

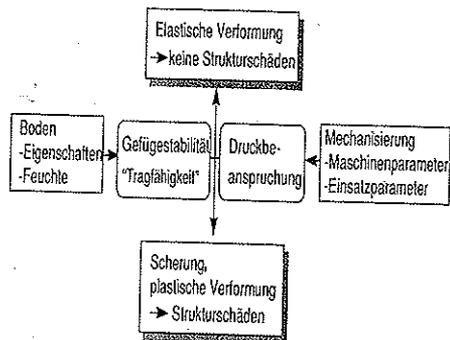
Tragen Unterböden grössere Lasten als erwartet?

Etienne DISERENS und Thomas ANKEN, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon
 Peter WEISSKOPF und Urs ZIHLMANN, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), CH-8046 Zürich-Reckenholz

Die Einführung von selbstfahrenden Zuckerrübenvollerntern mit einem Gesamtgewicht von über 30 Tonnen liess befürchten, dass diese grossen Lasten eine hohe Verdichtungsgefahr für die Unterböden darstellen. FAT und FAL haben auf verschiedenen Böden Befahrungsversuche mit gezogenen und selbstfahrenden Zuckerrübenvollerntern unternommen. Die hohen Gewichte verursachten deutliche Verdichtungen im Oberboden. Die befürchteten Unterbodenverdichtungen liessen sich jedoch nur teilweise nachweisen.

Beim Befahren der Bodenoberfläche wird der Aufstandsdruck der Räder in die Tiefe weitergegeben. Es stellt sich die Frage, wie und unter welchen Bedingungen diese Druckbelastungen das Bodengefüge verändern. Boden ist ein Medium, das aus festen, flüssigen und gasförmigen Anteilen besteht. Dessen Gefüge, das heisst die dreidimensionale Anordnung von Fest-

substanz und Porenraum, kann durch Druck sowohl elastisch (= reversibel) als auch plastisch (= irreversibel) verformt werden. Eine Verdichtung des Bodens findet dann statt, wenn die Stabilität des Bodengefüges («Tragfähigkeit des Bodens») überschritten wird und eine plastische, dauerhafte Verformung auftritt (Abb. 1). Das kann sich in einer Veränderung des Porenvolumens beziehungsweise der Porendurchlässigkeit äussern.



Versuche auf drei Standorten

Selbstfahrende, sechsreihige Zuckerrübenvollernter sind zurzeit die schwersten landwirtschaftlichen Maschinen. Um deren Auswirkungen auf den Boden zu untersuchen, führten die FAT und FAL auf drei verschiedenen Standorten (Tab. 1) Befahrungsversuche durch. Die Standorte A und

C mit schwach humosem sandigem Lehm zeichneten sich durch eine gute Bodenstruktur aus. Der schwach humose tonige Lehm des Standortes B wies eine ausgeprägte Pflugsohle sowie eine sehr kompakte Bodenstruktur auf. Die Saugspannungen des Bodenwassers lagen zum Befahrungszeitpunkt grösstenteils bei 20 bis 60 hPa, was einem nassen bis sehr feuchten Bodenzustand entspricht. Die Befahrungen fanden also in keinem der Fälle bei optimal tragfähigen, trockenen Böden statt. Tabelle 2 zeigt charakteristische Eigenschaften der verschiedenen Befahrungsvarianten. Weisskopf *et al.* (1997) beschreiben die einzelnen Verfahren ausführlicher. Die maximalen Radlasten der eingesetzten Maschinen lagen zwischen 2,8 t und 8,9 t. Im Vergleich dazu werden auf dem Hinterrad eines 70 kW-Traktors rund 2 t, auf den Antriebsrädern gängiger Mährescher zirka 4 bis 6 t Last abgestützt.

Grosse Aufstandsflächen: langsamer Druckabbau

In Abbildung 2 sind die mit Bollingsonden (Niederer 1991) gemessenen und nach Söhne (1953) berechneten Bodendruckwerte in drei Tiefen dargestellt. Diese berech-

Abb. 1. Zusammenhang zwischen Gefügestabilität und Druckbeanspruchung von Böden.

