

# Originalarbeiten

---

(Aus dem Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Universität für Bodenkultur, Wien, Vorstand: o. Univ.-Prof. Dr. P. Ruckebauer)

## **Einfluß der Primärbodenbearbeitung auf Aggregatstabilität und Eindringwiderstand im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 5)**

Von P. LIEBHARD, J. EITZINGER und E. KLAGHOFER

(Mit 9 Abbildungen)

### **Zusammenfassung**

Eine unterschiedliche Primärbodenbearbeitung mit verschiedener Arbeitstiefe ergab nach zehn Jahren auf einem für das östliche Alpenvorland typischen mittelschweren Boden eine gesicherte Veränderung der Aggregatstabilität und unterschiedlich hohe Eindringwiderstände bis ca. 40 cm Bodentiefe.

Die Stabilität der Bodenaggregate gegenüber Wasser wurde mit der Analysemethode nach KEMPER und KOCH (1966) erfaßt. Durch das standortübliche Pflügen und tiefe Grubbern konnte während der Hauptvegetationszeit in der Krume die höchste Aggregatstabilität von 78 bis 79 % erreicht werden. Ein geringfügiger Abfall ergab sich durch flaches Pflügen, mitteltiefe Grubberbearbeitung und jahresweise wechselnden Fräse-Pflug-Einsatz. Bei ständigem Fräseeinsatz sanken die Werte deutlich auf 69 % ab. Bis zum Spätherbst und zur neuerlichen Bodenbearbeitung erhöhten sich diese niedrigen Werte aber wieder um etwa 4 %.

Mit einem hoch auflösenden Penetrometer war es bei der Eindringwiderstandsmessung möglich, die räumliche Verteilung einer Reihe von bodenphysikalischen und -mechanischen Auswirkungen der Bodenbearbeitung zeitgleich abzuschätzen. Von fünf ausgewählten Bereichen des Eindringwiderstandes (0-3, 4-11, 12-18, 19-24, 25-38 bar), angelehnt an die „normale Festigkeit“ nach HARTGE (1986), weisen die Pflugvarianten sowie die Kombination Fräse und Pflug günstige Werte auf. Durch die Grubberbearbeitung entstanden dächerförmige Dichtlagerungszonen im Bearbeitungshorizont. Bei langjährigem ausschließlichem Fräseeinsatz summierten sich die Druckschäden, und es kam zur Ausbildung eines mächtigen hochverdichteten Horizontes unter der Bearbeitungsgrenze. Zur Erhaltung bzw. Erreichung einer hohen Aggregatstabilität und eines für die Kulturpflanze optimalen Eindringwiderstandes war am angeführten Standort eine Gerätekombination mit jahresweisem Wechseln wendender oder nur lockernder Bearbeitung vorteilhaft.

Die Ergebnisse der Aggregatstabilität und des Bodeneindringwiderstandes ermöglichten eine Beurteilung wesentlicher Kriterien des bodenmechanischen

und -physikalischen Zustandes als Folge der langjährigen unterschiedlichen Primärbearbeitung.

Schlüsselworte: Primärbodenbearbeitung, Aggregatstabilität, Eindringwiderstand.

### **Influence of primary tillage on aggregate stability and penetration resistance in the centre of Upper Austria (part 5)**

#### Summary

After ten years of experimentation on a medium heavy soil, typical for eastern „Alpenvorland“, different primary tillage methods at varying depths resulted in a definite change of soil aggregate stability and different penetration resistance at up to about 40 cm soil depth.

Because of the complexity of soil aggregate stability, this aspect can only be roughly determined by the analysis method used. The highest aggregate stability of 78 to 79 % was attained in the top soil during the main vegetative period by ploughing and deep grubbing customary in this region.

A slight drop occurred after shallow ploughing, medium-deep grubbing and the alternating use of the rotary tiller in one year and the plough in the next. After constant use of the rotary tiller, the values dropped drastically to 69 %. However, these low values rose again by 4 % by the late autumn and before renewed tillage.

Due to the high sensitivity of the standardized penetrometer, it was possible in the measurement of penetration to measure the simultaneous spatial distribution of a number of physical and mechanical effects of soil tillage.

Single isolated measurements of structural characteristics are usually not suitable for a comprehensive evaluation of the rooting patterns of cultivated plants. Continuous periodic measurements certainly take great effort but are of imperative necessity for the determination of the structural dynamics.

Of five given ranges of penetration (1 to 38 bar), the plough variants as well as the combination of rotary tiller and plough show favourable values. Roof-shaped density zones developed in the tillage horizon after treatment with the field cultivator. Pressure damage mounts after exclusive use of the rotary tiller over a period of years and it comes to the formation of a mighty, highly compacted horizon below the tillage zone. A combination of farming equipment, alternating yearly, which treats the soil by turning or only by loosening it, is advantageous for the preservation or the attainment of high soil aggregate stability and optimal penetration resistance for the cultivated plant at the above-mentioned location.

The results of soil aggregate stability and of soil penetration resistance make possible an evaluation of essential criteria of the mechanical and physical condition of the soil, as a consequence of different primary tillage methods over a period of years.

Key-words: Primary tillage, aggregate stability, penetration resistance.

#### **1. Einleitung, Literatur und Problemstellung**

In den industrialisierten Ländern ist der Mechanisierungsgrad im Ackerbau hoch, und daher ist es meist möglich, bei der Bearbeitung den Bodenzustand und die Ansprüche der jeweiligen Pflanzenart zu berücksichtigen. Dadurch ist einerseits eine weitere Steigerung der Ertragsfähigkeit über das bisherige natürliche Niveau hinaus gewährleistet, andererseits kann aber durch eine fehlerhafte Bearbeitung die Bodenstruktur langfristig verschlechtert werden.

Die Stabilität der Bodenaggregate im Bearbeitungshorizont ist einer der wichtigsten Faktoren für die Widerstandsfähigkeit gegenüber Regeneinwirkung, Verschlammung, Erosion und Bodenverdichtung. In der Ackerkrume sind die Bodenteilchen der Aggregate im Vergleich zum Grünland leichter gegeneinander verschiebbar, und daher ist die Beanspruchung durch die Bearbeitung und das Befahren häufig zu hoch (KLAGHOFER 1985, HARTGE 1992). Die durch das Bearbeiten und Befahren entstandenen Bodenverdichtungen konnten bis vor einem Jahrzehnt meist noch durch das Pflügen vor der Hauptkultur behoben werden. Auf strukturinstabilen Böden und bei hohen Bodenwassergehalten wirken sich die Fahrgeschwindigkeit und das hohe Gewicht der Bearbeitungsgeräte und Erntemaschinen vereinzelt bis in Bodentiefen von 50 cm aus. Ein Großteil der Ackerböden ist daher im Vergleich zu einer Bearbeitung mit Zugtieren oder gegenüber dem Grünland häufig tief in den Unterboden verdichtet.

Die vielfältigen Einflüsse bei der Bildung von stabilen Aggregaten sowie auf deren Erhaltung sind in den vergangenen Jahren wiederholt untersucht worden (SWABY 1949, SEKERA 1951, MARTIN et al. 1955, BURNS und DAVIES 1986, EDER 1987, EITZINGER 1988, 1991, LE BISSONNAIS et al. 1989, WUTZL 1990, KLAGHOFER und EITZINGER 1990, ANDERSON 1991, HARTGE 1992, MURER et al. 1993). Die Aggregatstabilität wird durch zahlreiche Bodenparameter, wie z. B. Tongehalt, Menge und Art der organischen Stoffe im Boden, Schleimstoffe, Pilzmycele, freies  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , freies  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ , pH-Wert, Kationenbelag, austauschbares Natrium, chemische, physikalische oder elektrostatische Kräfte, Haarwurzeln, organische Düngung, synthetische Stabilisatoren usw. beeinflusst. Bei der Aggregatstabilität handelt es sich immer um einen Summeneffekt (GERZABEK und ROESSNER 1993). Im überwiegenden Teil der Arbeiten wird lediglich die Wechselwirkung einer oder einiger weniger bodenphysikalischer Kennzahlen auf die Wuchsleistung und den Ertrag der Kulturpflanzen behandelt. HORN (1990) und HORN et al. (1991) fordern daher auch die Berücksichtigung der übrigen zahlreichen Kriterien für die Bodenstabilität, wie z. B. die Einbindung der Bewirtschaftungsintensität sowie der Anordnung der Aggregate im Gefügeverband.

Zur Beurteilung der Aggregatstabilität haben sich vier Verfahrenstypen entwickelt, die in Abhängigkeit vom methodischen Ansatz unterschiedliche Aussagen liefern (HARTGE und HORN 1989). Es sind dies: Naßsiebung, Perkolationsminderung, Beregnung und visuelle Bestimmung aus einer Alkohol/Wasser-Mischungsreihe.

