

Ursachen und Folgen von Bodenverdichtungen sowie Möglichkeiten zu ihrer Verminderung

Von Claus Sommer, Völknerode*)

Ausgehend von den Definitionen für die Begriffe Bodenbelastung, Beanspruchung des Bodens und Bodenverdichtung werden die wesentlichen Aussagen aus der Literatur zu diesen Größen diskutiert und zusammengefaßt. Dargestellt wird, daß die Folge einer Bodenbelastung (Radlast, Kontaktflächendruck) der Bodendruck (darzustellen als sogenannte Druckzwiebel) ist und dieser wiederum die Ursache für Bodenverdichtungen (Zunahme der Bodendichte, Abnahme des Porenvolumens) ist. Können die Auswirkungen von Bodendruck auf das Bodengefüge im bodenphysikalischen Sinne als recht gut erforscht gelten, so bedarf es noch erheblicher Anstrengungen, um die kausalen Zusammenhänge zwischen Bodenverdichtung und den Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum und den Ertrag zu klären. Bekannte Möglichkeiten und neue Ansätze zur Verminderung von Bodenverdichtungen werden in der Änderung von Arbeitsverfahren, in der Veränderung von Fahrzeugparametern sowie in der Erhöhung der Bodentragfähigkeit (Befahrbarkeit) gesehen. Letztere ist ein wesentlicher Aspekt der konservierenden Bodenbearbeitung.

Starting with the definitions of soil load, soil stress and soil compaction, the main statements from publications about these definitions are discussed and summarized. It is shown that the effect of soil load (wheel load, load on the contact areas) is soil pressure (presented as so-called „pressure onions“) and this again is the cause of soil compaction (increased soil density, reduced volume of pores).

Though the effects of soil pressure on soil structure, in a soil-physical sense, can be regarded as having been largely researched, considerable efforts are required to explain the causal relationships between soil compaction and its effect on plant growth and yield. Already known possibilities and new approaches for reducing soil compaction are changed operating procedures, changed vehicle parameters and an increased soil carrying capacity. The last is a main aspect of conservation tillage.

Moderne Landtechnik in der pflanzlichen Produktion bedeutet leistungsstarke Ackerschlepper sowie Maschinen und Geräte mit hohem zulässigen Gesamtgewicht. Eine zentrale Stellung nimmt der Ackerschlepper im landwirtschaftlichen Betrieb ein. Seine hohe Schlagkraft läßt die Arbeitserdigung bei optimalem Bodenzustand zu und erlaubt den Einsatz von Geräten größerer Arbeitsbreite. Er ermöglicht das Zusammenlegen von Arbeitsgängen und versetzt den Landwirt in die Lage, auch „schwere Böden“ zu bearbeiten. Andererseits lassen kW-Zahl, Flächenleistung und Ladegewicht den Boden, sein Gefüge und seinen Zustand manchmal in den Hintergrund rücken. Diese Einschätzung und die Tatsache, daß in letzter Zeit der Landwirt an der Beantwortung der Frage: Sind Breitreifen ihren Preis wert? [6] stark interessiert ist, gaben den Anstoß für diesen Übersichtsbeitrag.

Hinzu kommt, daß in jüngster Zeit Arbeiten zu Bodenschutzkonzeptionen, wie sie die Bundesregierung verabschiedet hat und parallel dazu auch die Länder planen, die Diskussionen innerhalb und außerhalb der Landwirtschaft angeregt haben. Zwar wird dabei sehr deutlich, daß Bodenschutz umfassend wahrgenommen werden soll. Häufig steht jedoch außer Frage, daß Maßnahmen der Landbewirtschaftung im Vordergrund des Interesses stehen. Neben den möglichen Belastungen des Bodens durch die organi-

sche und mineralische Düngung, den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und artenarmen Fruchtfolgen wird die Intensität der Bodenbearbeitung kritisch betrachtet, weil sie Bodenerosionen durch Wind oder Wasser fördern und das Ausmaß von Bodenverdichtungen verstärken kann.

Zur Begriffsbestimmung

Sollen die Ursachen und Folgen von Bodenverdichtungen einer Analyse unterzogen werden und daraus die Möglichkeiten für eine vorbeugende Verminderung solcher Änderungen des Bodengefüges abgesteckt werden, so ist zunächst zwischen der (mechanischen) Belastung und der Beanspruchung des Bodens zu unterscheiden [8]. In Abbildung 1 sind diese Größen für je einen Anwendungsfall aus der technischen Mechanik und der landtechnischen Bodenmechanik gegenübergestellt.

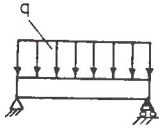
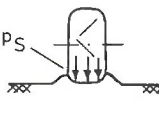
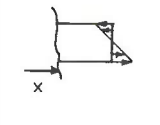
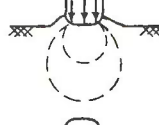
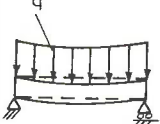

Analog der Belastung eines Biegebalkens mit Hilfe einer Streckenlast q , der daraus resultierenden Beanspruchung und der sich ergebenden Verformung ist es für den Fall des Befahrens eines Bodens sinnvoll – um Mißverständnissen vorzubeugen auch notwendig –, folgende Größen getrennt zu betrachten:

- **Kontaktflächendruck p_K** in der Berührungsfläche Reifen/Boden (ist die Belastung des Bodens als Folge der Radlast dividiert durch die Aufstandsfläche des Rades)
- **Bodendruck p_B** in dem Dreiphasensystem Boden zum Zeitpunkt des Befahrens (ist die Beanspruchung des Bodens in Form einer Spannungsverteilung beziehungsweise eines Spannungsabbaus mit zunehmender Bodentiefe)
- **Bodenverdichtung** ist die Folge eines Bodendruckes p_B (entspricht der Verformung des Bodens, gemessen als Differenz der Bodendichte vor und nach der Belastung).

Im folgenden werden der Kontaktflächendruck, der Bodendruck und die Bodenverdichtung definiert, Ursachen und Folgen mit einigen Beispielen belegt, wesentliche Aussagen zusammengefaßt sowie daraus Möglichkeiten zur Verminderung von Bodenverdichtungen abgeleitet.

Belastung des Bodens

Die genannten Vorteile des Schleppers haben dazu geführt, daß sich der Schlepperbesatz je 100 ha LF seit 1960 fast verdoppelt hat [21]. Waren es im statistischen Mittel 1960 noch 6,2 Schlepper/100 ha, so war dieser Wert

Größe	Technische Mechanik	Landtechnische Bodenmechanik
Belastung	 Streckenlast q auf Biegebalken	 Kontaktflächendruck p_s während des Befahrens
Beanspruchung	 Spannungsverteilung im Balkenquerschnitt x	 Spannungsverteilung im Boden (Bodendruck p_B)
Verformung	 Durchbiegung	 Dichte des Bodens vor und nach dem Befahren
Auswirkungen auf	Tragfähigkeit des Balkens Bruch	Bodentragfähigkeit Befahrbarkeit Pflanzenwachstum und Ertrag

*) Dr.-Ing. Claus Sommer leitet das Arbeitsgebiet „Bodenbearbeitung“ am Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (Leiter: Prof. Dr. M. Dambroth). Er ist zugleich Vorsitzender der Arbeitsgruppe „Bodenbearbeitung und Bestelltechnik“ in der KTBL-Arbeitsgemeinschaft „Technik in der Pflanzenproduktion“.