Tab. 1. Bodenmerkmale der Versuchsstandorte

Standort	Wiederholung	Tiefe [cm]	Bodenart	Bodenfeuchte [hPa]	Körnung			Grobporenvolumen bis pf 2* [Vol. %]	Gefügestufe**
					Ton [Gew. %]	Schluff [Gew. %]	Sand [Gew. %]		
A	1 + 2	15	Lehm	-62	21	21	58	17,3	
	1 + 2	40	Lehm	-51	21	24	55	16,9	sub-Ek
	1 + 2	60	Sandiger Lehm	-46	18	24	58	15,9	sub-Ek
B	1 + 2	15	Toniger Lehm	-42 / -48	34	45	21	7,5	koh-pol
	1 + 2	40	Toniger Schluff	-38 / -146	34	52	14	9,4	koh
	1 + 2	60	Toniger Lehm	-23 / -178	39	49	12	8,6	pol
C	1	15	Lehm	-40	26	42	32	16,9	sub
	1	40	Lehmiger Schluff	-25	28	52	20	10,5	sub
	1	60	Lehmiger Schluff	-54	29	53	18	14,3	sub
	2	15	Lehm	-36	25	34	41	17,0	sub
	2	40	Lehm	-21	23	33	44	10,9	sub-koh
	2	60	Sandiger Lehm	-22	15	26	59	17,9	sub-koh

*pf 2 Saugspannung = -100 hPa in unbefahrener Kontrolle

** Gefügestufe Ek: Einzelkorn, koh: kohärent, pol: polyedrisch, sub: subpolyedrisch

neten Werte entsprechen einem gleichförmig aufgebauten, auf Druckeinwirkungen elastisch reagierenden Boden ($\nu = 2$). Die Berechnung der verwendeten Kontaktflächen erfolgte nach Formel (Kramer 1988): Kontaktfläche = $0,31 \times \text{Reifendurchmesser} \times 0,87 \times \text{Reifenbreite}$.

Erfahrungsgemäss wiesen die berechneten Kontaktflächen meist kleinere Werte als die gemessenen auf. Die Messungen der Bollingsonden (siehe Foto) mit je zwölf Wiederholungen pro Verfahren und Tiefe erlaubten die Erfassung der Streuung der Werte. Es lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Der Druckabbau zwischen 20 und 40 cm Bodentiefe war bis auf wenige Ausnahmen wesentlich grösser als zwischen 40 und 60 cm.

- In 60 cm Tiefe lassen sich mit Bollingsonden zwar noch Druckerhöhungen nachweisen; diese sind aber nur noch gering.

- Die gemessenen Bollingsondendrucke fallen im Vergleich mit den nach Söhne (1953) berechneten Werten tiefer aus. Der gemessene Druckabbau erfolgt deutlich stärker in oberflächennahen Bodenschichten, als dies die üblicherweise verwendeten Rechenmodelle aufzeigen. Bei hohen Radlasten und Kontaktdrücken stimmen die Werte besser überein.

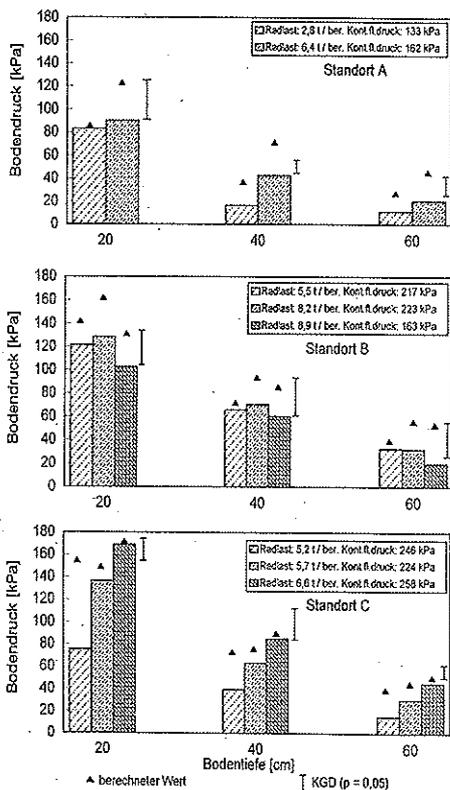


Abb. 2. Mit Bollingsonden gemessene und nach Söhne (1953) berechnete Bodendrucke der verschiedenen Verfahren (Tab. 1) auf drei Standorten in drei Tiefen unter Angabe der kleinsten gesicherten Differenz.