In gewachsenen Böden können die zum Teil großen Unterschiede in der Lagerungsdichte und der Struktur nicht faktorspezifisch zugeordnet werden. Je nach Wassersättigungsgrad im effektiven Wurzelraum ist der Durchwurzelungswiderstand unterschiedlich hoch. Der zu beurteilende Bodeneindringwiderstand hängt als Summengröße neben der Geräteart und der verwendeten Meßsonde von vielen bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften, wie der Körnung, der Lagerungsdichte, der Porengrößenverteilung, der Wasserspannung, der Scherfestigkeit, dem Gehalt an organischem Kohlenstoff, der Eindringgeschwindigkeit und von weiteren, weniger einflußstarken Faktoren ab (KLAGHOFER und MURER 1989, SCHREY 1991, MURER et al. 1991). Bei der Penetrometermessung wird der Widerstand gegen das Eindringen einer Metallsonde gemessen, die langsam in den Boden gedrückt wird. Diese Messungen des Eindringwiderstandes liefern Druckwerte, die mit steigender Bodendichte zunehmen. Das immer sehr umfangreich anfallende Datenmaterial bei Boden-Eindringwiderstandsmessungen in Feldversuchen wird mit dem geringsten Informationsverlust graphisch dargestellt, wobei zusätzlich auch der Flächenbezug

gewährleistet bleibt. Die so gewonnenen Daten reichen aus, um die Minderung des Wurzelwachstums in verdichteten Böden zu erklären (HELAL 1991 a, 1991 b). Die wachsenden Wurzelspitzen unterscheiden sich in vieler Hinsicht vom Eindringen einer Metallsonde: Wurzelspitzen dringen nur sehr langsam in den Boden ein (wachsen um etwa das Tausendfache langsamer), sondern Schleimstoffe ab, verändern sich radial und weichen in gewissen Grenzen Hindernissen aus. Rückschlüsse von direkten Beziehungen zwischen den Drücken, die wachsende Wurzeln ausüben, und den Penetrometerwiderstandswerten sind aufgrund der angeführten Faktoren nicht gerechtfertigt (RICHARD und GREACEN 1986, WHITELEY et al. 1991, HELAL 1991 a). GARDNER (1972) findet, daß der Eindringwiderstand am stärksten vom Wassergehalt beeinflußt wird.

Nach KNITTEL und STANZEL (1976), KLAGHOFER (1988) und MURER et al. (1991) hingegen können mit einem Penetrometer in Kombination mit anderen Untersuchungen die Auswirkungen bestimmter Bearbeitungsverfahren auf chemische, physikalische und biologische Kennzahlen und die Lockerungsbedürftigkeit eines Bodens hinsichtlich eines optimalen Pflanzenwachstums gut abgeschätzt werden. Intensität und Art der Bodenfestigkeit werden durch den Mittelwert des Eindringwiderstandes und die typisierte EW-Tiefenfunktion je Meßpunkt dargestellt (SCHREY 1991).

Mit gezielten Maßnahmen in der Bodenbearbeitung, der Gestaltung der Fruchtfolge sowie unter Ausnutzung des Einflusses des Winterfrostes muß standortspezifisch versucht werden, in der Ackerkrume kurzfristig Textur- und Struktureigenschaften herzustellen, die bei den Kulturpflanzen eine hohe Ertragsleistung mit hoher Ertragsstabilität gewährleisten. Mit jeder Bearbeitung und jedem Befahren des Bodens wird das Gefüge beeinflußt, es kommt zu einem Lockern oder Verdichten (BORCHERT 1982, TEBRÜGGE 1986, HORN 1987).

Die Auswirkung einer langjährigen unterschiedlichen Primärbodenbearbeitung auf die lang- und jahreszeitliche Veränderung der Gefüge- und Aggregatstabilität ist bisher erst auf wenigen ausgewählten Standorten untersucht worden. Druckschäden im Krumen- und Krumbasisbereich können sich über Jahre hinweg summieren (BOLLING und SOEHNE 1982) und das Regulationsvermögen der Bodenstruktur herabsetzen (PITTELKOW et al. 1988). Schädigungen in der Struktur haben überwiegend Langzeitwirkungen, und im Extremfall kommt es zu irreversiblen Verdichtungen mit hoher Ertragsminderung. Die Erarbeitung von Entscheidungshilfen für den Landwirt zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit oder zum Schutz des Bodens sind Aufgaben einer integrierten Pflanzenproduktion mit aktueller Priorität. Die Erkenntnisse aus der angeführten Literatur zeigen, daß verwertbare bodenmechanische und -physikalische Parameter sich meist nicht mit standardisierten Labormethoden ermitteln lassen. Zwischen Bodenbearbeitung, Bodenwasserhaushalt, Gefüge und deren Interaktionen im effektiven Wurzelraum sowie dem Wachstum der Kulturpflanzen bestehen eine Reihe von standortbezogenen Abhängigkeiten. Mit den vorliegenden Untersuchungen soll nach zehn Jahren die Langzeitwirkung der differenzierten Primärbodenbearbeitung (bei einem druckempfindlichen und strukturinstabilen Boden) auf die Aggregatstabilität und den Eindringwiderstand beurteilt werden.

## **2. Material und Methoden**

Wesentliche Kenngrößen bezüglich Standort, Profil, Textur und Versuchsanlage wurden bereits in früheren Arbeiten ausführlich beschrieben (LIEBHARD 1993, LIEBHARD et al. 1994). Der Versuch wurde auf einer tiefgründigen, mittel-

schweren, kalkfreien Lockersediment-Braunerde in semihumider Klimalage mit durchschnittlich 860 mm Jahresniederschlag angelegt. Beim Standort handelt es sich um hochwertiges Ackerland; die Krume weist eine mäßige Wasserdurchlässigkeit aber hohe Speicherfähigkeit auf. Der A<sub>p</sub>-Horizont besteht aus schluffigem Lehm, der Unterboden überwiegend aus Lehm.

Mit drei verschiedenen Geräten und bei unterschiedlichen Bearbeitungstiefen wurden standortspezifische, praxisrelevante Primärbearbeitungsverfahren durchgeführt. Dem Pflug und Grubber als gezogene Geräte wurde die motorgetriebene Fräse gegenübergestellt. Weiters kam noch eine Kombination – vor Getreide Fräse und vor den Hackfrüchten Pflug – zum Einsatz. Die Fruchtfolge konnte bisher, wie sie zu Beginn des Vergleichsversuches im oberösterreichischen Zentralraum üblich war, beibehalten werden:

Zuckerrübe – Winterweizen – Körnermais – Winterweizen.

Sämtliche Ernterückstände wurden eingearbeitet.

## 2.1 Probennahme und Untersuchungsmethodik

### 2.1.1 Aggregatstabilität

Die Entnahme der Proben erfolgte in den Monaten Juni und Oktober im Vegetationsjahr 1990. Bei jeder Beprobung wurden mit einem Bohrer aus dem Bearbeitungshorizont von 5 bis 20 cm Tiefe je Variante acht Bohrkern entnommen.

Laboruntersuchung: Naßsiebmethode nach KEMPER und KOCH (1966). Die Erfassung der Verschlammung ausgesiebter Aggregatfraktionen erfolgte bei Einwirkung von Wasserüberschuß.

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit dem Programmpaket SAS (Statistic Analysis System) und speziellen Programmen des Institutes für Mathematik und angewandte Statistik der Universität für Bodenkultur Wien. Die Analyseergebnisse der „Bearbeitungsvarianten“ wurden als Split-Plotanlage und die Werte der „Monat-Datenerfassung“ als Strip-Plotanlage ausgewertet. Bei der Darstellung der Ergebnisse der Mittelwertvergleiche in der Abbildung 1 unterscheiden sich Mittelwerte mit gleichem Buchstaben nur durch Zufall.

### 2.1.2 Eindringwiderstand

Die Messung wurde mit einem Penetrometer der Erzeugerfirma Irvine Ltd., Penicuik, Schottland, durchgeführt. Durch das kontinuierliche Eindringen einer kegelförmigen Sondenspitze (12,8 mm Durchmesser und 30° Anstellwinkel), die dem American Society of Agricultural eng.-Standard entspricht, wurde der Eindringwiderstand ermittelt. Die Werte wurden in 15 Tiefenstufen in jeweils 3,5 cm Abstand erfaßt. Der Meßimpuls wurde durch eine Photozelle ausgelöst, die an der Lochschiene entlanggleitet. Die maximale Meßtiefe betrug bei der verwendeten Standardausrüstung 52 cm.

Der Meßbereich lag zwischen 0 und 38 bar (= 380 N/cm<sup>2</sup>; 3,8 mpa), und die Daten konnten direkt in ein angeschlossenes Speichergerät übertragen werden. Der jeweilige Eindringwiderstand wurde mit Hilfe eines Dehnungsmeßstreifens elektronisch erfaßt.

