees W.P., Elonen P., Raghavan G.S.V., Lowery B., Van Wijk A.L.M., Rasmussen K. and Riley H., 1987. Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. *Soil and Tillage Research* 10, 259 - 268.
- Inns F.M. and Kilgour J., 1978. Agricultural tyres. Dunlop, 69 pp.
- Kühner S., 1997. Simultane Messung von Spannungen und Bodenbewegungen bei statischen und dynamischen Belastungen zur Abschätzung der dadurch induzierten Bodenbeanspruchung. Schriftenreihe, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Universität Kiel, Nr. 39, ISSN 0933-680X, 231 pp.
- Nichols T.A., Bailey A.C., Johnson C.E. and Grisso R.D., 1987. A stress state transducer for soil. *Transactions of the ASAE* 30 (5), 1237 - 1241.
- Voorhees W.B., Nelson W.W. and Randall G.W., 1986. Extent and persistence of subsoil compaction caused by heavy axle loads. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 428 - 433.

RÉSUMÉ

Influence du système de labour sur la structure du sol

Lors d'un essai en plein champ, l'effet protecteur présumé du labour hors-raie (les quatre roues du tracteur à la surface du sol) a été testé avec

pour témoin la variante conventionnelle (deux roues du tracteur dans le sillon).

Comme attendu, les contraintes de charge les plus fortes ont été relevées sous la roue arrière de sillon (labour conventionnel). La structure du sol à 35 cm et partiellement à 55 cm a réagi de manière surprenante par une augmentation du volume total des pores et du volume des pores grossiers accompagnée d'une diminution de la densité apparente. Les mouvements ou déplacements du sol engendrés par ces contraintes ont pu être mesurés.

Les examens de perméabilité en milieu saturé comme les relevés d'infiltration par colorimétrie révélèrent de fortes modifications structurales (pétrissage) à 25 cm soit à la base de la roue de sillon. La continuité du système poreux se trouve être, de ce fait, entravée («formation d'une semelle de labour»).

Les résultats de cet essai montrent qu'en raison des contraintes de charges inférieures, le système du labour hors-raie présente un sérieux avantage par rapport au système conventionnel. Il s'agit là d'une contribution à un travail du sol durable et par là même à une protection de nature physique du sol.

Les causes possibles des modifications de structure, pour le moins inattendues, survenues à 35 et 55 cm de profondeur sont discutées.

SUMMARY

Influences of ploughing on soil structure

In a field trial it was investigated whether soil can be tilled more considerate with onland ploughing (all four wheels of the tractor run on the untilled soil surface) than with conventional ploughing (two wheels of the tractor run in the furrow).

As expected conventional ploughing caused the highest soil stress at 35 cm depth, the peak stress values coming from the rear wheel of the tractor. Surprisingly the soil structure at 35 cm, partly even at 55 cm depth responded to these stresses in both ploughing treatments by an increase of total and macropore volume as well as by a decrease of bulk density. Saturated hydraulic conductivity and flow paths of stained water showed that the conventional ploughing treatment caused strong changes of soil structure below the wheel tracks at 25 cm depth. This kneading action lead to a considerable deterioration of pore continuity („plough pan-formation“). The dynamic character of soil stresses during ploughing could also be identified by measurements of soil displacement.

The results of this comparison of two ploughing treatments show that with onland ploughing plough pan-formation and subsoil stresses can be reduced. Therefore onland ploughing can contribute to sustainable soil tillage and to physical soil protection. Possible reasons of the unexpected changes of soil structure at 35 and 55 cm soil depth are discussed.

KEY WORDS: ploughing, soil structure, onland plough, soil stress, soil deformation, plough pan