Abb. 1: Belastung, Beanspruchung, Verformung und Auswirkungen auf die Tragfähigkeit für je ein Beispiel aus der technischen Mechanik und der landtechnischen Bodenmechanik

Re
Re
dr
Au
flä
Kc
flä
n.c
Ab
W
19
ei
hä
sc
stä
Sc
Mi
ist
ab
Tal
na
Jaf
198
198
Eil
ge
da
M
D
Ge
rei
Ge
Be
eir
Au
mi
Fa
Au
1.
2.
3.
4.
10.
10³
1004
Ra
Au
Ko
dru
Ab
Ra
dru

Normal- bereifung 18.4-R-38	Zwillings- bereifung 18.4-R-38	Trelleborg TWIN 650160-38	Terra-Reifen 66x43.00-25
-----------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------	-----------------------------



Radlast	[kN]	26	2 x 13	26	26
Reifeninnen- druck	[kPa]	120	80	80	40
Aufstands- fläche	[m ²]	0.15	0.31	0.30	0.83
Kontakt- flächendruck	[N·m ⁻²]	1.73·10 ⁵	0.84·10 ⁵	0.87·10 ⁵	0.31·10 ⁵

n.C.W.Waydelin

1 kN ≙ 100 kp
100 kPa ≙ 1 bar
10⁵ N·m⁻² ≙ 1 bar

Abb. 2: Reifenaufstandsflächen und Kontaktflächendruck bei gleicher Radlast nach C.W. WAYDELIN zitiert in [7]

1982 auf 11,7 Schlepper/100 ha gestiegen. Im selben Zeitraum hat sich die eingesetzte Motorleistung je 100 ha LF etwa vervierfacht. Zahlenangaben hängen von der Betriebsgrößenstruktur ab: Für den gesamten landwirtschaftlichen Bereich in der Bundesrepublik Deutschland waren es 1982 im statistischen Mittel 370 kW je 100 ha LF, für fünfzehn größere Betriebe in Schleswig-Holstein lautet die entsprechende Angabe: 150 kW je 100 ha LF. Mit der Leistungssteigerung der Schlepper in den vergangenen 20 Jahren ist auch deren Masse angestiegen, obgleich die leistungsbezogene Masse abgenommen hat (Tab. 1).

Tab. 1: Leistung, Gewicht und Leistungsgewicht von Schleppern in den Jahren 1956 und 1980 nach [2]

Jahr	Schlepperleistung kW	Schleppermasse t	Leistungsbezogene Masse kg/kW
1956	15	1,4	95
1980	30	2,2	72
	48	3,3	69
	60	4,1	69
	90	5,8	64

Einer Auswertung von 500 Standardausführungen von Lade- und Tankwagen, Kippern und Anhängern sowie Mähreschern [1] ist zu entnehmen, daß die Bandbreite zulässiger Fahrzeugmassen erheblich ist: etwa für Mährescher von 5 t bis 18 t, für Tankwagen sogar bis 23 t.

Durch die Leistungssteigerung bei den Schleppern und die höheren Gesamtmassen von Fahrzeugen wird der Boden im Bereich der Fahrspuren erheblich belastet. Aus den in der Praxis gebräuchlichen Schlepper-Geräte-Kombinationen sowie selbstfahrenden Maschinen werden in [8] Belastungskenngrößen abgeleitet, die die Gesamtbelastung für den Anbau einzelner Kulturarten und ganzer Fruchtfolgen ermitteln lassen.

Aus der Höhe der Radlast und der Größe der Aufstandsfläche ergibt sich der mittlere Kontaktflächendruck p_K ($N \cdot m^{-2}$, kPa, $1 N \cdot m^{-2} = 1 Pa$) in der Fahrspur. Für den Kontaktflächendruck sind zusammengefaßt folgende Aussagen von wesentlicher Bedeutung.

1. Betrag und Richtung des Druckes p_K hängen von einer Reihe von Fahrzeugparametern (neben Radlast und Aufstandsfläche sind dies: Reifeninnendruck, Reifenbauart, Schlupf, Fahrgeschwindigkeit und Schwingungen) ab. Beispiele für die Änderung von p_K bei gleicher Radlast zeigt Abbildung 2.
2. Der Kontaktflächendruck p_K kann nach einer Faustformel (1) bei gegebenem Reifeninnendruck p_i (kPa) abgeschätzt werden:
$$p_K = p_i + 40 \text{ [kPa]}$$
3. Der exakte Verlauf von p_K unter der Radachse quer zur Spur wird auch von der Bodenfeuchte beeinflusst.
4. Der Kontaktflächendruck p_K bestimmt in Abhängigkeit von Bodenparametern die Tiefe der Spur.

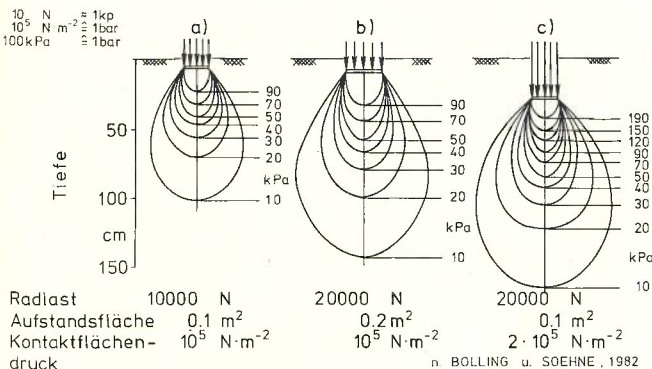


Abb. 3: Linien gleichen Bodendruckes in drei Fahrspuren nach [2]. Durch Vorgabe von Radlast und Berührungsfläche entsteht in den Beispielen a) und b) gleicher Kontaktflächendruck, im Beispiel c) ein doppelt so hoher Wert.

Beanspruchung des Bodens

Die Folge des aufgetragenen Kontaktflächendruckes p_s sind im Boden darunter mechanische Spannungen – der „Bodendruck“ p_B (kPa), dessen Verlauf mit den Linien gleichen Bodendruckes (sogenannte Druckzwiebeln) anzugeben ist (Abb. 2).

SÖHNE hat grundlegende Arbeiten auf dem Gebiet der landtechnischen Bodenmechanik veröffentlicht [12, 13, 14], so auch die Spannungen im Boden für den landwirtschaftlichen Anwendungsfall berechnet und interpretiert. Die Berechnung gelang durch Integration der Grundgleichungen von BOUSSINESQ für den elastisch-isotropen Halbraum „Boden“.

Für die in Abbildung 2 betrachteten einfachsten Beispiele einer senkrechten Radlast – die Berücksichtigung einer Zugkraft hätte Druckzwiebeln zur Folge, die zur Fahrgeschwindigkeit schräg nach hinten verliefen – sind folgende wesentlichen Aussagen abzuleiten:

1. Der Bodendruck p_B wird mit steigender Tiefe abgebaut – von immer mehr Bodenpartikeln „mitgetragen“: im Beispiel a) ist der Kontaktflächendruck von $10^5 N \cdot m^{-2}$ (100 kPa) in der Tiefe von 100 cm auf 10 kPa abgesunken.
2. Gleicher Kontaktflächendruck p_K hat unabhängig von der absoluten Radlast etwa gleiche Spurtiefen zur Folge: Beispiele a) und b) unterscheiden sich in der Größe der Aufstandsflächen und der Radlasten, nicht jedoch hinsichtlich des Kontaktflächendruckes.
3. Der Vergleich der Beispiele a) und b) zeigt ferner, daß bei gleichem Kontaktflächendruck p_K die größere Radlast von 20 000 N ($10 N \hat{=} 1 kp$) die Linien gleichen Bodendruckes stärker in die Tiefe treibt: im Falle b) ist der Druck erst in 150 cm Tiefe auf 10 kPa abgefallen. Das bedeutet: Für die Tiefenwirkung des Bodendruckes ist bei gleichem Kontaktflächendruck die Radlast maßgebend. Schwere Schlepper, vor allem wenn sie beim Pflügen in der Furche fahren, beanspruchen den Boden bis in größere Tiefen.
4. Bei gleicher Radlast ist für das Ausmaß des Bodendruckes in der Ackerkrume (bis 30–35 cm Tiefe) der Kontaktflächendruck p_K ausschlaggebend: Beispiele b) und c) unterscheiden sich nicht bezüglich der Radlast, jedoch in der Größe der Aufstandsfläche und dementsprechend auch im Hinblick auf p_K . Das bedeutet: Wird ein Rad bei gleicher Radlast von einem schmalen Reifen (Fall c)) auf einen breiteren Reifen (Fall b)) umgerüstet, so hat dies – unter Berücksichtigung eventuell unterschiedlicher Spurtiefen – weniger Auswirkungen auf die Tiefenwirkung zur Folge als vielmehr auf die Minderung des Bodendruckes in der Ackerkrume oder knapp darunter.