Die Ermittlung des Eindringwiderstandes am Feld erfolgte mit Hilfe einer Schablone (120×50 cm), in welcher in Reihen angeordnete Öffnungen gebohrt sind. Eine Variantenauswertung ergab sich aus 22 Messungen mit je 15 Tiefenstufen in vierfacher Wiederholung. Die angeführten Abbildungen bis 9 sind das Ergebnis aus den Meßserien im Juni 1990. Das zu den angeführten Terminen vorliegende Datenmaterial ist dreidimensional strukturiert.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Aggregatstabilität

Die Ergebnisse der Aggregatstabilität von Proben aus einer Bodentiefe von 0 bis 10 cm zeigen, daß in der Hauptvegetationszeit die Werte zwischen 69 bis 79 % und im Herbst zwischen 73 und 79 % lagen. Die zehnjährige unterschiedliche Primärbodenbearbeitung ergab im  $A_p$ -Horizont einen signifikanten Einfluß (Abb. 1). Im Oberboden (Bodentiefe bis 10 cm) wurde die höchste Aggregatstabilität von 78 bis 79 % durch das standortübliche Pflügen und mit dem Grubber bei einer Bearbeitungstiefe von 30 cm erreicht. Nur geringfügig niedriger waren die Werte bei einer flachen Pflugfurche (Bearbeitungstiefe 17 cm) und mitteltiefer Grubberbearbeitung. Auf 73 bzw. 74 % fiel die Aggregatstabilität bei der betriebsüblichen tiefen Grubberbearbeitung (24 cm Bearbeitungstiefe) und bei wechselndem Fräse-Pflug-Einsatz ab. Bei ständigem Fräseeinsatz sanken die Werte deutlich auf 69 % ab. Die Streuung der Werte innerhalb der Bearbeitungsvarianten waren im Vergleich zu den unterschiedlichen Verfahren gering (Tab. 1).

Abb. 1: Aggregatstabilität in % von 5 bis 20 cm Bodentiefe unter Zuckerrübe bei unterschiedlicher Primärbodenbearbeitung, Juni und Oktober 1990

Fig. 1: Soil aggregate stability in % at a depth of 5 to 20 cm measured in sugar beet after different primary tillage methods, June and October 1990

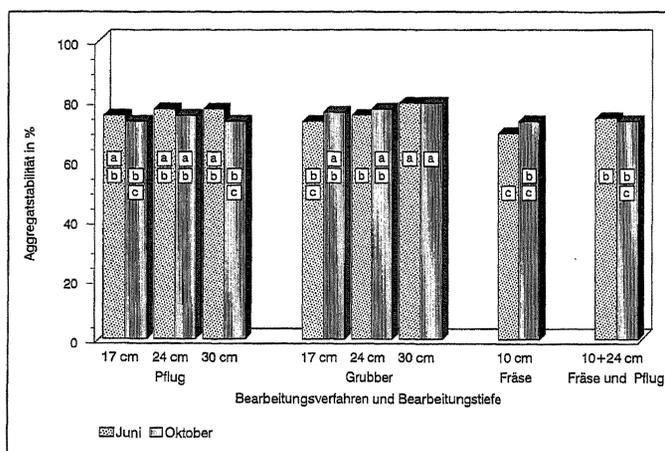


Tabelle 1

Aggregatstabilität in % von 5 bis 20 cm Bodentiefe bei unterschiedlicher Primärbodenbearbeitung, Datenerfassung in der Hauptvegetationszeit (Juni) und am Ende der Vegetationszeit (Oktober), 1990

Soil aggregate stability in % at a depth of 5 to 20 cm after different primary tillage methods, data acquisition in the main vegetative period (June) and at the end of the vegetative period

	FG	DQ	F-Wert
Wiederholung	3	2,833	
Bodenbearbeitung	7	42,714	16,77***
Fehler 1 (Wh×Bobe)	21	2,548	
Monat – Datenerfassung (Juni–Okt.)	1	0	0
Fehler 2 (Mo×Wh)	3	1,167	
Bodenbearbeitung×Monat	7	15,429	6,42**
Rest	21	2,405	

Am Ende des Vegetationsjahres (Ende Oktober) lag im Mittel aller Varianten die Aggregatstabilität auch bei 74,9 % und nur durch Zufall vom Sommerergebnis verschieden. Innerhalb der Bearbeitungsverfahren hingegen gab es wie im Juni signifikante Unterschiede, aber mit einer Tendenz zu einer deutlichen variantenabhängigen Veränderung der Werte. Bei allen gepflügten Parzellen, auch bei der Kombination Fräse-Pflug, kam es zu einer Verminderung der Aggregatstabilität von 2 %. In den tiefbearbeiteten Grubberteilstücken blieb die Aggregatstabilität gleich, bei der standortüblichen Grubberbearbeitung (17 bis 24 cm Bearbeitungstiefe) stieg der Wert gegenüber dem Sommer um 2 % an. Der höchste Anstieg von 4 % erfolgte in den Dauerfräseparzellen.

### 3.2 Eindringwiderstand

Aus dem umfangreichen Datenmaterial von den zahlreichen Eindringwiderstandsmessungen über drei Jahre (1987, 1989 und 1990) zu verschiedenen Jahreszeiten (Mai bis November) und bei unterschiedlicher Bedeckung werden die Meßwerte vom Juni 1990 angeführt. Der Bodenzustand dieses Meßtermines war repräsentativ für die Auswirkung der langjährigen, unterschiedlichen Primärbodenbearbeitung und charakterisiert das Pflanzenwachstum.

In den Abbildungen 2 bis 9 sind exemplarisch die im besonderen auch vom Wassergehalt des Bodens und der Jahreszeit abhängigen, unterschiedlich hohen Eindringwiderstände dargestellt. Der rechte Teil jeder Abbildung zeigt den Verlauf der Widerstandslinie von 0 bis 50 cm Eindringtiefe. Das Schnittbild gibt den Kurvenverlauf des Eindringwiderstandes in bar/cm<sup>2</sup> von einem Laufmeter quer zur Fahrtrichtung wieder. Der jeweilige Bodenwassergehalt ist an der rechten Seite ersichtlich.

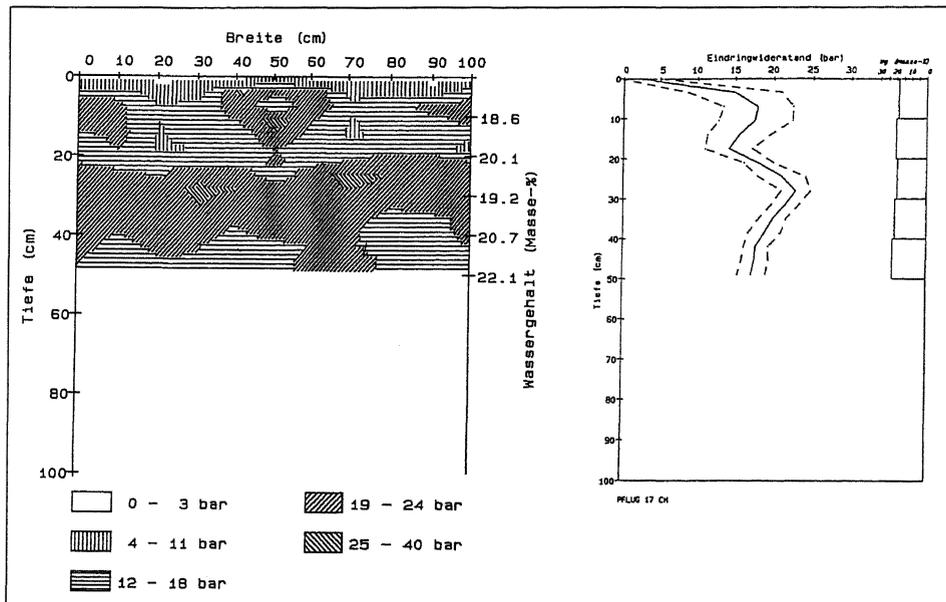


Abb. 2: Meßwerte des Eindringwiderstandes und Verlauf der Pflugsohlenbildung, Variante Pflug 17 cm Bearbeitungstiefe, stehende Kultur Zuckerrübe, Juni 1990

Fig. 2: Single values of penetration resistance and formation process of soil density layer, plough variant at 17 cm cultivation depth, standing culture sugar beet, June 1990