Tab. 2. Reifendimensionen, Radlasten und Kontaktflächenendruck der eingesetzten Verfahren. Für jedes Verfahren ist jeweils nur das Rad mit der höchsten Last dargestellt, welches zugleich auch den höchsten Kontaktflächenendruck besass. (Ausnahme: Auf Standort C, Verfahren 6550 kg bei 248 kPa ist das zweitschwerste Rad mit dem höchsten Kontaktflächenendruck dargestellt). Nähere Angaben siehe Weisskopf et al. (1997).

Standort	Reifendimension	Maximale Radlast kg	Berechneter Kontaktflächenendruck kPa*	Fabrikat
A	600/55-26,5	2800	133	Stoll, 2-reihig Holmer, 6-reihig
	800/65R32	6360	162	
B	700/50-26,5	5500	217	Kleine, 2-reihig Kleine, 6-reihig Holmer, 6-reihig
	710/70R38	8200	223	
	73/44-32	8900	163	
C	600/55-26,5	5200	246	Stoll, 2-reihig Kleine, 6-reihig Kleine, 6-reihig
	700/50-26,5	5690	224	
	700/50-26,5	6550**	258	

* 100 kPa = 1 bar

** Höchste Radlast: 7640 kg, entsprechender Kontaktdruck: 208 kPa (beide Räder in gleicher Spur)

- Bollingsonden messen wegen ihrer Konstruktion (wassergefüllte Ballonsonden) keine absoluten, richtungsbezogenen Drücke. Sie erlauben aber zuverlässige relative Vergleiche zwischen verschiedenen Verfahren und sind ein guter Indikator für den mechanischen «Bodenstress». Wie sich eine bestimmte Druckbeanspruchung schliesslich in den verschiedenen Böden auf den Gefügestand auswirkt, hängt dagegen stark von der jeweiligen Gefügestabilität («Tragfähigkeit») ab.

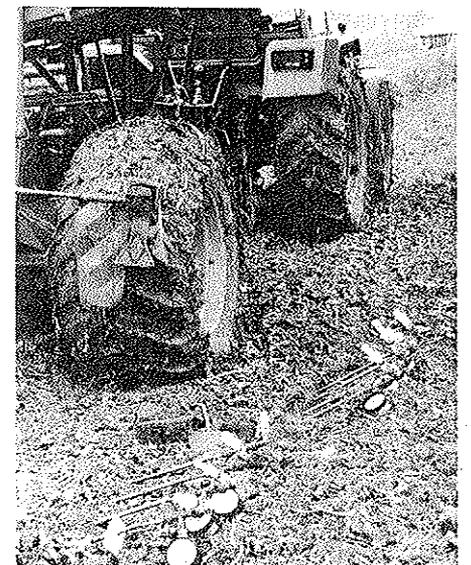
Gefügestand: Porenvolumen und -Durchlässigkeit

Um mögliche Gefügeveränderungen erkennen zu können, wurden vor und nach den Befahrungen folgende Gefügeparameter erhoben: Lagerungsdichte, Porosität (Gesamtporenvolumen) und Porenvolumenverteilung (Grob-, Mittel- und Feinporenvolumen) (Eidg. Forschungsanstalten 1997). Auf den Standorten B und C wurde zusätzlich die Luftdurchlässigkeit des Bodengefüges gemessen (Eijkelkamp 1983).

Für die Abschätzung aufgetretener Verdichtungswirkungen erwiesen sich Veränderungen der Porenvolumenverteilung (Umverteilung von Grob- zu Mittel-/Feinporen, Verlust von Grobporen) sowie der Luftdurchlässigkeit als zuverlässigste Parameter. Lagerungsdichte und Porosität reagieren dagegen nur sehr träge und hängen stark von der Bodenart ab. Aus diesem Grund wird nicht näher auf diese beiden Parameter eingegangen.