Solche berechneten Linien gleichen Bodendruckes, wie sie beispielhaft anhand der Abbildung 3 diskutiert wurden, geben grundsätzliche Sachverhalte anschaulich wieder. Mit kostengünstigen Bodendrucksonden nach [1] sind Bodendrucke – und nicht etwa Bodenverdichtungen – heute auch meßtechnisch zu erfassen.

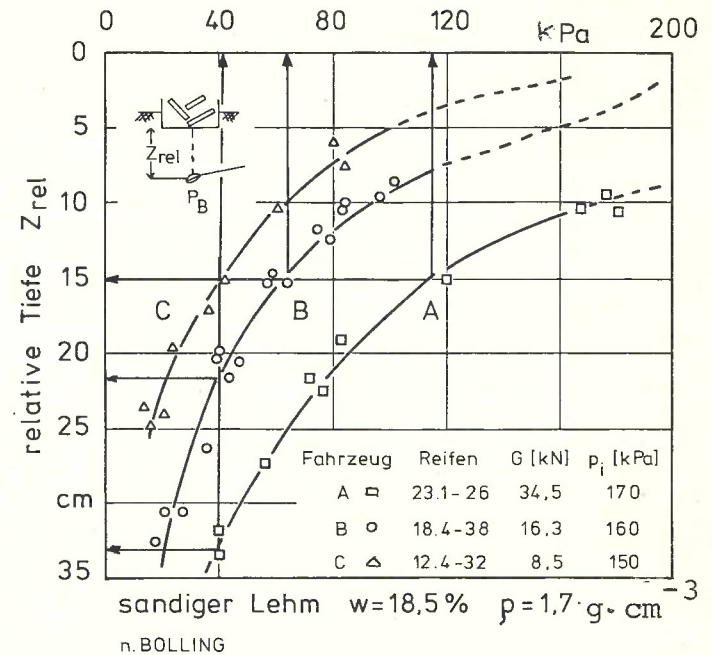


Abb. 4: Bodendruck als Funktion der relativen Tiefe für einen Mährescher A, einen 92 kW-Schlepper B und einen 26 kW-Schlepper C nach [1]

In Abbildung 4 ist der Druck p_B unterhalb der Radachse in Abhängigkeit von der Tiefe ab der Spurwanne z_{rel} für drei Fahrzeuge aufgetragen. Für die betrachteten Fahrzeuge ergibt sich unter den Versuchsbedingungen etwa in der Tiefe $z_{rel} = 15$ cm für die Belastung durch den Mährescher

(G = 34,5 t) ein maximaler Bodendruck von 120 kPa, für den 92 kW-Schlepper (G = 16,3 t) von 70 kPa und für den 26 kW-Schlepper (G = 8,5 t) von 40 kPa. Ein maximaler Bodendruck etwa von $p_B = 40$ kPa wurde während des Befahrens durch den leichteren Schlepper C in 15 cm Tiefe, für den schwereren Schlepper B in 22 cm Tiefe und für den Mährescher A in 33 cm Tiefe gemessen. Damit sind einige grundsätzliche Schlußfolgerungen aus berechneten Linien gleichen Bodendrucks durch Messungen zu bestätigen.

Quantitative Angaben für den Bodendruck – und so auch die genannten Zahlenwerte – hängen nicht nur von der Art und Höhe der Belastung und von Fahrwerksparametern ab, sondern sind auch eine Funktion des befahrenen Bodens (Bodenart, Bodengefüge, Bodendichte, Bodenfeuchte, Verdichtungsempfindlichkeit). So nehmen die Druckwiebeln bei höherer Bodenfeuchte schlanke Form an und reichen dann weiter in die Tiefe als unter trockenen Bedingungen.

Verdichtung des Bodens

Definitionen

Der Boden ist ein Dreiphasensystem: Bodenfestsubstanz, Bodenwasser und Bodenluft füllen das Gesamtvolumen V_g einer Bodenprobe (Abb. 5, links).

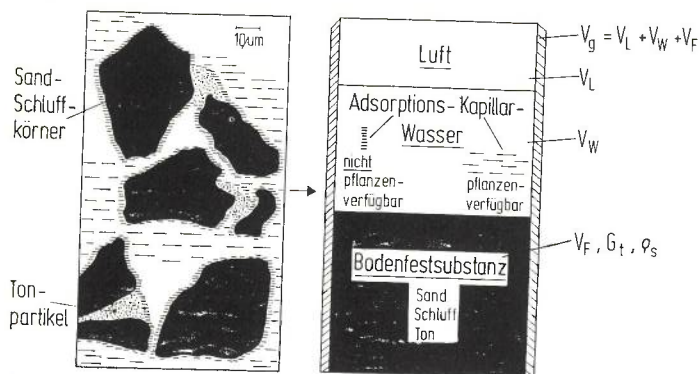


Abb. 5: Das Dreiphasensystem Boden

Die Folge von Bodendruck ist die Zunahme der Bodendichte ρ_t ($g \cdot cm^{-3}$). Letztere ist definiert als das Verhältnis der Masse¹⁾ des trockenen Bodens G_t (g) zum Gesamtvolumen V_g (cm^3) der Bodenprobe. Gedanklich und rechnerisch können die drei Phasen zerlegt und wie in Abbildung 5, rechts, übereinander gezeichnet werden. Die Summe aller luft- und wasserführenden Poren (Hohlräume im Boden) bezogen auf das Gesamtvolumen der Probe ist das Porenvolumen n (%) – ein in der Bodenkunde gebräuchlicher Kennwert zur Feststellung von Bodenverdichtungen. Machten der Luft- plus Wasseranteil mehr als 50 % des Gesamtvolumens aus, gilt der Boden als locker; weniger als 40 % weisen den Boden als dicht aus. Das Porenvolumen n wird demnach mit höherer Dichte ρ_t niedriger. Weniger gebräuchlich, zur bodenphysikalischen Ansprache von Bodenverdichtungen jedoch besonders geeignet, weil bei ihr das Volumen der luft- und wasserführenden Poren auf das – durch Verdichtung unbeeinflusste – Volumen der Bodenfestsubstanz V_F bezogen wird, ist die Porenziffer e ($cm^3 \cdot cm^{-3}$). Weitere Kenngrößen sind der Scherwiderstand und der Penetrometerwiderstand. Letzterer ist der Widerstand, den der Boden einer eindringenden Metallspitze entgegensetzt. Er geht konform mit der Bodendichte: Er steigt mit zunehmender Dichte, ist jedoch auch von der Bodenfeuchte abhängig. Die Definitionen und die möglichen Umrechnungen der genannten Kenngrößen sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

Tab. 2: Definitionen, Dimensionen und Umrechnungen bodenphysikalischer Kenngrößen

Kenngröße	Dimension	Definition	Umrechnung
Dichte des trockenen Bodens, Trockenraumgewicht	$g \cdot cm^{-3}$	$\rho_t = \frac{G_t}{V_g}$	–
Porenvolumen, Porenanteil	%	$n = \frac{V_w + V_L}{V_g} \cdot 100$	$n = (1 - \frac{\rho_t \cdot 100}{s})$
Porenziffer rel. Porosität	$cm^3 \cdot cm^{-3}$	$e = \frac{V_w + V_L}{V_F}$	$e = \frac{n}{100 - n}$
Penetrometerwiderstand	kPa	Kraft Kegelfläche	–

¹⁾ Masse des trockenen Bodens

Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf das Bodengefüge

Die Verdichtungsempfindlichkeit [16] hängt unter anderem ab von:

- der Bodenart
Tonböden reagieren empfindlicher gegenüber Bodendruck, jedoch kann ein Sandboden ebenfalls stark zusammensacken;
- der Bodenfeuchte
Feuchter Boden ist bekanntermaßen empfindlicher als trockener Boden, nasser Boden fließt beim Befahren;
- der Bodendichte
Je lockerer ein Boden während des Befahrens ist, um so empfindlicher reagiert er (Abb. 6).