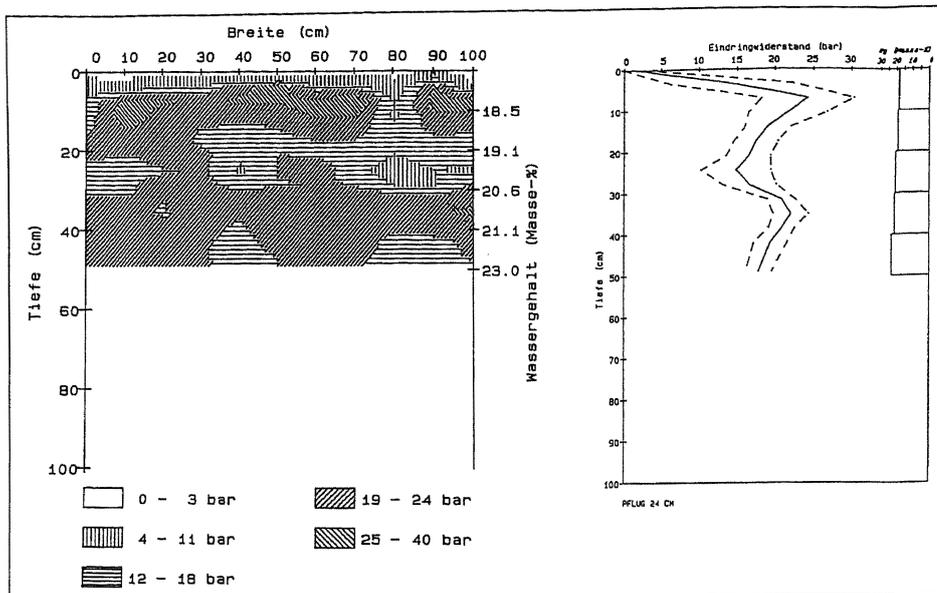


Abb. 3: Meßwerte des Eindringwiderstandes und Verlauf der Pflugsohlenbildung, Variante Pflug 24 cm Bearbeitungstiefe, stehende Kultur Zuckerrübe, Juni 1990  
 Fig. 3: Single values of penetration resistance and formation process of soil density layer, plough variant at 24 cm cultivation depth, standing culture sugar beet, June 1990

Die Pflugvarianten (Abb. 2 bis 4) wiesen während der Hauptvegetationszeit innerhalb der bearbeiteten Krume und über die gesamte Meßtiefe eine relativ große Heterogenität auf. Die durch das Pflügen entstandenen, schräg liegenden Erdbalken mit zum Teil hoch verdichteten kleinen Kernzonen waren die Ursache dafür. Kennzeichnend für die Pflugvarianten war weiters der starke Anstieg des Eindringwiderstandes in der Pflugsohle, die meist eine Mächtigkeit von ca. 10 cm aufwies. Darunter fiel der Eindringwiderstand wieder leicht ab.

Bei Verwendung eines Grubbers in der Primärbodenbearbeitung (Abb. 5 bis 7) mit standortüblicher Bearbeitungstiefe erhöhte sich der Eindringwiderstand in der Bearbeitungskrume um ca. 5 bar gegenüber den Pflugvarianten, es kam zur Bildung einer mäßig dichtlagernden, dächerförmigen Zone. Unter der Bearbeitungsgrenze entstand eine parallel verlaufende, höher verdichtete Zone, die aber weder die Mächtigkeit noch den Verdichtungsgrad der Pflugsohle von den Pflugvarianten erreichte. In den Parzellen der Grubbervariante mit 17 cm Bearbeitungstiefe kam es hingegen unter der Bearbeitungsgrenze zur Bildung eines mächtigen Verdichtungshorizontes; die Fläche der hochverdichteten Kernzonen betrug ca. 50 %.

Durch den zehnjährigen Einsatz der Fräse (Abb. 8) blieb zwar der Boden in der Oberkrume bis zur Bearbeitungsgrenze locker, aber unterhalb von 10 cm Bodentiefe kam es zur Ausbildung eines extrem starken Verdichtungshorizontes mit großräumigen hochverdichteten Bereichen. Die untere Grenze des Verdichtungshorizontes deckt sich meist mit der in früheren Zeiten erreichten tiefsten Pflugsohlengrenze. Unterhalb dieses Verdichtungshorizontes (ab ca. 40 cm Bodentiefe) war der Boden ebenfalls wieder lockerer und wies einen ähnlich hohen Eindringwiderstand wie die anderen Bearbeitungsvarianten auf.

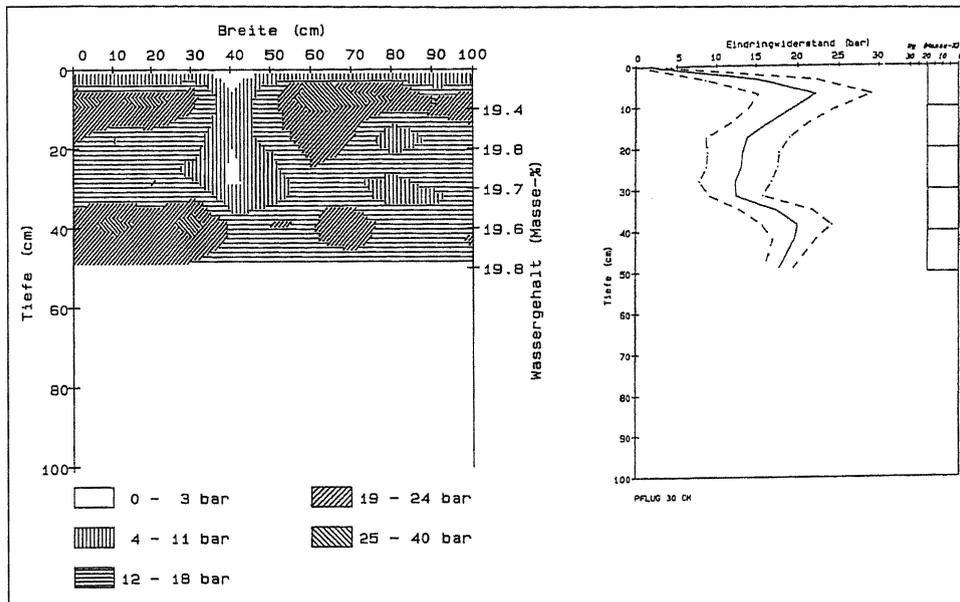


Abb. 4: Meßwerte des Eindringwiderstandes und Verlauf der Pflugsohlenbildung, Variante Pflug 30 cm Bearbeitungstiefe, stehende Kultur Zuckerrübe, Juni 1990  
 Fig. 4: Single values of penetration resistance and formation process of soil density layer, plough variant at 30 cm cultivation depth, standing culture sugar beet, June 1990

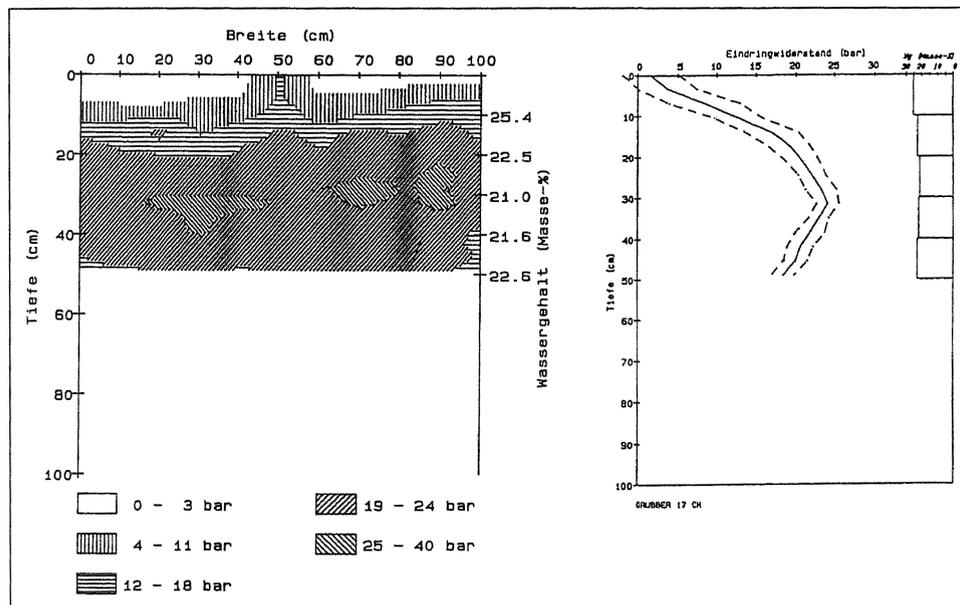


Abb. 5: Meßwerte des Eindringwiderstandes und Verlauf der Pflugsohlenbildung, Variante Grubber 17 cm Bearbeitungstiefe, stehende Kultur Zuckerrübe, Juni 1990  
 Fig. 5: Single values of penetration resistance and formation process of soil density layer, field cultivator variant at 17 cm cultivation depth, standing culture sugar beet, June 1990