Die Luftdurchlässigkeit ist als komplementäre Messgrösse zur Porenvolumenverteilung zu betrachten, weil sie eine

Beurteilung der Porenanordnung (z.B. Kontinuität) erlaubt und damit Hinweise auf die Durchlässigkeit eines Bodengefüges liefert. Die Empfindlichkeit dieser Methode bezüglich der Porenanordnung hat zugleich Vor- und Nachteile: Abhängig von der verwendeten Probengrösse (Zylinderproben mit 55 mm Durchmesser und 42 mm Höhe) können sich einzelne durchgehende Grobporen (z.B. Bioporen, Schrumpfrisse) sehr stark auf das Messresultat auswirken, was sich bei einer normalen Beprobung unter Feldbedingungen als erhebliche Grundstreuung bemerkbar macht. Wird allerdings das Grobporenvolumen nur schon in seiner Anordnung erheblich verändert (z.B. abge-



Die Bodendruckmessung mit Bollingsonden (an einem Rohrende befestigter, wassergefüllter Ballon) ist ein guter Indikator des «Bodenstresses». Sie eignet sich für Vergleiche verschiedener Verfahren. Die Messung gerichteter Drücke (z.B. Drücke in vertikaler Richtung) ist dagegen nicht möglich.

schert), kann sich dieser Einfluss sehr deutlich in einer verringerten Luftdurchlässigkeit bemerkbar machen. Luftdurchlässigkeitswerte, die im Widerspruch zum Grobporenvolumen stehen, werden im Text erwähnt.

Neueste Methoden wie zum Beispiel die Computertomographie werden die Beurteilungsmethodik sicherlich noch verfeinern. Wesentliche Veränderungen des Bodengefüges lassen sich aber mit den beschriebenen Verfahren belegen.

Ausgeprägte Verdichtungen im Oberboden (20 cm)

Abbildung 3 zeigt, dass die Befahrungen auf allen Standorten zu deutlichen Verdichtungswirkungen im Oberboden führten.

Standort A. Die kleinere Radlast (2,8 t) führte auf dem Standort A zu keiner starken Verdichtung. Dies war erst bei der hohen Radlast (6,4 t) der Fall. Der hohe Humusgehalt, die hohe biologische Aktivität und die geringere Feuchtigkeit verliehen diesem Boden im Vergleich zu den anderen Standorten eine hohe Gefügestabilität und damit Tragfähigkeit.

Standort B. Trotz der kompakten Strukturen mit geringem Grobporenvolumen führten alle Verfahren zu einer merklichen weiteren Verdichtung. Zwischen den Verfahren waren keine Unterschiede festzustellen. Im Vergleich zum Standort

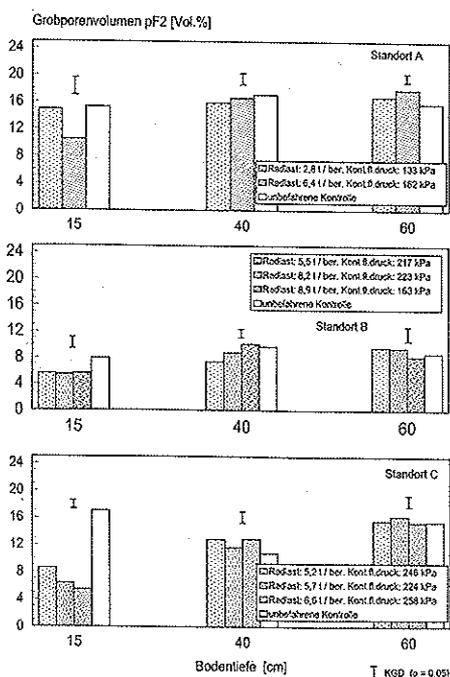


Abb. 3. Grobporenvolumen (Vol.%) der verschiedenen Befahrungsvarianten und der unbefahrenen Kontrolle auf drei Standorten unter Angabe der kleinsten gesicherten Differenz.

C mit einem grösseren Ausgangs-Grobporenvolumen ist die Verdichtung absolut gesehen mit zirka 2 Vol.% wesentlich kleiner. Diese relativ kleine Reduktion bewirkte in diesem kompakten Boden eine weitere bedeutende Verschlechterung der ohnehin geringen Luftdurchlässigkeit.