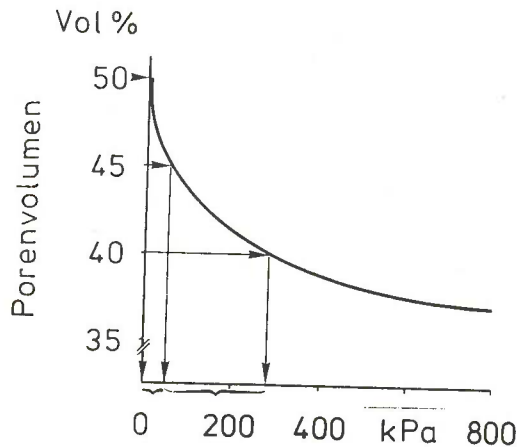


Abb. 6: Die Verdichtungskurve eines Bodens nach [15]

100 kPa $\hat{=}$ 1 bar

Die Verdichtungskurve nach Abbildung 6 stellt den Zusammenhang zwischen Porenvolumen (Bodendichte oder Porenziffer) und Bodendruck dar. Sie ist von der Form einer fallenden Exponentialfunktion, also bei gleichem Bodendruck ist die Wirkung umso größer je lockerer der Boden war. Diese in der Praxis bekannte Tatsache, mit Zahlenangaben aus dem Beispiel der Abbildung 6 verdeutlicht, ergibt: um den Boden von $n_1 = 50$ % auf das Porenvolumen $n_2 = 45$ % zu verdichten, bedarf es eines Bodendruckes von $p = 50$ kPa; ihn um weitere 5 % zu verdichten, dafür ist schon ein $\Delta p = 200$ kPa notwendig – für die gleiche Verdichtung ein viermal höherer Bodendruck.

Besonders gefährdet sind die groben Poren (Äquivalentporendurchmesser $> 30 \cdot 10^{-3}$ mm, häufig auch Luftkapazität genannt). Sie brechen beim

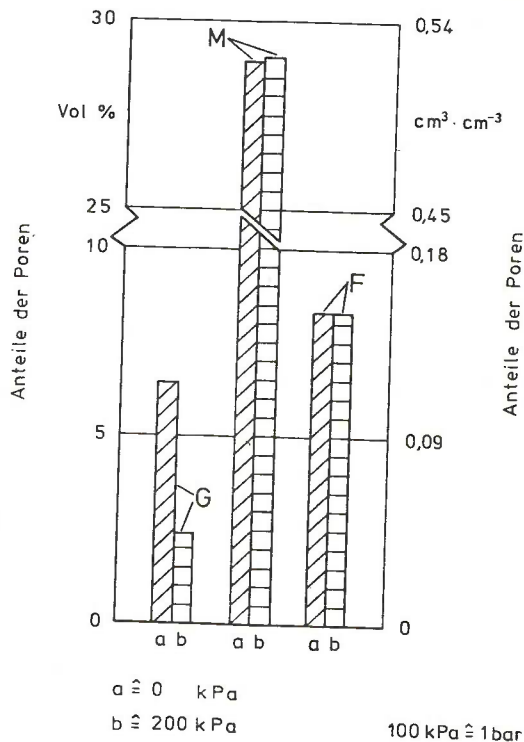


Abb. 7: Änderung der Porengrößenverteilung infolge eines Bodendrucks von 200 kPa nach SOMMER (15)

G: Grobporen
M: Mittelporen
F: Feinporen

a: p = 0 kPa
b: p = 200 kPa

Befahren des Bodens schnell zusammen, wonach sein Gashaushalt gestört ist. In Abbildung 7 ist ein Beispiel für Proben in natürlicher Lagerung eines lehmigen Schluffbodens dargestellt. Bei einem Ausgangsporenvolumen von $n = 43,8\%$ betrug die Luftkapazität $6,5\%$. Infolge eines Bodendruckes von $p_B = 200\text{ kPa}$ sank dieser Wert auf $2,4\%$. Die Mittelporen ($30 \cdot 10^{-3}$ bis $0,2 \cdot 10^{-3}\text{ mm}$) nahmen dabei kaum zu und der Anteil der Feinporen ($< 0,2 \cdot 10^{-3}\text{ mm}$) veränderte sich gar nicht.

In Feldversuchen mit verschiedenen Ackerschlepper-Triebreifen wurden bei einer Radlast von 1000 daN und dem Wassergehalt eines sandig-schluffigen Lehmbodens von $20\text{ Gew}\%$ das Porenvolumen in der Fahrspur von etwa 47 bis 51% auf 41 bis 43% vermindert [17]. Ein Beispiel für die Abnahme des Porenvolumens und der Luftkapazität mit der Tiefe infolge mehrmaligen Befahrens (Multi-pass) eines Lehmbodens mit einem Kettenfahrzeug ($G_g = 40\text{ t}$, $p_K = 1,5 \cdot 10^5\text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$) zeigt Tabelle 3.

Tab. 3: Mittelwerte für Porenvolumen und Luftkapazität vor und nach dem Befahren mit einem Kettenfahrzeug nach [18]

Meßgröße	Tiefe (cm)	unbefahren	Befahren	
			zweimal	sechsmal
Porenvolumen (in %)	30 bis 35	39,1	37,2	37,7
	40 bis 45	44,9	42,9	40,4
	60 bis 65	43,0	42,3	41,4
Luftkapazität (in %)	30 bis 35	5,0	4,2	5,5
	40 bis 45	10,6	7,5	6,0
	60 bis 65	8,2	6,3	7,8

In der Tiefe 30 bis 35 cm lag eine Schlepperradsole vor, hervorgerufen durch jahrelanges Fahren mit dem Schlepper in der Furche. Obgleich das Porenvolumen dadurch nur $39,1\%$ betrug, traten durch zweimaliges beziehungsweise sechsmaliges Befahren mit dem schweren Fahrzeug zusätzliche Verdichtungen ein, die statistisch gut bis sehr gut zu sichern waren. In der Tiefe 40 bis 45 cm sind durch das Befahren die stärksten Verdichtungen entstanden, in der Tiefe 60 bis 65 cm waren die Differenzen zwischen „unbefahren“ und „befahren“ statistisch nicht mehr gesichert. Sind Mährescher und Tankwagen wegen ihrer größeren Gesamtmassen und höheren Reifeninnendrucke insbesondere unter feuchten Bodenbedingungen kritischer zu beurteilen als Ackerschlepper ($p_i = 100\text{ kPa}$), so haben doch bei jahrelangem Pflügen deren Furchräder Unterbodenverdichtungen hervorgerufen. Diese bedürfen schon deshalb besonderer Aufmerksamkeit, weil sie unterhalb der alljährlichen Bearbeitungsgrenze liegen. Messungen weisen Schlepperradsohlen auf zahlreichen Standorten nach [9]. Faßt man diese und andere Ergebnisse bewertend zusammen [19], so zeigt sich folgende Tendenz (Abb. 8):

- In der Zeitspanne von 30 Jahren hat eine Krümmenvertiefung von etwa 10 cm stattgefunden;
- In der Krüme hat das Porenvolumen wegen des geringeren Spuranteils infolge größerer Arbeitsbreiten zugenommen (+ Bereich in Abb. 8);
- Unterhalb der Bearbeitungsgrenze hat das Porenvolumen wegen höherer Radlasten abgenommen (- Bereich in Abb. 8) und erreicht häufig kritische Werte.