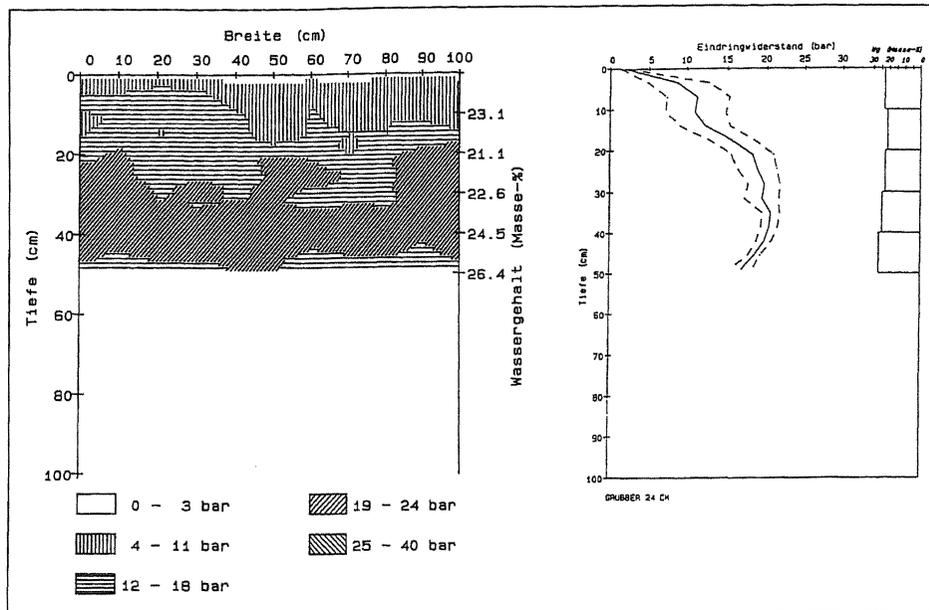


Abb. 6: Meßwerte des Eindringwiderstandes und Verlauf der Pflugsohlenbildung, Variante Grubber 24 cm Bearbeitungstiefe, stehende Kultur Zuckerrübe, Juni 1990  
 Fig. 6: Single values of penetration resistance and formation process of soil density layer, field cultivator variant at 24 cm cultivation depth, standing culture sugar beet, June 1990

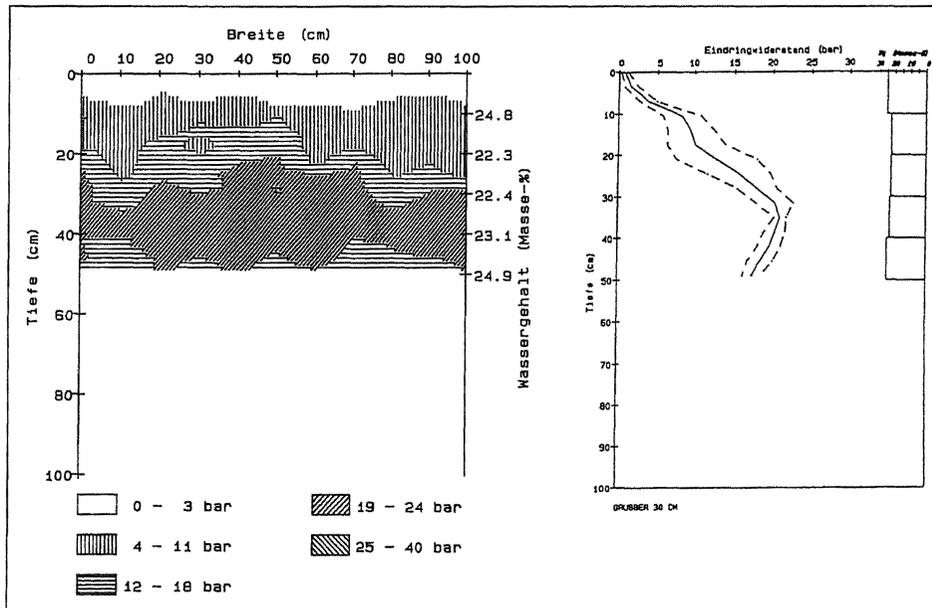


Abb. 7: Meßwerte des Eindringwiderstandes und Verlauf der Pflugsohlenbildung, Variante Grubber 30 cm Bearbeitungstiefe, stehende Kultur Zuckerrübe, Juni 1990  
 Fig. 7: Single values of penetration resistance and formation process of soil density layer, field cultivator variant at 30 cm cultivation depth, standing culture sugar beet, June 1990

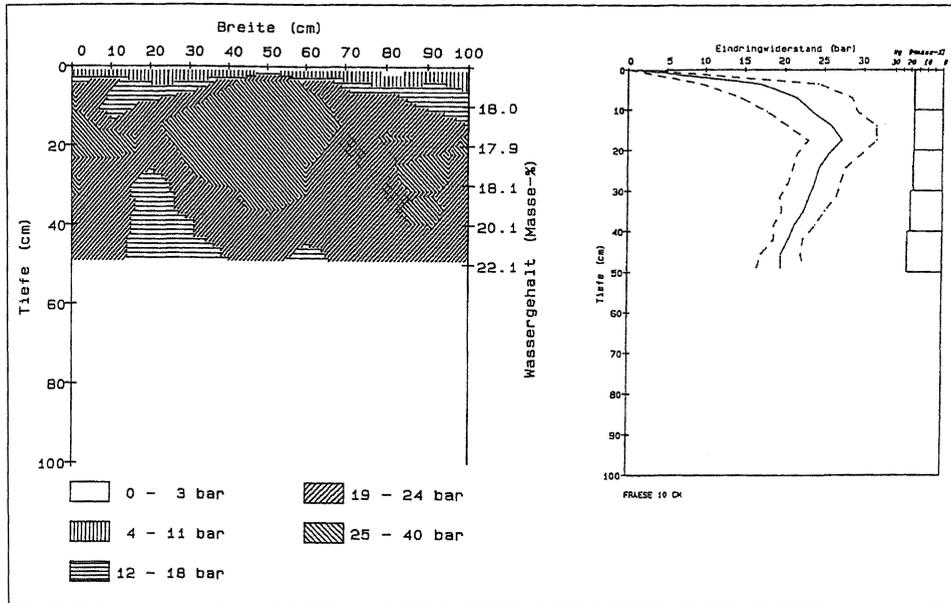


Abb. 8: Meßwerte des Eindringwiderstandes und Verlauf der Pflugsohlenbildung, Variante Fräse 10 cm Bearbeitungstiefe, stehende Kultur Zuckerrübe, Juni 1990  
 Fig. 8: Single values of penetration resistance and formation process of soil density layer, rotary tiller variant at 10 cm cultivation depth, standing culture sugar beet, June 1990

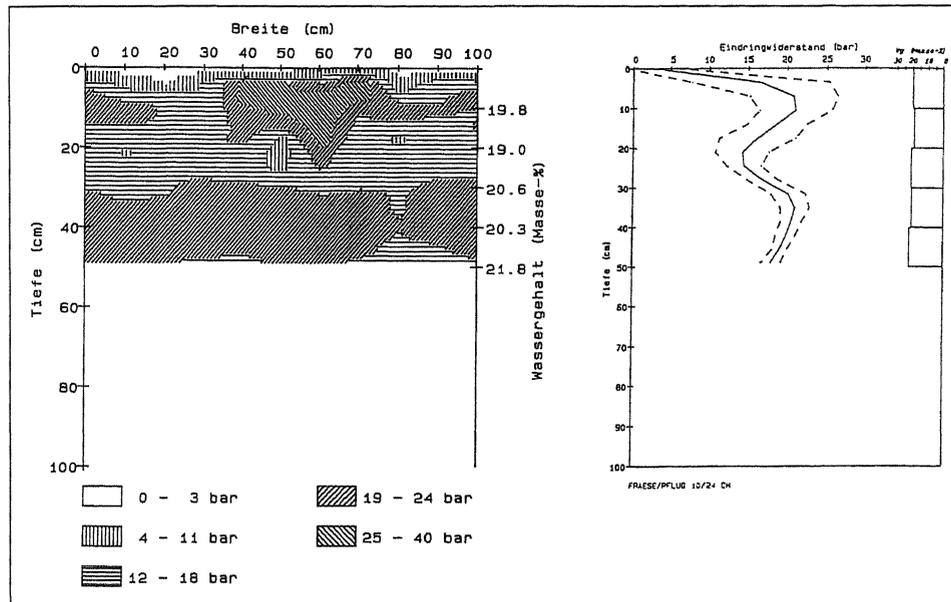


Abb. 9: Meßwerte des Eindringwiderstandes und Verlauf der Pflugsohlenbildung, Variante Fräse + Pflug 17 + 24 cm Bearbeitungstiefe, stehende Kultur Zuckerrübe, Juni 1990  
 Fig. 9: Single values of penetration resistance and formation process of soil density layer, rotary tiller + plough variant at 17 + 24 cm cultivation depth, standing culture sugar beet, June 1990

Ein günstiger Verdichtungsgrad im effektiven Durchwurzelungsbereich wurde mit der Variante Kombination Fräse und Pflug erreicht (Abb. 9). Im Bearbeitungshorizont fand man noch die schräg liegenden Erdbalken vom Pflügen und nur kleinräumige hochverdichtete Einschlüsse unter der Bearbeitungsgrenze. Der Pflugsohlenbereich weist im Vergleich zu den übrigen Pflugvarianten eine wesentlich dünnere Mächtigkeit mit geringer Bodenverdichtung auf.

#### 4. Diskussion

Die angeführten Ergebnisse zeigen, daß sich je nach Wirkung der Bearbeitungsgeräte und ihrer Einsatztiefe primär die Makrostruktur verändert. Eine hohe Abhängigkeit der bodenphysikalischen Kennzahlen aus der phänologischen Strukturänderung ergibt sich auch aus dem Winterfrost. Die Ergebnisse aus den Vorversuchen 1987 und 1988 zeigten, daß sie je nach Kulturpflanze, Bedeckungsgrad und Durchwurzelung des Bodens bis etwa Ende April am stärksten wirksam sind. Die langfristigen Auswirkungen der Primärbodenbearbeitung auf das Bodengefüge sind erst nach einer „relativ langen Setzungsperiode“ des bearbeiteten Bodens, die je nach Kulturart bis Ende April andauert, in der Hauptvegetationszeit objektiv erfaßbar.