Die hohe Bodenfeuchtigkeit verringerte die Stabilität dieses lehmreichen Oberbodens stark.

Standort C. Als sandiger Lehm mit hohem Grobporenvolumen reagierte dieser Boden mit starken Verdichtungen (Verlust von über 10 Vol.% Grobporen) und stark verringerter Luftdurchlässigkeit auf die Druckbeanspruchungen. Die grösseren Radlasten führten zu stärkeren Verdichtungen des Oberbodens als die kleineren Lasten. Die Auswirkungen auf den Boden lassen sich aber nicht nur auf das jeweilige Radgewicht zurückführen, sondern müssen im Zusammenhang mit den Kontakflächendrücken betrachtet werden. Die lockere Struktur mit einem hohen Grobporenvolumen hatte eine geringe Tragfähigkeit zur Folge.

Einzelne Verdichtungsanzeigen in 40 cm Tiefe

Unter den Fahrspuren der ersten Unterbodenschicht (35-40 cm), knapp unter dem Bearbeitungshorizont, waren die Veränderungen des Gefügestandes deutlich schwächer als in der Bearbeitungsschicht (Abb. 3). Ein direkter Zusammenhang zwischen Radlast und Bodenverdichtung liess sich in dieser Tiefe nicht nachweisen.

Standort A. Die auf dem Standort A geprüften Radlasten mit relativ geringen Kontakflächendrücken verursachten keine Verdichtungen, was sicherlich auch auf die hohe Stabilität dieses Bodens zurückzuführen ist.

Standort B. In den grundwasserbeeinflussten, ton- und schluffreichen Böden des Standortes B liessen sich auf 40 cm Tiefe Verdichtungswirkungen nur bei einem Verfahren eindeutig nachweisen (5,5 t/217 kPa: Zweireihiger, gezogener Vollerner). Es ist möglich, dass sich bei diesem Verfahren die Mehrfachbefahrungen negativ auswirkten. Wohl mag eine Verminderung des Grobporenvolumens von 2 Vol.% nicht als sehr hoch erscheinen, bei diesem Boden, der eine ausgeprägte Pflugsohle und eine sehr kompakte Struktur besitzt, bedeutet diese Verminderung jedoch eine weitere erhebliche Verschlechterung.

Standort C. Erstaunlicherweise liess sich auf diesem Standort in 40 cm Tiefe keine oder nur eine knapp signifikante Grobporenvolumenzunahme feststellen. Gleichzeitig veränderte sich die Luftdurchlässigkeit nicht. Deshalb vermuten wir, dass es sich in jenen Fällen, in welchem Gefügeveränderungen auftraten, bei diesen Veränderungen um Scherwirkungen oder Entlastungsbrüche als Folge der Überfahrt handeln könnte.

In 60 cm Tiefe: keine eindeutigen Verdichtungen

In 55 bis 60 cm Tiefe war auf keinem Standort eine eindeutige Veränderung des Gefügestandes nachweisbar (Abb. 3). Weder das Grobporenvolumen noch die Luftdurchlässigkeit zeigten eine Veränderung. Einzig in der Feldwiederholung 2 auf dem Standort C liess sich bei allen Verfahren eine geringfügige Verminderung des Volumens der grössten Poren an der Grenze der statistischen Signifikanz feststellen.

Farbstoffinfiltration: Fließwege

Um den Einfluss der Befahrungen auf die Bodenstruktur zu visualisieren, wurde quer zu den Fahrspuren eine Lösung mit blauem Lebensmittelfarbstoff infiltriert (40 l/m², bei einer Konzentration von 3 g Vitasyblau/l). Das Ausbringen der Farbstofflösung erfolgte mittels einer Giesskanne während zirka 1 1/2 Stunden pro Probefläche (300 cm x 80 cm). Das Ziel war es, an der Bodenoberfläche möglichst keinen Wasserstau zu verursachen und den Farbstoff gleichmässig infiltrieren zu lassen. Dies gelang neben den Radspuren gut. Die Verdichtungen in den Radspuren hemmten die Infiltration aber bei allen Verfahren sehr stark. Fotografien hielten die nach der Infiltration aufgedragenen Profile fest. Die digitale Bildanalyse der eingescannten Fotos ermöglicht schliesslich die horizontale Quantifizierung der blau eingefärbten Flächen. Abbildung 4 zeigt deutlich die durch die Radspuren verursachte Hemmung der Infiltration. Beim zweireihigen Ernteverfahren werden 80 bis 100 % der Fläche befahren, weshalb bei diesem Verfahren praktisch keine unbefahrenen Bereiche zwischen den Spuren entstehen. Beim sechsreihigen Ernteverfahren bleiben dagegen 30 bis 60 % der Parzellenfläche unbefahren, nämlich die Fläche zwischen den Rädern (Weisskopf *et al.* 1997). Die Werte