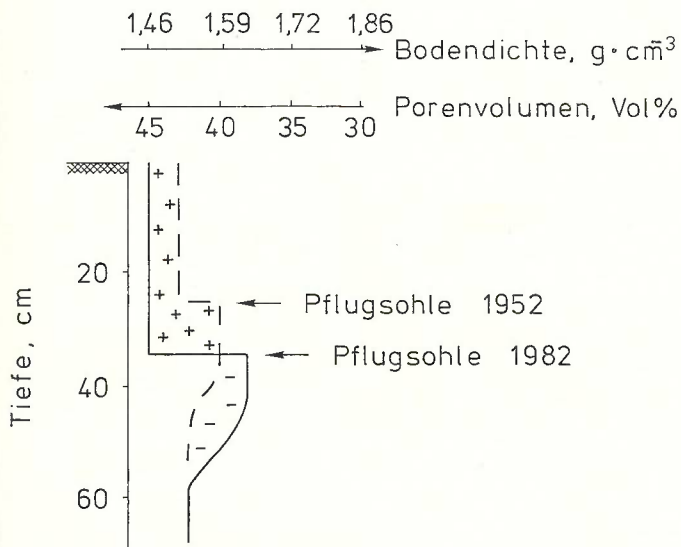


Abb. 8: Bodendichte beziehungsweise Porenvolumen in Ackerkrume und Unterboden: ein Vergleich zwischen 1952 und 1982 nach [9]

Auch wenn Zahlenangaben nur für die jeweiligen Versuchsbedingungen gelten, so sind doch folgende zusammenfassende Schlußfolgerungen zu ziehen:

1. Werte für das Porenvolumen liegen im Falle von Ackerböden – von Ausnahmen abgesehen – etwa zwischen 40 und 50% , für die Luftkapazität zwischen 5 und maximal 18% . Extrem verdichtete Böden weisen Porenvolumina zwischen 36 und 40% auf, die Luftkapazität sinkt dann unter 5% .
2. Je tragfähiger (trockener, dichter) der Boden ist, umso geringer sind die Folgen einer Druckbeanspruchung. Unter mäßig feuchten Bedingungen (Bodenfeuchte \ll Feldkapazität) klingt die Tiefenwirkung meist an der Bearbeitungsgrenze ab. Unter feuchten Bedingungen (Bodenfeuchte \geq Feldkapazität) sind Bodenverdichtungen nach dem Befahren mit hohen bis extrem hohen Radlasten bis in eine – standortspezifisch – maximale Tiefe von 60 bis 65 cm statistisch abgesichert worden.
3. Verdichtungen unterhalb der Bearbeitungstiefe (Schlepperradsohlen) haben in den vergangenen 30 Jahren – standortspezifisch – infolge des Fahrens in der Furche beim Pflügen zugenommen. Solche Unterbodenverdichtungen sind mit besonders kritischer Aufmerksamkeit zu verfolgen.
4. Gelockerte oder tiefgelockerte Böden reagieren empfindlich auf das Wiederbefahren.

Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf das Pflanzenwachstum

Können die Auswirkungen von Bodendruck auf das Bodengefüge im bodenphysikalischen Sinne als recht gut erforscht gelten [4], so bedarf es noch erheblicher Forschungsarbeiten, um die kausalen Zusammenhänge zwischen der Belastung des Bodens einerseits und den Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum andererseits zu klären. Denn tatsächlich ist die eigentlich wichtige Frage: Wie steht es um die Folgen von Verdichtungen auf die nachhaltige Ertragsfähigkeit eines befahrenen Bodens?

Dieser Kernfrage nehmen sich weltweit eine Reihe von Forschergruppen an. Literaturhinweise finden sich in [10, 11, 15, 18]. Die Untersuchungen unter verschiedenen klimatischen Bedingungen haben zum Ziel, die Beziehungen zwischen Bodenverdichtungen und dem Ertrag zu klären. Über die Fortschritte, die bei der Bearbeitung des Problems „Bodenverdichtung“ aus landwirtschaftlicher Sicht insgesamt erzielt wurden, berichtet seit 1980 die Zeitschrift „Soil and Tillage Research“.

Ergebnisse aus mehrjährigen Feldversuchen mit schweren Kettenfahrzeugen ($G = 40\text{ t}$, $p_K = 1,5 \cdot 10^5\text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$) auf zwei Standorten und der Fruchtfolge Zuckerrüben, Winterweizen und Wintergerste lassen anhand bodenphysikalischer Messungen und Ertragsfeststellungen zwischen der Direktwirkung – im Jahr nach dem Befahren – und den Nachwirkungen – in den darauffolgenden Jahren – unterscheiden (Tab. 4)

Tab. 4: Mindererträge nach einmaliger starker Bodenverdichtung in einer dreigliedrigen Fruchtfolge; Spurlegung: 1970 bis 1973, Mittelwerte aus zwei Standorten nach [18]

Fruchtart	Durchschnittlicher Minderertrag in den Spuren (%)	
	Direktwirkung	Nachwirkungen Jahre 1 2
Zuckerrübe	11 ¹⁾	3 5
Winterweizen	12	5 2
Wintergerste	26 ²⁾	7 6

1) plus Rübenbeinigheit

2) Spurlegung nach dem Auflaufen der Gerste hatte mechanische Verletzungen zur Folge

Die in Spuren angelegten Bodenverdichtungen hatten meistens Ertragsminderungen zur Folge, im Jahr nach der Spurlegung fast ohne Ausnahme. Im Durchschnitt klangen die Auswirkungen auf die Ernte im dritten Jahr ab. Wenn trotz der Erkenntnisse über negative Auswirkungen von Krümen- und Unterbodenverdichtungen das Problem „Bodenverdichtung“ noch als weitgehend ungelöst anzusehen ist, so ist der Grund dafür in der Schwierigkeit der Ansprache und der Beurteilung von Bodenverdichtungen zu sehen. Das Problem der Ansprache von Verdichtungen ist darin begründet, daß im Feld „unbefahren“ meist nur „nicht wieder neu befahren“ heißt. Ein Ausweg aus dieser Schwierigkeit weist eine Überlegung von [5], die sich auf die sogenannte Erstverdichtungsgerade nach KEZDI stützt.