Die langjährige unterschiedliche Primärbodenbearbeitung führte am Versuchsstandort – Oberboden schluffiger Lehm, Unterboden Lehm – bei der Aggregatstabilität zu Werten, die scheinbar widersprüchliche Tendenzen zeigen. Durch die standortüblich tiefe Pflug- und Grubberbearbeitung ergab sich eine signifikant höhere Krümelstabilität als bei der flachgründigen Grubberbearbeitung oder dem Fräseeinsatz. In der Literatur werden teilweise bei alternativen Bearbeitungsverfahren und Produktionstechniken höhere Aggregatstabilitäten festgestellt (SIDIRAS und KAHNT 1988). Die höchste Aggregatstabilität von über 70 % in den tief bearbeiteten Grubbertypen ist einerseits auf die günstigen Ackerbaubedingungen am Standort zurückzuführen und könnte andererseits auf den höheren Gehalt an organischer Substanz im Oberboden und die raschere Wasserabführung zurückzuführen sein, wie es auch CAPRIEL et al. (1990) sowie BAUMGARTL und HORN (1991) nachweisen. Günstig ist im  $A_p$ -Horizont weiters der hohe Schluff- (55 bis 57 %) und Tongehalt (28 bis 31 %), nachteilig ist in den Fräseparzellen der zeitweise bei stärkeren Gewittern oder nach ausgiebigen Regenfällen an der Oberfläche und an der Bearbeitungsgrenze eintretende Wasserstau (LIEBHARD et al. 1994). Eine langandauernde, volle Wassersättigung des Bodens führt zu einem Zerstören der Aggregate (PERFECT et al. 1990).

Meistens zeigen Böden mit einem höheren Humusgehalt eine höhere Aggregatstabilität (HARTGE 1975, HARTGE und HORN 1977, SIDIRAS und KAHNT 1988, WUTZL 1990). Mit zunehmendem Anteil an organischer Substanz im Boden wird einerseits die mikrobielle Aktivität erhöht (KARL 1985) und andererseits der Zerfall von Aggregaten (durch die intensivere Lebendverbauung) vermindert. Die Ursache wird sowohl auf die stärkere Bindung zwischen anorganischen und organischen Komponenten als auch auf die Reduzierung der Benetzbarkeit zurückgeführt (ZHANG und HARTGE 1992). Die niedrigere Aggregatstabilität im Oberboden der Fräseparzellen trotz des um 0,9 % höheren Humusgehaltes (LIEBHARD 1993) ist daher überwiegend auf die schlechte Wasserabführung und damit einhergehende Zerstörung der Aggregate zurückzuführen. Die mechanische Auflockerung des Oberbodens durch die Primärbodenbearbeitung entspricht nicht der inneren Auflockerung der einzelnen

Bodenaggregate, wie sie bei der Lebendverbauung erfolgt (MEYER 1985). Am angeführten Standort Anfelden überwiegt aber dennoch im großen Ausmaß der Einfluß der Bodenbearbeitungsvarianten auf die Aggregatstabilität. Bei der statistischen Beurteilung ergibt sich nach Bereinigung des Primär-Bodenbearbeitungseinflusses keine Regression des Humusgehaltes auf die Aggregatstabilität (Kovarianzanalyse nicht angeführt). Der Einfluß aller Bearbeitungsvarianten ist zwar gleich, die Regressionsgeraden liegen auf unterschiedlicher Höhenlage.

Wie die Ergebnisse weiters zeigen, ändert sich die mechanische Strukturfestigkeit innerhalb der Bearbeitungsvarianten während des Vegetationsjahres. In den Pflugvarianten sinken die Werte bis zum Herbst geringfügig, in den Dauerfräseparzellen steigt die Aggregatstabilität nach weiteren vier Monaten an (Abb. 1). Der verminderte Zerfall bzw. das Ansteigen um 4 % gegenüber dem Juni-Erfassungszeitpunkt könnte auf den deutlich höheren Humusgehalt zurückzuführen sein. Bereits SCHAFFER (1963–1964) wies in den meisten Ackerbaustandorten ein Ansteigen der Krümelstabilität innerhalb des Vegetationsjahres (mit den niedrigsten Werten im Frühjahr) nach. Im allgemeinen wird aber im Sommer eine höhere Aggregatstabilität erreicht als im Winter (DORMAAR 1983, HAYNES und SWIFT 1990). Diese Ergebnisse deuten auf einen direkten Zusammenhang zur mikrobiellen Aktivität (TIPPKÖTTER 1989). Eine lange Vegetationsdauer der Kulturpflanze mit hoher Bodenbeschattung (wie Zuckerrübe oder im Vorversuch Körnermais) verbessert gleichzeitig den Gefügestand. Ein wesentlicher Einfluß der Art und Dauer der Bodenbedeckung konnte auch von DOUGLAS und GOSS (1982) nachgewiesen werden.

Der unterschiedlich hohe Eindringwiderstand kann wertmäßig, wie es die Abbildungen 2 bis 9 zeigen, am besten räumlich erfaßt werden. Die sehr hohe Zahlendichte läßt nur eine graphische Darstellung zu. Die flächenbezogene Auswertung erlaubt keine statistische Auswertung oder wie sie sonst in der Geostatistik üblich ist (Werte auf Normalverteilung und Isotropie zu prüfen bzw. sie zu transformieren). Autokorrelationen ermöglichen, auch wenn sie für jede Raumachse einzeln berechnet werden, keine graphische Darstellung der Meßverteilung mit direktem Flächenbezug (SCHREY 1991).

Der Eindringwiderstand wird als Summe der Einzelmessungen je Tiefenstufe zusammengefaßt und in fünf pflanzenphysiologisch wirksame Wertbereiche unterteilt. Dadurch ist eine Beurteilung der Langzeitwirkung der unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren auf den relativen Grad einer Bodenverdichtung besser möglich. Der Bereich bis 3 bar Eindringwiderstand ist locker, von 4 bis 11 bar günstig, von 12 bis 18 bar noch meist gut durchwurzelbar. Am Standort entspricht der Bereich von 4 bis 18 bar für natürliche Böden etwa der „normalen Festigkeit“ (HARTGE 1986). Von 19 bis 24 bar Eindringwiderstand ist der Boden von den am angeführten Standort angebauten Fruchtarten Zuckerrübe, Mais, Weizen nur mehr schwer durchwurzelbar, bei über 25 bar weist er starke Verdichtungschäden auf. Ein zu lockerer Gefügestand – bis etwa 3 bar – ist überwiegend ungünstig, da einerseits die Bindigkeit des Bodens und andererseits die Wasserleitfähigkeit und damit die Wasserversorgung der Pflanzen – vor allem in trockeneren Zeiten – verschlechtert wird.

Wie aus den angeführten Ergebnissen und den früheren Messungen hervorgeht, ist der Eindringwiderstand von einer großen Zahl von äußeren Faktoren abhängig, im besonderen von der Art des eingesetzten Gerätes und der Bearbeitungstiefe. Bei einem Vergleich der Ergebnisse mehrerer Eindringwider-

standsmessungen innerhalb eines Jahres oder auch mehrerer Jahre auf derselben Meßstelle ist der unterschiedliche Bodenwassergehalt zu berücksichtigen. NEGI et al. haben 1981 einen hohen Regressionskoeffizienten von  $r = 0,90$  festgestellt. Im vorliegenden Feldversuch blieben die relativen Unterschiede im Durchdringungswiderstand zwischen den Bearbeitungsgeräten bzw. Arbeitstiefen erhalten.

Bei den Pflugvarianten ist die Krumenschicht des Bearbeitungshorizontes zwar durch die schräg liegenden, unterschiedlich stark verdichteten Erdbalcken heterogen, aber meist gut durchwurzelbar (ERTZINGER 1988, 1991). Die Höhe der Eindringwiderstände liegen im  $A_p$ -Horizont zwischen 4 bis 18 bar. Erst in der darunter befindlichen Pflugsohle steigt der Eindringwiderstand über 18 bar an. Unterhalb des  $A_p$ -Horizontes entsteht unabhängig vom Bearbeitungsgerät immer ein Verdichtungshorizont. Die Stärke der „Pflugsohle“ sowie die Höhe und das Ausmaß der hochverdichteten Stellen sind sowohl vom Gerät als auch im besonderen von der Bearbeitungstiefe bei der Primärbodenbearbeitung abhängig. Unter der Pflugsohle, ab ca. 30 bis 40 cm Bodentiefe, fällt der Eindringwiderstand teilweise wieder auf 19 bis 24 bar und ist bei allen Bearbeitungsvarianten fast auf gleicher Höhe. Die Auswirkung der Pflugarbeit auf den Eindringwiderstand wird bei anderen Bodentypen und -arten ähnlich beschrieben (KNITTEL und STANZEL 1976, DAHIYA et al. 1984, BORCHERT 1988, DIEZ et al. 1988, PAGLIALI 1990, BOHNE 1991, CHRISTOPH et al. 1991, BEYER 1991).