der Farbstoffinfiltration zwischen den Spuren zeigen keine signifikante Abweichung von der unbefahrenen Kontrolle. Verfahren, bei denen nicht die gesamte Fläche befahren wird, besitzen also den Vorteil einer besseren Wasserinfiltration. Inwieweit sich dies auf die Gefügeregeneration auswirkt, ist offen.

Auf dem Standort C (Lehm) führten die Befahrungen zu einer wesentlich stärkeren Verminderung der Infiltration als auf dem Standort B (toniger Lehm). Dies lässt sich neben der unterschiedlichen Körnung und Strukturierung dieses Bodens auf die grosse Verminderung des Grobporenvolumens (hohe Ausgangswerte, Abb. 3) zurückführen.

Wichtige Fragen bleiben offen

Die befürchteten Unterbodenverdichtungen blieben weitgehend aus. Einzig bei sehr hoher Bodenfeuchtigkeit oder strukturell verdichtungsempfindlichen Unterböden zeigten sich Anzeichen von Verdichtungswirkungen. Es lässt sich also die Folgerung ziehen, dass die Unterböden die einwirkenden Drücke in den meisten Fällen im elastischen Bereich «abfedern» konnten, ohne wesentliche Veränderungen zu erfahren. Lebert (1989) hat umfangreiche Untersuchungen zu verschiedenen Stabilitätsparametern von Böden durchgeführt. Modelle wie jenes der DVWK (1995) liefern erste konzeptionelle Ansätze, wie die Beziehung zwischen Druckeinwirkung und Bodenreaktion aussehen könnte. Weitere Forschungsarbeiten sind notwendig, um die Druckausbreitung in unterschiedlich geschichteten Böden, die Tragfähigkeit des Bodengefüges sowie deren Zusammenspiel zu ergründen. Eingangsgrößen wie Kontaktflächen und Druckverteilung innerhalb der Kontaktflächen sind ebenfalls näher zu untersuchen.

Folgerungen für die Praxis

Die geprüften Zuckerrübenvollernter führten auf allen Standorten zu markanten Oberbodenverdichtungen. Für die Druckausbreitung in den Unterböden sind die Radlasten und der Kontaktflächendruck bestimmend. Die eingesetzten grossvolumigen Bereifungen ermöglichten trotz hoher Radlasten weitgehend Unterbodenverdichtungen zu vermeiden. Ausschlaggebend für das Auftreten von Bodenverdichtungen unterhalb der Bearbeitungsschicht sind die jeweiligen Bodenverhält-

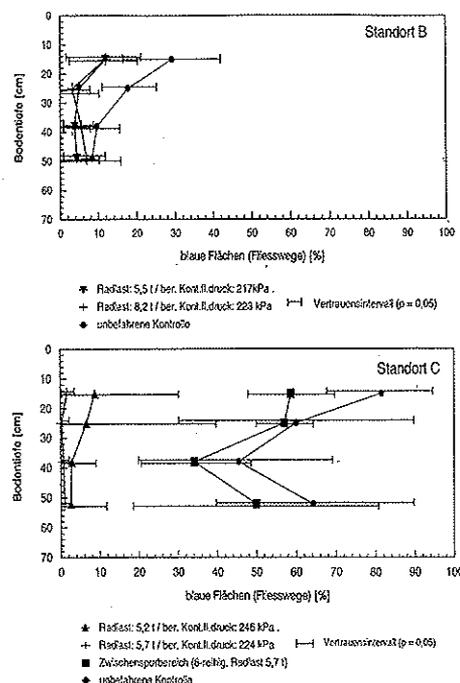


Abb. 4. Blau gefärbte Fläche (%) (Flächenanteil der Fließwege) der Bodenprofile, die nach dem Infiltrieren von blauer Farbstofflösung ausgegraben wurde.

nisse. In bezug auf Gefügeschäden unter der Fahrspur zeigten sich zwischen den geprüften zwei- und sechsreihigen Rüben-ernteverfahren keine wesentlichen Unterschiede. Der beste Schutz vor Bodenverdichtungen sind nach wie vor trockene, tragfähige Böden. Durch die Wahl gross dimensionierter, leicht verformbarer Reifen und tiefer Reifendrucke (Luftdruckregelanlage!) lassen sich negative Auswirkungen bedeutend vermindern.

LITERATUR

DVWK, 1995. Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil 1: Mechanische Belastbarkeit. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Nr. 234. 11 S.

Eidg. Landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1997. Schweizerische Referenzmethoden der Eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten. Band 2: Bodenuntersuchung zur Standort-Charakterisierung.

Eijkelkamp, 1983. The air permeameter for determining the air permeability of undisturbed soil samples. 11 S.

Kramer E., 1988. Traktorreifen - 14 Merkmale zu über 140 Typen. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, FAT-Berichte Nr. 340. 10 S.

Lebert M., 1989. Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. *Bayreuther bodenkundliche Berichte*, Band 12. 131 S.

Niederer U., 1991. Bodendruck im Feld gemessen. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, FAT-Berichte Nr. 400. 5 S.

Söhne W., 1953. Druckverteilung und Bodenverformung unter Schlepperreifen. *Grundlagen der Landtechnik*. Heft 5, 49-63.

Weisskopf P., Zühlmann U., Diserens E. und Anken T., 1997. Zuckerrübenvollernter und Bodenverdichtungen - Nicht nur eine Frage des Maschinengewichtes. *Schweizer Landtechnik* 10, 16 - 20.

RÉSUMÉ

La portance du sous-sol est-elle plus importante qu'on ne pouvait le supposer?

Les effets de lourdes charges à la roue sur la structure du sol ont été examinés par la FAT en collaboration avec la FAL. Les essais ont été effectués à l'exemple de la récolte des betteraves sucrières. Le poids total du matériel engagé atteignait presque 30 tonnes. La propagation de la pression a pu être mesurée jusqu'à une profondeur de 60 cm moyennant des sondes Bolling. La pression diminuait plus fortement dans la couche arable que dans le sous-sol. Dans les couches supérieures du sol, la diminution de la pression était nettement plus prononcée qu'on ne pouvait le supposer selon les simulations usuelles. Des effets de compactage du sol, mesurés comme modification du taux des pores grossiers, ont pu être démontrés dans la couche arable (15 cm), dans certains cas jusqu'à une profondeur de 40 cm, mais jamais à une profondeur de 60 cm. Puisque les machines lourdes étaient équipées de pneumatiques volumineux, il n'existait pas de corrélation directe entre la charge à la roue et le compactage provoqué dans le sous-sol. L'importance des effets de compactage dépendait essentiellement des conditions du sol (structure, humidité).

SUMMARY

Is the carrying capacity of the subsoil higher than expected?

The impact of heavy wheel loads on soil structure has been examined by the FAT and FAL. The investigation was carried out by the example of sugar beet harvesting. The total weight of the material being used was nearly 30 tons. Bolling gauges allowed the propagation of pressure to be measured up to a depth of 60 cm. Pressure decreased more strongly in the top soil than in the subsoil. In the uppermost layers of the soil the drop of pressure was clearly bigger than it was expected to be according to the usual simulations. Soil compaction, measured as a change in the macro pore rate, could be detected in the top soil (15 cm), in some cases up to a depth of 40 cm, but never at a depth of 60 cm. The heavy machines being fitted with large volume tyres, the wheel load did not directly correlate with the compaction occurring in the subsoil. Soil compaction mainly depended on soil conditions (structure, humidity).

KEY WORDS: subsoil, sugar beet, wheel load, soil structure, pressure in the soil, soil compaction