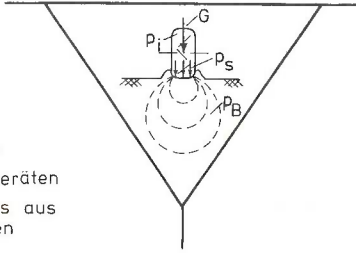
Hinsichtlich der Beurteilung von Bodenverdichtungen sind Ergebnisse wie folgt zusammenzufassen:

1. Sehr starke Verdichtungen (entweder in der Ackerkrume durch hohen Kontaktfächendruck oder/und im Unterboden infolge hoher Fahrzeuggewichte), besonders wenn Druck und Schlupf unter feuchten Bedingungen einwirken, lassen Pflanzenerträge absinken.
2. Die Ergebnisse sind nicht ohne Widersprüche, die sich in Mehr- und Mindererträgen widerspiegeln. Diese sind damit zu erklären, daß im Falle mäßiger Bodenverdichtungen neben negativen auch positive Auswirkungen sich in dem Ertrag ausdrücken. So ist das Problem der „Überlockerung“ dem Landwirt wohl bekannt. Aus der Sicht der Pflanze hat höhere Bodendichte bei hoher Bodenfeuchte – wegen des mangeln-

BODENSCHONUNG DURCH

Änderung der Arbeitsverfahren

- Zusammenlegung von Arbeitsgängen
- Zapfwellenangetriebene Geräte
- 'spurfreie' Arbeitsgänge
- Einsatz von Aufsattelgeräten
- Herausnahme des Rades aus der Furche beim Pflügen



Veränderung von Fahrzeugparametern

- Vergrößerung der Aufstandsfläche (Reifenbauart, Niederquerschnittsreifen, Terra-
reifen, Zwillingssreifen, Gitterräder)
- Reduzierung des Reifeninnendruckes
- Reduzierung der Radlast (weniger Gewicht, mehr Achsen)
- Entwicklung eines Portalschleppers

Erhöhung der Bodentragfähigkeit

- Befahren und Bearbeiten bei trockenem Bodenzustand
- Verringerung der Bodenbearbeitungsintensität

Abb. 9: Möglichkeiten für bodenschonendes Befahren

den Luftgehaltes – Nachteile, bei geringerer Bodenfeuchte – wegen eines höheren Wasserangebotes – Vorteile.

3. Abgesehen von Extremfällen und der Direktwirkung sehr starker Bodenverdichtungen gibt es keine ausreichenden, allgemein gültigen Beweise dafür, daß die nachhaltige Ertragsfähigkeit infolge Bodenverdichtungen bei heutiger Bewirtschaftung schon ernsthaft gefährdet wäre. Jedoch gilt es, solcher Gefahr dort vorzubeugen, wo sie sich – standortspezifisch – heute abzeichnet oder wo ihr nach neuestem Kenntnisstand im Sinne der Vorsorge entgegenzuwirken ist.

Möglichkeiten zur Verminderung von Bodenverdichtungen

Aus den zusammengefaßten Aussagen zur Bodenbelastung, zum Bodendruck und zu den Auswirkungen von Bodenverdichtungen lassen sich bekannte Möglichkeiten und neue Ansätze zur Bodenschonung in drei Richtungen ableiten (Abb. 9):

- Änderung der Arbeitsverfahren
- Veränderung von Fahrzeugparametern
- Erhöhung der Bodentragfähigkeit.

Dem Landwirt sind die Möglichkeiten bekannt, die in Änderungen der Arbeitsverfahren liegen: weniger Spuren durch das Zusammenlegen von Arbeitsgängen, Zugkraftentlastung durch Einsatz zapfwellenangetriebener Geräte, Spurlokerer, die zu „spurfreien“ Arbeitsgängen führen, Aufsattelgeräte, welche die Lastverteilung verbessern sowie die Eliminierung der Schäden durch das Furchenrad beim Pflügen, was technische Probleme aufwirft.

Da für das Ausmaß der Krümmenverdichtungen der Kontaktflächendruck entscheidend ist, sind Niederdruckreifen (Low-ground-pressure-Systeme) von Vorteil. Breitreifen sind im wesentlichen nur zur Flächenbearbeitung einzusetzen und teuer. Die zur Zeit zur Verfügung stehenden Zwillingssreifen sind heute noch flexibler.

Weil Unterbodenverdichtungen die Folgen hoher Radlasten sind, ist daraus die Forderung abzuleiten, Maschinen und Geräte hinsichtlich ihres Gewichtes zu begrenzen.

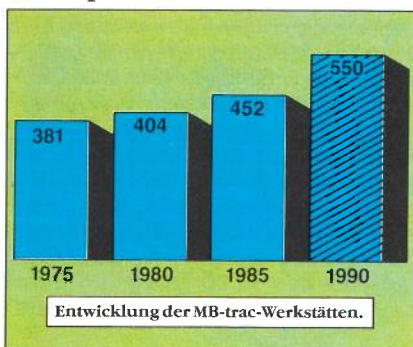
Schon seit vielen Jahren wird an der Entwicklung eines Portalschleppers (Spurweite: 6 bis 12 m) gearbeitet, der in festgelegten Spuren fährt (controlled traffic) und die „Beetkultur“ auch in der Landwirtschaft einführen könnte.

Die grundsätzliche Forderung zur Vermeidung von Bodenverdichtungen fällt unter Erhöhung der Bodentragfähigkeit, den Boden nämlich nur bei tragfähigem (also meist trockenem) Zustand zu befahren. Mit dieser Forderung können sich allerdings aus pflanzenbaulicher Sicht die Möglichkeiten zur Vorbeugung oder Minderung von Bodenverdichtungen nicht erschöpfen. Vielmehr sollten Ansätze intensiver verfolgt werden, die auf der Tatsache basieren, daß die Befahrbarkeit des Bodens nicht nur mit geringerer Bodenfeuchte, sondern ebenso mit höherer Bodendichte besser wird [19].

Hierbei stehen im Zentrum: die Ansprüche der Pflanze an die Bodendichte [3]. In Abbildung 10 sind Ergebnisse für Zuckerrüben von ZACH nach unterschiedlicher, mehrjährig gleicher Bodenbearbeitungsintensität aufgetragen.

MB-trac: Weil unsere Leistungen Zukunft haben.

Durch das technisch überlegene Konzept sind die Mercedes-Benz



MB-trac landauf, landab wohlbekannt und auch in großer Stückzahl im Einsatz. Und das,

obwohl sie noch nicht allzu lange auf dem deutschen Schleppermarkt vertreten sind. Das ist auch der Grund, weshalb Sie in manchen Gegenden ein paar Kilometer bis zur nächsten Werkstatt fahren müssen. Aber dagegen tun wir etwas. Das Service-Netz wird ständig dichter. Doch das allein genügt uns noch nicht. Wir stellen auch sicher, daß der Leistungsstand in allen MB-trac-Werkstätten dem Mercedes-Benz Standard entspricht. Das erreichen wir mit bestens ausgebildetem Personal.

So ist gewährleistet, daß Ihr MB-trac schnell und preisgünstig gewartet wird und daß dadurch die Werterhaltung Ihres MB-trac gesichert bleibt. Wer sich für einen MB-trac entscheidet, bekommt neben modernster Technik und Betreuung auch die Sicherheit der großen Marke. Informieren Sie sich über das breite MB-trac Programm von 48 – 110 kW (65 – 150 PS). Bei unseren Vertriebspartnern oder bei der Daimler-Benz AG, Postfach 1220, 7560 Gaggenau.



Auf allen Feldern gut betreut. Mercedes-Benz.

Der Pflug (P) steht für eine hohe, die nur flach arbeitende Spatenrollegge (S) für eine geringe Bodenbearbeitungsintensität. Bodenphysikalisch unterscheiden sich die P- und S-Parzellen deutlich: der Penetrometerwiderstand ist auf der S-Parzelle wesentlich höher (Abb. 11). Ertrags-einbußen blieben dagegen aus (Abb. 10). Aus solchen Versuchsergebnissen und ersten Untersuchungen unter einer breiten Palette von Praxisbedingungen [20] wird die Schlußfolgerung gezogen, daß Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung, in die Praxis eingeführt, neben anderen Vorteilen auch eine Verbesserung der Bodentragfähigkeit – und damit die Verminderung von Bodenverdichtungen infolge einer fruchtarten- und fruchtfolgespezifischen Verringerung der Bodenbearbeitungsintensität erwarten lassen.