Im Gegensatz zu den Pflug- und tief bearbeiteten Grubberparzellen ist bei den ausschließlich gefrästen Teilstücken der Boden unter der Bearbeitungsgrenze von 10 bis 35 cm Bodentiefe hoch verdichtet. Die Eindringwiderstandswerte liegen auch bei günstigen Bodenwassergehalten von 75 bis 85 % der Feldkapazität über 18 bar. Unterschiede im Eindringwiderstand in dieser Höhe bei einem Vergleich von Fräse und Pflugbearbeitung wurden auch von KNITTEL und STANZEL (1976), BORCHERT (1988) und CHRISTOPH et al. (1991) festgestellt.

Bei jahresweise wechselnder Verwendung von Pflug oder Fräse in der Primärbodenbearbeitung zeigt sich, daß mit der Pflugbearbeitung jedes zweite Jahr eine beinahe vollständige Wiederauflöckerung der durch die Fräse verursachten verdichteten Unterkrume erreicht wird. Der Eindringwiderstand im Hauptwurzelbereich von 10 bis 25 cm liegt nur geringfügig unter den Werten der mit dem Pflug bearbeiteten Parzellen. Meist liegt er sogar im günstigen Bereich zwischen 4 bis 18 bar. Ein weiterer wesentlicher Vorteil dieser Kombinationsvariante in der Primärbodenbearbeitung ist die überwiegend geringere Stärke der Pflugsohle unter der Bearbeitungsgrenze.

Bei der Darstellung der Ergebnisse der Penetrometermessung muß der unterschiedliche Wassergehalt in der gesamten Meßtiefe als natürliche Bezugsgröße und Auswirkung der Bodenbearbeitung gesehen werden. Bei einer Korrektur des Eindringwiderstandes auf z. B. 22 % Wassergehalt in allen Meßtiefen (mit Hilfe des verwendeten EDV-Programmes) zeigt sich fast ein paralleler Verlauf der Kurven. Eine Korrektur auf einen einheitlichen Standardwassergehalt des Bodens bis zu einer Meßtiefe von 50 cm ist nicht gerechtfertigt, da sie am angeführten Standort den Auswirkungen der zehnjährigen unterschiedlichen Primärbodenbearbeitung auf wesentliche bodenphysikalische Kriterien und Kenngrößen sowie dem Pflanzenwachstum widersprechen.

## 5. Schlußfolgerung

Bei dem derzeitigen üblichen Produktionsverfahren kommt es auf mittelschweren bis schweren Böden trotz hoher Aufwendungen bei der Bodenbearbeitung häufig zu bewirtschaftungsbedingten Verdichtungen in der Krume und im Unterboden. Die bereits meßbaren Veränderungen ausgewählter bodenphysikalischer Kenngrößen sind eine der Hauptursachen für das verminderte Pflanzenwachstum und die Ertragsleistung (Teil 6 bis 8, in Bearbeitung). Die angeführten Prüfvarianten ergaben, daß ein langjähriges, ausschließlich flachgründiges, intensives Bearbeiten des Bodens mit schnellrotierenden Werkzeugen vor jeder Feldbestellung die Aggregatstabilität besonders gefährdet. Dies führt zu einem gestörten Gefüge mit vorzeitigem Zerfall von Bodenaggregaten, die Stabilität fällt im Oberboden unter 74 %. In der Folge sinkt das Porenvolumen auf der ansonst fruchtbaren Lockersediment-Braunerde unter die ermittelte notwendige Mindesthöhe von 42 % ab. Die Grob- und Mittelporenanzahl vermindert sich, die Oberflächenverschlammung nimmt stark zu, und die Bodenwasserführung ist bei ungünstiger Witterung nicht mehr zufriedenstellend. Ein Wechseln – sowohl des Gerätes (gezogen oder zapfwellengetrieben) als auch in der Bearbeitungstiefe (von 10 bis 24 cm) – ermöglicht in der Primärbodenbearbeitung noch am besten die gestellten Anforderungen der jeweiligen Kulturpflanze zu erreichen.

Die Ergebnisse der Bodeneindringwiderstandsmessung ergaben, daß hochempfindliche Penetrometer, trotz häufig gegenteiliger Erfahrungen, zur Charakterisierung des Durchwurzelungswiderstandes geeignet sind. Der Durchdringungswiderstand im effektiven Wurzelraum ist in den kritischen Vegetationsabschnitten in seiner absoluten Höhe vom Wassersättigungsgrad des Bodens abhängig. Bei Zuordnung des Eindringwiderstandes in mehr oder weniger günstige Bereiche können die relativen Unterschiede als Folge der langjährigen unterschiedlichen Bearbeitung und der verschiedenen Arbeitstiefe der Geräte im Aufbau und der Mächtigkeit des Verdichtungshorizontes dreidimensional dargestellt werden. Die im gesamten durchwurzelten Profil raumbezogenen bodenphysikalischen Parameter erfordern eine mehrjährige, aufwendige Untersuchung, da viele äußere Bedingungen, wie Witterungsverlauf, Jahreszeit, Kulturart usw. Einzelmeßergebnisse stark beeinflussen.

Einmalige punktuelle Messungen von Struktureigenschaften sind für eine umfassende Beurteilung der Wurzelwegsamkeit der Kulturpflanzen meist nicht geeignet. Fortlaufende periodische Messungen verursachen zwar einen großen Aufwand, sind aber zur Ermittlung der Strukturdynamik zwingend notwendig.

### Danksagung

Für die Bereitstellung des Labors und des Computermodells zur Auswertung der Daten danken wir der Direktion und Herrn Dipl.-Ing. E. MURER, Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen. Die Analysenkosten wurden durch ein gefördertes Projekt vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft getragen. Besonderer Dank gilt Herrn Dr. A. SCHREIBERHUBER für die langjährige kostenlose Bereitstellung des Feldes und die Versuchsdurchführung.

### Literatur

- ANDERSON, T. H., 1991: Bedeutung der Mikroorganismen für die Bildung von Aggregaten im Boden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 154, 409-416.
- BAUMGARTL, T. and R. HORN, 1991: Effect of aggregate stability on soil compaction. *Soil and Tillage Research* 19, 203-213.
- BEYER, L., 1991: Gefügeeigenschaften von Parabraunerden und Podsolen unter Wald- und Ackernutzung. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 154, 107-114.