Varianten:
Treatments:
Standort (soil):
lehmiger Sand
(loamy sand)

Konventionelle Bodenbearbeitung (P: Pflug)
Conventional tillage (Plow)
Konservierende Bodenbearbeitung (S: Spatenrollegge)
Conservation tillage (Rotary harrow)
Konservierende Bodenbearbeitung (F: Fräse)
Conservation tillage (Rotary cultivator)

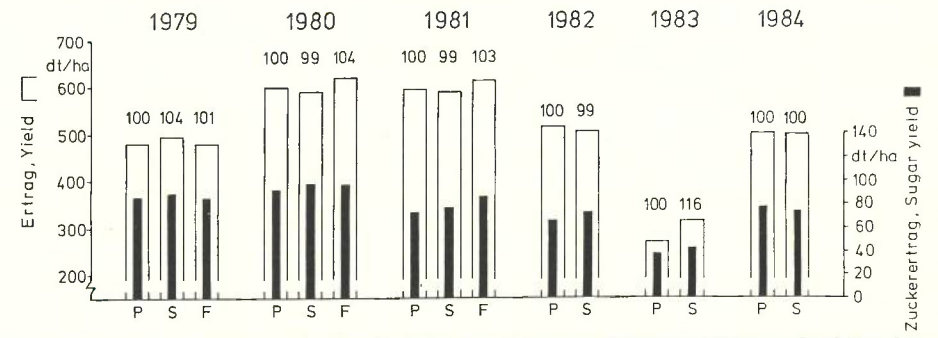


Abb. 10: Erträge von Zuckerrüben nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Versuchsbedingungen: Spurfahren, 3 m Spurweite, lehmiger Sandboden) nach ZACH, zitiert in [20]

Literatur

- Bücher sind mit ● gezeichnet
- [1] Bolling, I.: Bodenverdichtung und Bereifung bei landwirtschaftlichen Fahrzeugen. – Landtechnik 39 (1984), H. 10, S. 449–452
 - [2] Bolling, I. und W. Söhne: Der Bodendruck schwerer Acker-schlepper und Fahrzeuge. – Landtechnik 37 (1982), H. 2, S. 54–57
 - [3] Dambroth, M.: Die Stellung der Bodenbearbeitung in der pflanzlichen Produktion. – Landbauforschung Völkensode 25 (1975), H. 1, S. 11–16
 - [4] Ehlers, W.: Die Bedeutung des Bodengefüges für das Pflanzenwachstum bei moderner Landwirtschaft. – Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 34 (1982), S. 115–127
 - [5] Hartge, K. H. und C. Sommer: Bodenverdichtungen und ihre Beurteilung. – Z. Kulturtechn. u. Flurbereinigung 20 (1979), S. 257–268

Fortsetzung Seite 384

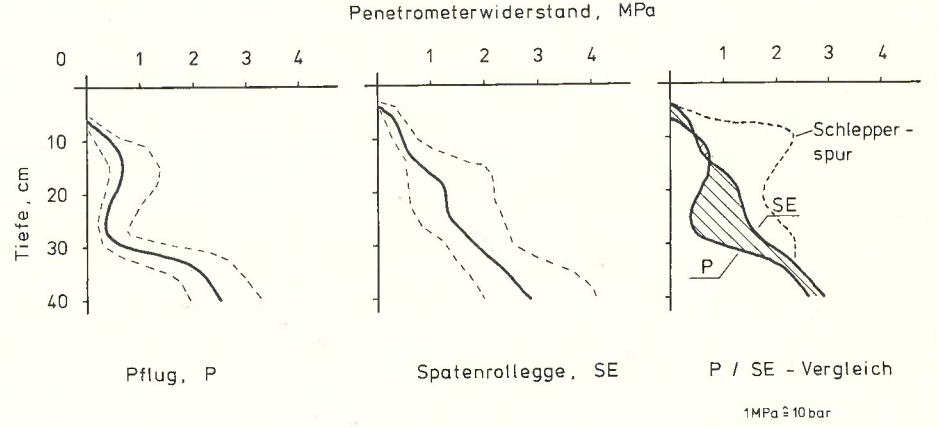


Abb. 11: Penetrometerwiderstand nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Versuchsbedingungen: s. Abb. 10); bei etwa gleicher Bodenfeuchte ist der Penetrometerwiderstand der S-Parzelle ab 15 cm Tiefe höher – der Boden liegt dichter.



Terra-Reifen und Bodendruck

Von Edmund Isensee und Winfried Sonderhoff, Kiel*)

Das Problem der Bodenverdichtung wird zunehmend erkannt. Gleichzeitig wächst das Interesse an technischen Lösungen, sie zu vermeiden. Zu diesen Lösungen gehören die Ausstattung mit geeigneter Bereifung sowie die Anpassung von Arbeitsverfahren. Zwischen dem Bestreben nach Bodenschonung und dem nach hoher Leistung und Zugkraft können Zielkonflikte entstehen.

Die bodenkundlich-ackerbaulichen Zusammenhänge sind auf Seite 378 dargestellt. Nachfolgend wird auf die wesentlichen landtechnischen Einflüsse eingegangen, so die Gesamtmasse, die Auflagefläche und den Kontaktfächendruck, die Belastungsdauer und -häufigkeit und den Schlupf.

The problem of soil compaction is being increasingly recognized and simultaneously, methods of avoiding it are being sought. To these methods belong suitable tyres and the adaptation of operating procedures. There can be conflicting goals in desired soil protection and high performance, high tractive power operations.

The pedological and tillage interrelationships are presented on page 378. In the following the most important and influential technical factors are discussed, i. e. the total load, the bearing surface and the load on it, the period of load endurance and the frequency of load and wheel slippage.

Gesamtmasse

An den Anfang sei die Bedeutung des Gesamtgewichts gestellt. Es ist im Laufe der Jahre mit der Kapazität von Schlepper und Arbeitsmaschine gestiegen. Steigende Radlast dringt in die Tiefe, durchaus unter den Pflughorizont. Als Gegenmaßnahme wirkt die Verbreiterung der Aufstandsfläche nur begrenzt. Das Rad sinkt weniger ein, aber die Vergrößerung der Abstützfläche für die Last nimmt relativ ab (Abb. 1).

Daher mag man einzelne Verfahren kritisch betrachten, ob die Massen notwendig und „tragbar“ sind: die Arbeitsmaschine und der mit ihr verbundene Transport im Bunker- oder Parallelverfahren, der Großraumstreuer oder Güllewagen. Die konkreten arbeitswirtschaftlichen Vorzüge sind mit der Rücksicht auf die Bodenstruktur abzuwägen. Als Anhalt mag für die Fahrzeuge die Achslast von 6 t dienen.

Belastungsdauer und -häufigkeit

Ein kurzfristiger Druck beeinträchtigt das Hohlräumvolumen weniger als ein langanhaltend oder wiederholt auftretender. So verringert sich die Verdichtung auf zwei Drittel, wenn die Geschwindigkeit von 6 auf 10 km/h steigt.

*) Prof. Dr. Edmund Isensee ist am Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik tätig, cand. agr. Winfried Sonderhoff fertigte dort seine Diplomarbeit.

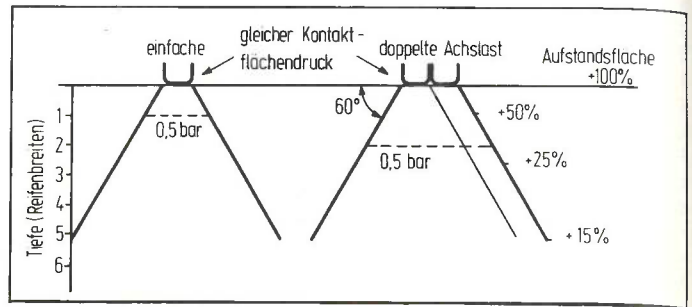


Abb. 1: An der Oberfläche verdoppelt der Zwillingsreifen die Aufstandsfläche; diese Vergrößerung nimmt nach unten hin relativ ab.