- BOHNE, H., 1991: Der Einfluß künstlicher vertikaler Grobporen in einer verdichteten Bodenmatrix auf das Wachstum von Winterweizen. I. Wachstum von Winterweizen auf einer Parabraunerde aus Löß. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 154, 27-31.
- BOLLING, I. und W. SOEHNE, 1982: Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge. *Landtechnik - Lehrte* 37, 54-57.
- BORCHERT, H., 1982: Bodengefügeveränderungen nach Umstellung von konventioneller Bodenbearbeitung auf Minimal-Bodenbearbeitung. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges.* 34, 205-208.
- BORCHERT, H., 1988: Bodenphysikalische Veränderungen eines Lößbodens bei langjähriger pflugloser Bewirtschaftung. *Bayer. Landwirtsch. Jahrb.* 65, 813-824.
- BURNS, R. G. and J. A. DAVIES, 1986: The microbiology of soil structure. *Biol. Agric. Hort.* 3, 95-113.
- CAPRIEL, P., T. H. BECK, H. BORCHERT and P. HÄRTER, 1990: Relationship between soil aliphatic fraction extracted with supercritical hexane, soil microbial biomass and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 415-420.
- CHRISTOPH, H., G. KÜHN und A. KUNZE, 1991: Bewertung des physikalischen Boden-zustandes nach strukturschonender Bodenbearbeitung auf einem D4a-Standort. *Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenk.* 35, 6, 443-350.
- DAHYA, I.S., J. RICHTER and R. S. MALIK, 1984: Soil spatial variability: A review. *Intern. J. Trop. Agri.* 2, 1-102.
- DIEZ, T., J. KREITMAYR und H. WEIGELT, unter Mitarbeit von J. BAUCHHENSZ, T. BECK und H. BORCHERT, 1988: Einfluß langjähriger pflugloser Ackerbewirtschaftung (System HORSCH) auf Pflanzenwachstum, Wirtschaftlichkeit und Boden. *Bayer. Landwirtsch. Jahrb.* 65, 789-812.
- DORMAAR, J. F., 1983: Chemical properties of soil and water-stable aggregates after sixty-seven years of cropping to spring wheat. *Pl. Soil* 75, 51-61.
- DOUGLAS, J. T. and M. J. GOSS, 1982: Stability and organic matter content of surface soil aggregates under different methods of cultivation and grassland. *Soil and Tillage Research* 2, 155-176.
- EDER, G., 1987: Bodenkrümelstabilität und Düngung. Jahresbericht der Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irnding, 1, 1-24.
- EITZINGER, J., 1988: Einfluß unterschiedlicher Primärbodenbearbeitungssysteme auf Eindringwiderstand und Infiltration eines Bodens im semihumiden Klimabereich. Diplomarbeit, Univ. f. Bodenkultur, Wien.
- EITZINGER, J., 1991: Einflüsse unterschiedlicher Primärbodenbearbeitungssysteme auf ausgewählte bodenphysikalische Eigenschaften. Dissertation, Univ. f. Bodenkultur, Wien.
- GARDNER, W., 1972: Soil physics. John Wiley and Sons, Canada.
- GERZABEK, M. H. und H. ROESSNER, 1993: Über den Einfluß der Lagerungszeit von Bodenaggregaten auf die Aggregatstabilität. *Die Bodenkultur* 44, 1-5.
- HARTGE, K. H., 1975: Organic matter contribution to stability of soil structure. *Soil conditioners SSSA Special Publication No. 7*, 103-110.
- HARTGE, K. H., 1986: A concept of compaction. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 149, 361-370.
- HARTGE, K. H., 1992: Lehrbuch der Bodenkunde. In: SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL. 13. Aufl., Kapitel XIV - XIX, Enke, Stuttgart.
- HARTGE, K. H. und R. HORN, 1977: Spannungen und Spannungsverteilungen als Entstehungsbedingungen von Aggregaten. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges.* 25, 23-34.
- HARTGE, K. H. und R. HORN, 1989: Die physikalische Untersuchung von Böden. 2. Aufl., Enke, Stuttgart.
- HAYNES, R. J. and R. S. SWIFT, 1990: Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *J. Soil Sci.* 41, 73-83.
- HELAL, H. M., 1991a: Bodengefüge, Wurzelentwicklung und Wurzelfunktionen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 154, 403-407.
- HELAL, H. M., 1991b: Estimation of living part of plant roots. *International Society of Root Research 3rd Symposium Proceedings, Vienna.*
- HORN, R., 1987: Die Bedeutung der Aggregierung für die Nährstoffsorption in Böden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 150, 13-16.
- HORN, R., 1990: Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. *Review Article, Soil Tillage Res.* 17, 265-289.
- HORN, R., T. BAUMGARTL, S. KÜHNER, M. LEBERT und R. KAYSER, 1991: Zur Bedeutung des Aggregierungsgrades für die Spannungsverteilung in strukturierten Böden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 154, 21-26.
- KARL, U., 1985: Erfassung der Dynamik des strukturellen Zustandes von Ackerkrumen reliefierter, lehmiger Moränen des Jungpleistozäns. *Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenk.* 7, 419-425.

- KEMPER, W. D. and E. J. KOCH, 1966: Aggregate stability of soils from Western Portions of the United States and Canada. U. S. Dep. Agric. Tech. Bull., 1355.
- KLAGHOFER, E., 1985: Einfluß der landwirtschaftlichen Bodennutzung auf den Oberflächenabfluß bei Starkregen. Mitteilungen aus der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen/NÖ, Nr. 30, 1-105.
- KLAGHOFER, E., 1988: Physikalische Methoden in der landwirtschaftlichen Bodenforschung. Mitt. d. Österr. Bodenkundl. Ges. 36, 125-137.
- KLAGHOFER, E. and E. MURER, 1989: Characterisation of different tillage practices with a hand-held penetrometer. Poster at the International Conference: Soil compaction as a factor determining plant productivity, Lublin, Poland.
- KLAGHOFER, E. und J. EITZINGER, 1990: Einfluß unterschiedlicher Primärbodenbearbeitungssysteme auf Eindringwiderstand und Infiltration. Landtechnik 45, 231-233.
- KNITTEL, H. und H. STANZEL, 1976: Untersuchungen des Bodengefüges mit Penetrometer und Rammsonde. Z. Acker- und Pflanzenbau 142, 181-193.
- LE BISSONNAIS, Y., A. BRUAND and M. JAMGNE, 1989: Laboratory study of soil crusting: relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. Catena 16, 377-392.
- LIEBHARD, P., 1993: Einfluß der Primärbodenbearbeitung auf Textur und organische Substanz von Ackerböden im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 1). Die Bodenkultur 44, 199-210.
- LIEBHARD, P., J. EITZINGER und E. KLAGHOFER, 1994: Einfluß der Primärbodenbearbeitung auf Infiltration und Wassergehalt im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 4). Die Bodenkultur 45, 297-311.
- MARTIN, J. P., W. W. P. MARTIN, J. B. PAGE, W. A. RANEY and J. D. DEMENT, 1955: Soil aggregation. Adv. Agron. 7, 1-37.
- MEYER, B., 1985: Moderner Acker- und Pflanzenbau aus Sicht der Gestaltung des Bodengefüges durch Bodenbearbeitung. Unser Boden: 70 Jahre Agrarforschung der BASF AG, Köln, 11-137.
- MURER, E., E. KLAGHOFER und J. SCHWARZ, 1991: Ein EDV-Programm zur Auswertung der Eindringwiderstände aus Penetrometermessungen. Wasser und Boden 8, 495-499.
- MURER, E. J., A. BAUMGARTEN, G. EDER, M. H. GERZABEK, E. KANDELER and N. RAMPAZZO, 1993: An improved sieving machine for estimation of soil aggregate stability (SAS). Geoderma 56, 539-547.
- NEGI, S. C., E. MCKEYES, G. S. V. RAGHAVAN and F. TAYLOR, 1981: Relationship of field traffic and tillage to corn yields and soil properties. J. Terramechanics 18, 81-90.
- PAGLIALI, M., 1990: Micromorphometric and micromorphological investigations on the effect of compaction by pressures and deformations resulting from tillage and wheel traffic. Soil and Tillage Research 16, 31-38.
- PERFECT, E., B. D. KAY, W. K. P. VAN LOON, R. W. SHEARD and T. POJASOK, 1990: Factors Influencing Soil Structural Stability within a Growing Season. Soil Sci. Soc. Am. J. 54, 173-179.
- PITTELKOW, U., K. JOHN und P. KÖRBS, 1988: Über die Auswirkungen von Brücken zonen in Krumbasisverdichtungen auf Durchwurzelung und Wasserentzug bei differenzierter Bodenfeuchte und -dichte. Arch. Acker-, Pflanzenbau Bodenk. 32, 387-395.
- RICHARD, B. G. and E. L. GREACEN, 1986: Mechanical stress on an expanding cylindrical root analogue in granular media. Aust. J. Soil Res. 24, 393-404.
- SCHAFFER, G., 1963-1964: Phänologische Strukturänderungen bei verschiedenen Bodentypen. Z. Acker- und Pflanzenbau 118, 201-214.
- SCHREY, H. P., 1991: Die Interpretation des Eindringwiderstandes zur flächenhaften Darstellung physikalischer Unterschiede in Böden. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 154, 33-39.
- SEKERA, F., 1951: Gesunder und kranker Boden. Paul-Parey, Berlin.
- SIDIRAS, N. und G. KAHNT, 1988: Wirkung unterschiedlich intensiver Bodenbearbeitung bei verschiedenen Fruchtfolgen auf Ertrag, Wurzelwachstum und Bodenkennwerte. Berichte der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Bd. 1, AG Agrarökologie: Dauerversuche zur Lösung aktueller Probleme im Pflanzenbau. Wissenschaftsverlag Vauk, Kiel, 150-166.
- SWABY, R. J., 1949: The relationship between micro-organisms and soil aggregation. J. Gen. Microbiol. 3, 236-254.
- TEBRÜGGE, F., 1986: Einfluß von Bodenbearbeitungsverfahren auf das Bodengefüge. KTBL-Schrift 308, 137-152.
- TIPPKÖTTER, R., 1989: Aspekte der Aggregation in A<sub>h</sub>-Horizonten von Böden mit unterschiedlicher Genese. Habil., Hannover.

- WHITELEY, G. M., E. OTOMO and A. R. DEXTER, 1991: A comparison of penetrometer pressures and the pressures exerted by roots. *Plant Soil* 61, 351-364.
- WUTZL, C., 1990: Vergleichende Untersuchungen der Aggregatstabilität an Ackerböden des steirischen Alpenvorlandes mit Einbeziehung ökologischer Parameter. Dissertation, Universität Graz.
- ZHANG, H. und K. H. HARTGE, 1992: Zur Auswirkung organischer Substanz verschiedener Humifizierungsgrade auf die Aggregatstabilität durch Reduzierung der Benetzbarkeit. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 155, 143-149.

(Manuskript eingelangt am 12. Juli 1994, angenommen am 1. Dezember 1994)

Anschrift der Verfasser:

Dr. Peter LIEBHARD, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Universität für Bodenkultur, Gregor-Mendel-Straße 33, A-1180 Wien; Dr. Josef EITZINGER, Institut für Meteorologie und Physik der Universität für Bodenkultur, Türkenschanzstraße 18, A-1180 Wien und Hofrat Univ.-Doz. Dr. Eduard KLAGHOFER, Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, A-3252 Petzenkirchen