Damit sind die Maschinen, die besonders langsam laufen, von Nachteil; das wären kombinierte Verfahren oder solche mit großer Arbeitsbreite, die andererseits den Vorzug haben, die Fläche wenig zu befahren.

Mehrmaliges Befahren verdichtet den Boden mehr und mehr in die Tiefe; denn die Spur wird tiefer, und die energieumwandelnde Zone dringt weiter in noch verformungsfähige Bereiche. Diese Verdichtung macht man sich positiv zunutze beim „multipass-Effekt“, der den Rollwiderstand mindert und die Zugkraft des Schleppers erhöht. Die nachteilige Folge tritt ein, wenn die Räder des Fahrzeugs oder der Arbeitsmaschine in der gleichen Spur wie der des Schleppers laufen.

Messungen des dynamischen Bodendrucks zeigen, daß unter dem Schlepper der Druck momentan stark steigt, dann aber abfällt. Die länger währende Verdichtung der Raupe hingegen hinterläßt – verstärkt durch die Vibration – einen stärker zusammengepreßten Boden, obwohl der statische Flächendruck günstig erscheint (Abb. 2).

Stadium beim Befahren	Druck (bar) bei ... Überfahrt						
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Schlepper (90 kW, 8,5 t) während	0,3	0,37	0,45	0,5	0,55	0,6	0,63
nach	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16
Raupe (100 kW, 9 t) 1/4	0,2	0,35	0,35	0,4	} elastische Verdichtung		
2/3		0,45	0,45	0,48			
voll	0,4	0,5	0,5	0,55			
danach	0,18	0,25	0,25	0,25	} unelast. Verdichtung		

Abb. 2: Der dynamische Bodendruck (Sonde nach Bolling) und die bleibende Verdichtung in 30 cm Tiefe

Im Spurschacht-System läuft mehrmals der Schlepper mit dem Düngestreuer oder Güllefaß. Die ersten Maßnahmen im zeitigen Frühjahr pressen den Boden häufig sehr stark. Daher sind spätere Folgen aus Belastungen weniger zu spüren: das kommt der Gülleausbringung zur Zeit der zweiten N-Gabe entgegen.

Insgesamt bieten Spurschächte die Chance, Verdichtungen zu lokalisieren; deren Ausmaß kann je nach Jahreswitterung aber bedenklich sein. Nach der letzten Maßnahme wären mechanisch-biologische Maßnahmen überlegenwert, den Boden zu regenerieren. Dennoch: der Landwirt muß die Fläche befahren, um Pflanzenschutzmittel, mineralischen oder organischen Dünger auszubringen. Er kann das Gewicht von Schlepper und Vorratsbehälter gering halten; das Fassungsvermögen aber wächst bei gegebener Schlaglänge zwangsläufig mit der Arbeitsbreite, die die Zahl der Spuren reduziert.

Auflagefläche

Mit der Auflagefläche sinkt der Kontaktfächendruck. Er entspricht etwa dem Reifeninnendruck, erhöht um den Faktor 0,2 bis 0,4, der die Festigkeit der Karkasse kennzeichnet.

Somit liegt der erste Schritt, den Boden zu schonen, darin, den Luftdruck abzusenken. Derzeit liegt er häufig zu hoch: einmal mit Rücksicht auf die Straßefahrt; dort walkt der Reifen sehr, das fördert den Verschleiß. Außerdem könnte bei schwerer Zugarbeit der Reifen auf der Felge wandern und schließlich braucht der Reifen eine genügende Tragfähigkeit.

Also sollte man den Druck im Reifen auf die jeweiligen Erfordernisse abstimmen. Das setzt ein besonderes Engagement beim Fahrer und eine befriedigende Technik voraus: ein Ventil zum schnellen Füllen und Entleeren sowie ein Manometer mit 0,1 bar Teilung.

Die Tragfähigkeit eines Reifens hängt primär von seiner Breite ab, nur halb so stark von Durchmesser und Luftdruck. Das spricht für den Breitreifen.

Fortsetzung von Seite 383

- [6] Hassenpflug, H. G., H. Seufert und V. Seifert: Sind Breitreifen ihren Preis wert? – DLG-Mitteilungen 99 (1984), H. 24, S. 1517–1519
- [7] Hassenpflug, H. G., H. Seufert und V. Seifert: Mit breiten Reifen und weniger Druck gegen Bodenverdichtungen. – Agrar-Übersicht 35 (1984), H. 4, S. 14–19
- [8] Olfe, G. und H. Schön: Bodenbelastung beim Schlepper- und Geräteinsatz. – Vortrag vor der KTBL-Arbeitsgemeinschaft „Technik in der Pflanzenproduktion“ am 20. 3. 1985 in Witzhausen
- [9] Ruhm, E.: Schlechte Voraussetzungen für eine gute Ernte. – Hann. Land- und Forstw. Zeitung 136, H. 4, S. 3–4
- [10] Soane, B. D., P. S. Blackwell, J. W. Dickson and D. J. Painter: Compaction by agricultural vehicles: A review. II. Compaction under tyres and other running gear. – Soil and Tillage Research Vol. 1 (1981), No. 4, S. 373–401
- [11] Soane, B. D., P. S. Blackwell, J. W. Dickson and D. J. Painter: Compaction by agricultural vehicles: A review. III. Incidence and control of compaction in crop production. – Soil and Tillage Research Vol. 2 (1982), No. 1, S. 3–37
- [12] Söhne, W.: Die Verformbarkeit des Ackerbodens. – Grundl. der Landtechnik 2 (1952), H. 3, S. 51–59
- [13] Söhne, W.: Druckverteilung und Bodenverformung unter Schlepperreifen. – Grundl. der Landtechnik 3 (1953), H. 5, S. 49–63
- [14] Söhne, W.: Grundlagen für eine landtechnische Bodenmechanik. – Grundl. der Landtechnik 6 (1956), H. 7, S. 11–27
- [15] Sommer, C.: Die Verdichtungsempfindlichkeit zweier Ackerböden – ein Beitrag zum Verhalten von Böden unter vertikaler Belastung im Saugspannungsbereich bis pF 2,7. – Diss. TU Braunschweig (1974)
- [16] Sommer, C.: Über die Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden. – Grundlagen der Landtechnik 26 (1976), H. 1, S. 14–23
- [17] Sommer, C., H. Steinkampf, M. Zach und W. Czeratzki: Ein Beitrag zum Problem der Bodenverdichtung beim Einsatz leistungsstärker Schlepper. – Landbauforschung Völknerode 25 (1976), H. 2, S. 69–72
- [18] Sommer, C., E. Ruhm und H. J. Allemüller: Direkt- und Nachwirkungen starker Verdichtungen auf das Bodengefüge und den Pflanzenenergieertrag. – Kali-Briefe 15 (1981), H. 7, S. 429–448
- [19] Sommer, C.: Auswirkungen moderner Landtechnik auf das Bodengefüge. In: Bodenfruchtbarkeit in Gefahr? – Arbeiten der DLG, Band 179 (1984), S. 13–28
- [20] Sommer, C., M. Zach und M. Dambroth: Zur Konservierenden Bodenbearbeitung: Ergebnisse und Erfahrungen aus der Praxis. – Agrar-Übersicht 36 (1985), H. 5, S. 14–18
- [21] Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1983), Herausgeber: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten im Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup.