

DIE VERFORMBARKEIT DES ACKERBODENS

Von Walter Söhne

Die Frage, welche Verdichtungsschäden beim Einsatz von Schleppern auf dem Ackerboden auftreten können und wie weit eine Vollmotorisierung möglich ist, ist sehr umstritten. Man kann auf Äckern, die von Schleppern befahren werden, manchmal beobachten, dass der Pflanzenwuchs in den Schlepperspuren nicht beeinträchtigt, gelegentlich sogar besser ist als beim unbefahrenen Acker, manchmal aber auch, dass der Pflanzenwuchs in den Schlepperspuren erheblich schlechter ist. Der Grund hierfür liegt darin, dass der Ackerboden je nach Feuchtigkeit, Bodenart und Lagerungszustand ganz verschieden verdichtungsempfindlich ist. Bei der Untersuchung dieser Fragen kann die Bodenmechanik von Nutzen sein. Zu den Aufgaben der landtechnischen Bodenmechanik gehört es ja, die Verformung des Ackerbodens durch äussere Kräfte zu untersuchen, ihre Daten und Gesetzmässigkeiten zu bestimmen und sie dem daran interessierten Ingenieur und Landwirt zu übermitteln.

Wenn man einen Boden z.B. durch ein darüberrollendes Rad belastet, so muss man bei diesem Vorgang zwischen drei verschiedenen Fragen unterscheiden:

1. Wie gross ist der Druck in der Berührungsfläche zwischen Reifen und Boden, wie pflanzt er sich nach unten und zur Seite hin fort und wie wird er dabei abgebaut. Dieser Bodendruck oder besser die Druckspannungen in der Berührungsfläche und im Boden, gemessen in kg/cm^2 , dürfen nicht mit der Bodenverdichtung verwechselt werden. Auch Ingenieure machen häufig den Fehler, vom Bodendruck zu sprechen, wenn sie Bodenverdichtung meinen. Die Bodenverdichtung ist eine Folge der Druckspannungen. In einer früheren Abhandlung ist das Druckspannungsfeld unter verschiedenen Schlepperrädern für einen festen, trockenen Lehmboden gezeigt [1]. Eine solche Druckverteilung (in Form von „Druckzwiebeln“) sagt aber auf den ersten Blick noch nichts aus über die Bodenverdichtung in diesem Spannungsfeld. Denn durch annähernd gleiche Spannungsfelder können je nach Bodenfeuchtigkeit, Bodenart und Lagerungszustand ganz verschiedene Verdichtungen verursacht werden. Damit kommt man zur zweiten Frage:

2. Wie verformt sich der Boden als Folge der Druckspannungen? Nur diese Frage soll im folgenden behandelt werden.

3. Die letzte Frage lautet schliesslich: Wie reagieren die Pflanzen in ihrem Wuchs und ihrer Entwicklung auf die Bodenverformungen, insbesondere die Boden-

verdichtungen? Diese Frage muss von den Landwirten und Biologen beantwortet werden, wobei wir uns bewusst sind, dass dieses Problem das schwierigste von allen ist. Seine Lösung ist aber leichter, wenn man erst einmal weiss, wie sich der Boden als Folge von Druckspannungen verformt. In einem Bild am Schluss der Verdichtungsversuche soll eine Vorstellung gegeben werden, von etwa welchen Bodenverdichtungen an man schädliche Beeinflussungen des Pflanzenwachstums erwarten kann.

Ein Hookesches Gesetz, nach dem die Verformungen proportional den Druckspannungen sind, gibt es für den Ackerboden nicht. Man muss zwischen zwei verschiedenen Verformungsarten unterscheiden:

1. der elastischen Bodenverformung,
2. der plastischen Bodenverformung,
 - a) durch Verdichten,
 - b) durch Fliesen.

Die elastische Verformung des Bodens ist – abgesehen von Sonderfällen – nur klein. Sie wird im wesentlichen durch die elastische Verdichtung der eingeschlossenen Luft, die bei kurzzeitiger Belastung nicht so schnell entweichen kann, sowie durch die elastische Verformung der Humusbestandteile verursacht. Wesentlich bedeutungsvoller als die elastische ist die plastische Bodenverformung durch Verdichten.

Unter Bodenverdichtung ist die Verringerung des Porenvolumens durch einen ausgeübten Druck zu verstehen. In der Bodenkunde ist es bis heute üblich, den prozentualen Anteil von Luft- und Wasservolumen am Gesamtvolumen als „Porenvolumen“ zu bezeichnen. Da es sich hierbei um eine dimensionslose Verhältniszahl handelt, erscheint der Ausdruck „Anteil des Porenvolumens“ oder kurz „Porenanteil“ zweckmässiger zu sein. Wir werden daher im folgenden den Begriff „Porenanteil“ verwenden und unter „Porenvolumen“ nur das wirkliche Porenvolumen verstehen¹⁾. Der Porenanteil beträgt bei einem natürlich gelagerten Ackerboden je nach Jahreszeit und Bodenart rund 52–44%, wobei Sandböden im allgemeinen etwas dichter gelagert sind als bindige Böden. Durch Bodenbearbeitung, Pflügen oder Fräsen kann das Porenvolumen bis auf 60% gesteigert werden. Dies ist aber ein labiler Zustand, der sich durch Setzen, vor allem unter dem Einfluss von Regen, bald wieder normalen Werten um 50% nähert.

¹⁾ Eine generelle Festlegung der Begriffe erscheint uns dringend erforderlich.

Der Feuchtigkeitsgehalt beträgt im allgemeinen bei Sandböden zwischen 7 und 18 Gew.%, bei Lehm und Tonböden zwischen 10 und 25 Gew.% des trockenen Bodens. Die obere und die untere Feuchtigkeitsgrenze haben eine bestimmte Bedeutung. Unterschreitet der Feuchtigkeitsgehalt die untere Grenze von 7 bzw. 10%, so verliert der Boden seine dunkle Farbe und wird hell. Ton- und Lehmböden hören bei dieser Grenze auf zu schrumpfen. Überschreitet der Wassergehalt die Grenze von rund 18% bei Sandböden und 20 bis 25% bei Lehmböden, so kann der Boden bei Belastung viel leichter durch Fliessen plastisch verformt werden. Ist der Boden sehr feucht, so sind die einzelnen Körner und Krümel völlig von Wasserhäutchen umgeben. Dadurch verringern sich die Kohäsion und die innere Reibung, die einer Verformung entgegenwirken; die Böden verlieren mehr oder weniger ihre Tragfähigkeit. Ein sehr nasser Boden, dessen Poren völlig mit Wasser gefüllt sind, wird bei kurzzeitiger Belastung zwar stark durch Fliessen plastisch verformt; ein Rad z.B. hinterlässt eine tiefe Spur. Er wird aber nicht stärker verdichtet, da das Wasser nicht so schnell entweichen kann. Ein nasser Boden kann also bei kurzzeitiger Belastung immer nur bis zu dem Porenvolumen verdichtet werden, das mit Wasser gefüllt ist.

Versuche über die Bodenverdichtung

Bei den Verdichtungsversuchen, über die im folgenden berichtet wird, wurden Zylinder von 284 mm Ø, 157 mm Höhe und 10 l Rauminhalt verwendet, mit denen der Boden teils in natürlicher Lagerung entnommen oder in die der Boden locker eingefüllt wurde. Dann wurde er unter einer hydraulischen Presse langsam zusammengedrückt.

Bild 1 zeigt ein solches Druckdiagramm eines lockeren Bodens. Die Abszisse gibt den Weg an, den der Kolben in den Zylinder eingedrückt wurde, die Ordinate die dazu notwendige Kraft. Zunächst genügt eine geringe Kraft, um den Kolben ziemlich weit her-

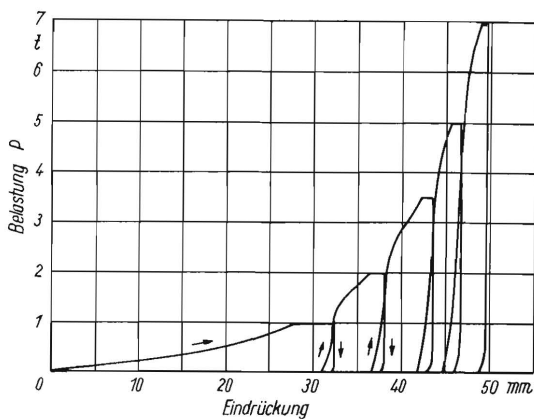


Bild 1. Verdichtungsdiagramm eines lockeren Lehmbodens (B).
Feuchtigkeit des Versuchsbodens 14,3 %
Ausgangshöhe des gefüllten Zylinders 158 mm

einzudrücken, dann steigt aber die Kraft bei nur noch kleinerer, weiterer Verformung stark an. Bei 1, 2, 3,5 und 5 t wurde die Belastung 3 Minuten konstant gehalten, um den Zeiteinfluss zu untersuchen; dann wurde der Zylinder entlastet und wieder belastet. Dabei kehrt die Kurve jeweils wieder in den ursprünglichen Verlauf zurück, als ob weder eine Zeit konstanter Belastung noch eine Entlastung dazwischen stattgefunden hätte. Aus dem Gewicht der Bodenprobe im Zylinder, seinem nachträglich ermittelten Wassergehalt und seinem jeweiligen Volumen während des Belastungsversuches kann die Beziehung zwischen Porenanteil und Druck aufgestellt werden.

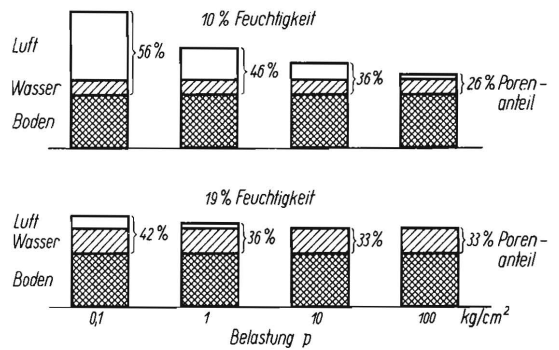


Bild 2. Zusammendrückbarkeit eines locker eingesiebten Sandbodens in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt. (Die Feuchtigkeit ist in Gew.% der trockenen Probe angegeben).

Bild 2 soll eine Vorstellung von der Grösse der Porenanteile bei verschiedenen Drücken geben. Wenn man den Druck jeweils verzehnfacht, verringert sich der Porenanteil eines ursprünglich sehr lockeren Bodens (Bild 2, obere Reihe) unter den angegebenen Bedingungen um jeweils 10%. Bild 2 (untere Reihe) zeigt, wie sich der Boden bei grösserer Feuchtigkeit verhält. Hier genügt schon ein sehr viel geringerer Druck, um ihn entsprechend zu verdichten. Von 33% Porenanteil ab sind aber sämtliche Poren mit Wasser gefüllt; bei kurzzeitiger Belastung kann dieser Boden daher nicht mehr weiter verdichtet werden.

Die Verdichtungsversuche wurden im wesentlichen mit vier verschiedenen Böden angestellt, deren Korngrößenverteilung Bild 3 wiedergibt. Aus den Sum-

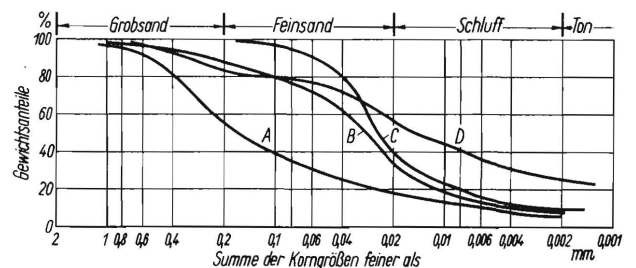


Bild 3. Korngrößenverteilung der untersuchten Böden.
A lehmiger Sand (Völkensrode)
B feinsandiger Lehm (Broitzem)
C Löss (Bodenstedt)
D lehmiger Ton (Lucklum)

menkurven ist für jede Stelle zu entnehmen, wieviel Gewichtsprozent des untersuchten Bodens kleiner sind als die darunterbeschriebene Korngrösse. Zeigt eine Kurve in einem bestimmten Bereich eine grosse Neigung, so ist der Anteil der Körner dieses Bereichs besonders hoch. Im Bild 4 sind die Gewichtsanteile der einzelnen Fraktionen herausgezeichnet. Beim lehmigen Sand A beträgt der Anteil Grob- und Feinsand rund 82%. Der Löss C hat einen besonders hohen Anteil Körner zwischen 0,04 und 0,01 mm, nämlich rund 60%. Das hängt mit der Entstehung dieses Bodens durch Windablagerung zusammen. Der lehmige Ton hat schliesslich den hohen Anteil von 26% Tonbestandteilen.

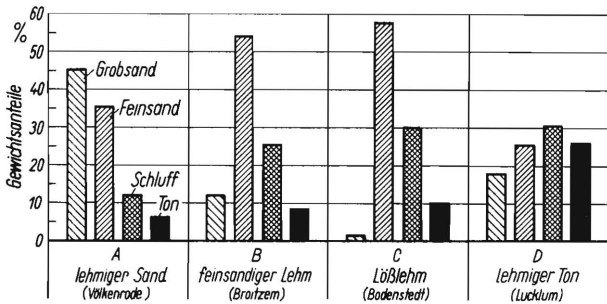


Bild 4. Zusammensetzung der untersuchten Böden nach Bild 3.

Verdichtung locker eingesiebter Böden

Es wird nun zuerst über die Versuche berichtet, bei denen der Boden im Laboratorium auf die gewünschte Feuchtigkeit gebracht, durch ein 10 mm Sieb gekrümelt und dann locker in den Versuchszylinder eingefüllt war. Dieser Zustand entspricht etwa frisch bearbeiteten, insbesondere gefrästen Böden.

Bild 5 zeigt die Verdichtungskurven des lehmigen Sandes A bei verschiedener Feuchtigkeit. Die Ordinate gibt den Porenanteil an, die Abszisse den aufgetragenen Flächendruck. Je feuchter der Boden ist, umso geringer wird der Porenanteil, umso mehr wird also der Boden verdichtet. Bei der Kurvenschar fällt besonders der grosse Unterschied der Kurve mit 18,7 gegenüber der Kurve mit 18,2% Wassergehalt auf. Um einen Boden auf 36% Porenanteil zu verdichten, ist bei 18,2% rund 4 kg/cm² Flächendruck, bei 18,7% Wassergehalt nur 0,8 kg/cm² erforderlich. Bei der Feuchtigkeit etwas über 18% nimmt die Verdichtung des Bodens plötzlich ganz erheblich zu, d.h. die „Tragfähigkeit“ nimmt ab. Ferner laufen die 18,7%- und 18,2%-Kurven in Horizontalen aus. Das bedeutet aber nichts anderes, als dass in diesem Bereich sämtliche Poren mit Wasser gefüllt sind, der Boden sich also bei kurzzeitiger Belastung nicht weiter verdichten lässt. Bild 6 macht das Verhalten des Bodens bei verschiedener Feuchtigkeit noch deutlicher. Auf diesem Bild sind die Porenanteile bei konstanten Flächendrücken von 1, 2, 5 und 10 kg/cm² bei verschiedener Feuchtigkeit aufgetragen. In dem Bereich normaler Ackerfeuchtigkeit haben wir einen stetigen Abfall des Porenvolumens, bei etwas über 18% Feuchtigkeit sinkt aber das Porenvolumen schlagartig ab. Dieser Sprung fällt bei diesem Boden mit der Wassersättigung zusammen, also bei einem Bodenzustand, bei dem der Boden soviel Wasser enthält, wie er aus eigener Kraft zu halten vermag. Bei höherer Feuchtigkeit entspricht das schraffiert gezeichnete Gebiet dem völlig mit Wasser gefüllten Porenvolumen. Man kann den Boden bei kurzzeitiger Belastung also nur bis zu diesem Porenvolumen verdichten. Der Boden kann bei 17 Gew.% Wasser bis zu einem Anteil der Poren am Gesamtvolumen von 32%

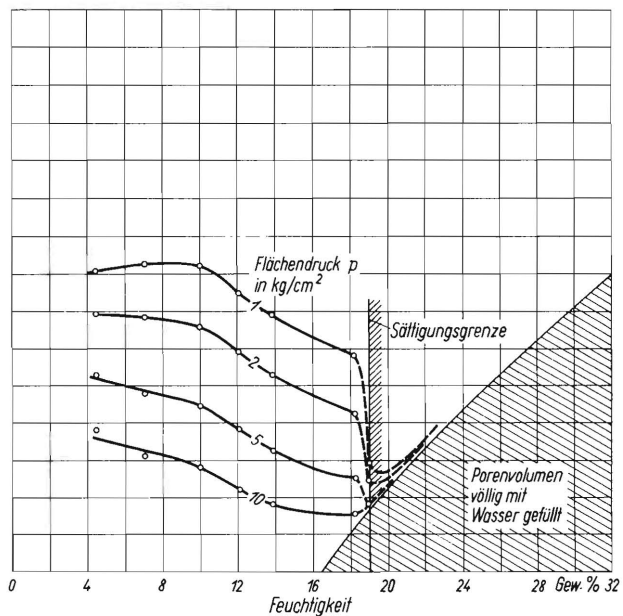
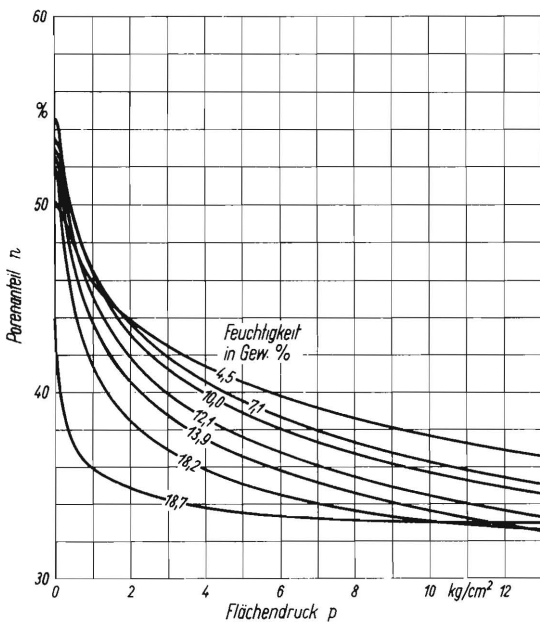


Bild 5 und 6. Zusammendrückbarkeit eines lockeren, lehmigen Sandbodens (A) bei verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt.

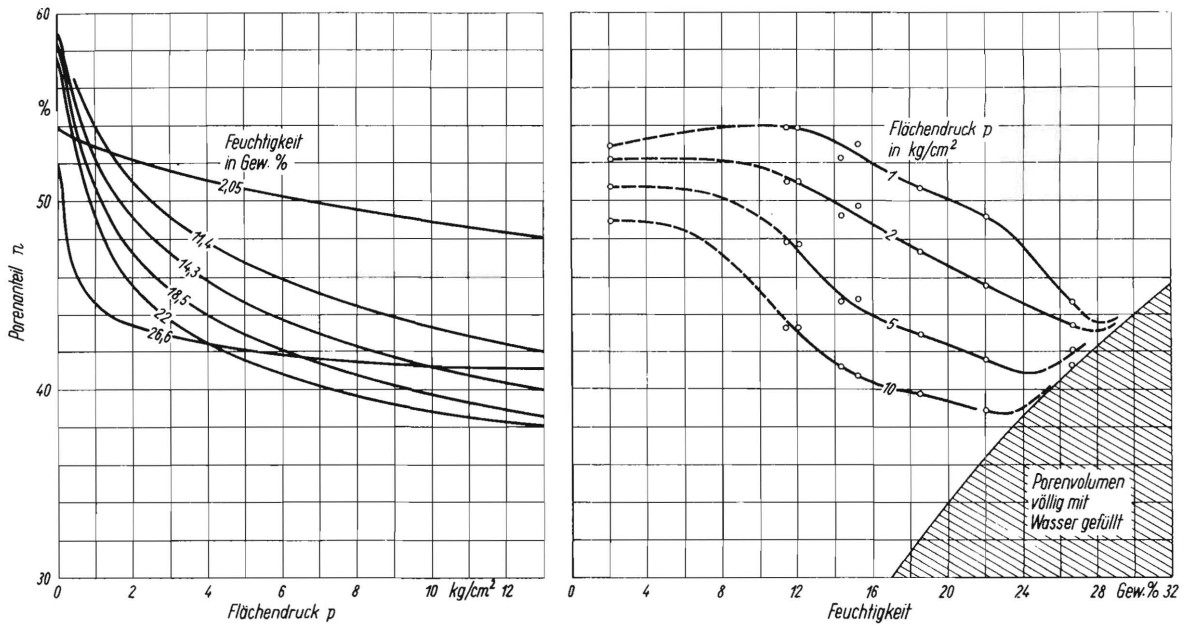


Bild 7 und 8. Zusammendrückbarkeit eines lockeren, feinsandigen Lehmbodens (B) bei verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt.

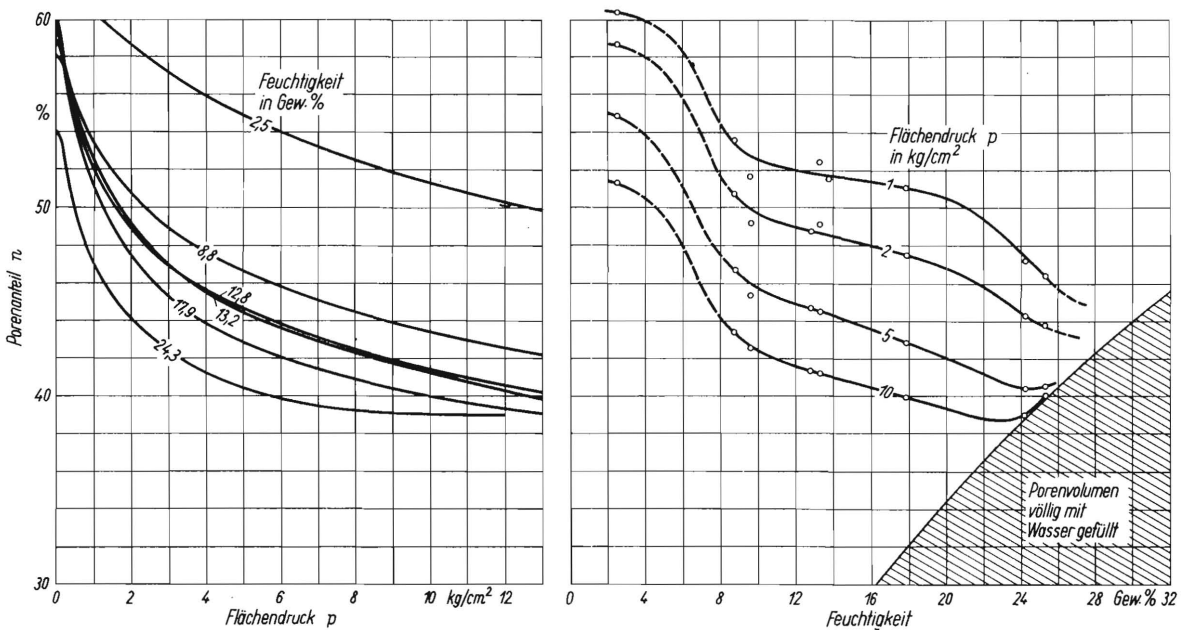


Bild 9 und 10. Zusammendrückbarkeit eines lockeren Lössbodens (C) bei verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt.

verdichtet werden, während er bei 28% Feuchtigkeit nur bis 42% Porenanteil zusammengedrückt werden kann (Bild 6).

Bild 7 und 8 zeigen die Zusammendrückbarkeit des lockeren, feinsandigen Lehmbodens B. Gegenüber dem Sandboden A (Bild 6 und 7) ist die ganze Kurvenschar in einen Bereich höherer Porenanteile heraufgerückt. Der Boden ist also im ganzen Druckbereich schwerer verdichtbar als der Sandboden A. Beispielsweise benötigt dieser Boden bei 11,4% Feuchtigkeit 6 kg/cm^2 Druck, um auf 46% Porenanteil verdichtet

zu werden, während der Sandboden A bei derselben Feuchtigkeit nur eines Druckes von 2 kg/cm^2 für dieselbe Verdichtung bedarf. Man kann also auch sagen, dass der lehmige Sand A verdichtungsempfindlicher als der feinsandige Lehmboden B ist. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass der Sandboden bei derselben Feuchtigkeit „nasser“ erscheint als der Lehmboden, da seine Sättigungsgrenze tiefer liegt. Auffallend ist der Sprung von trockenem hellem Boden (2,05% Feuchtigkeit) zu Boden mit normaler Ackerfeuchtigkeit. Der Abfall der Kurven bei nassem Boden (Bild 8, 24% Feuchtigkeit) ist nicht so ausgeprägt wie beim Sandboden A (18% Feuchtigkeit).

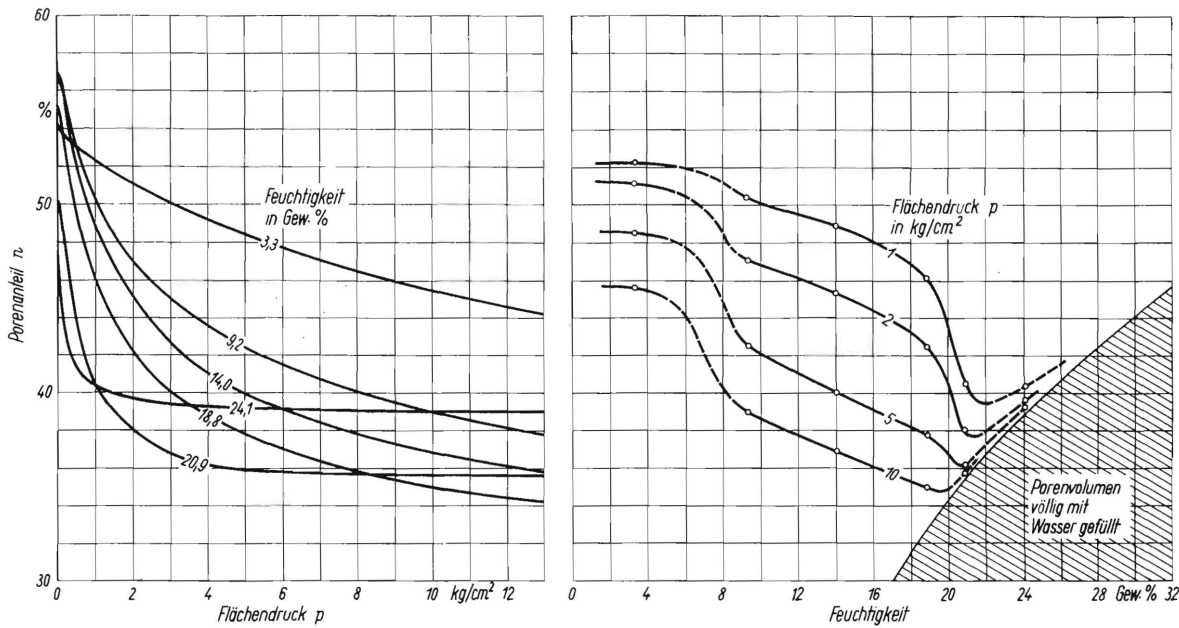


Bild 11 und 12. Zusammendrückbarkeit eines lockeren, lehmigen Tonbodens (D) bei verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt.

Die Ergebnisse des untersuchten Lössbodens C sind in Bild 9 und 10 wiedergegeben. Charakteristisch für diesen Boden ist hinsichtlich der Zusammendrückbarkeit der grosse Unterschied vom lufttrockenen Boden (2,5% Feuchtigkeit) zum Boden mit normaler Ackerfeuchtigkeit. Im übrigen Bereich verlaufen die Kurven ähnlich wie beim Lehm B in Bild 7 und 8. Der Boden ist also ebenso schwer verdichtbar wie der Lehmboden B und zeigt auch im nassen Zustand keinen sehr grossen Abfall der Kurven (Bild 10).

Der nächste untersuchte Boden D, ein lehmiger Ton, dessen Verdichtungskurven in Bild 11 und 12 wiedergegeben sind, liegt in seinem Verdichtungsverhalten zwischen den Böden A und C. Besonders bei grosser Feuchtigkeit ist ein steiler Abfall der Kurven zu beobachten (Bild 12). Der Abfall von lufttrockenem Boden und Boden mit normaler Ackerfeuchtigkeit ist wieder besonders gross.

Mit den gezeigten Bildern wurden die Verdichtungskurven einiger charakteristischer Böden gezeigt, wenn sie locker eingesiebt waren. Welche Gesetzmässigkeit steckt nun in diesen Verdichtungskurven und wie weit kann man sie formelmässig darstellen? Anstelle des Porenanteils n bedient man sich in der Bodenmechanik häufig der Porenziffer ϵ . Während n den Anteil der Poren am Gesamtvolumen angibt, stellt die Porenziffer ϵ das Verhältnis Porenvolumen zum Volumen der festen Substanz dar. Zwischen Porenvolumen und Porenziffer besteht folgende Beziehung: $\epsilon = \frac{n}{1-n}$. Die Gesetzmässigkeiten der Verdichtung, dargestellt durch die Porenziffer ϵ , wird in der Bodenmechanik durch die Formel $\epsilon = -A \ln p + C$ wiedergegeben [2]. Nach den Versuchen des Verfassers erscheint jedoch die Gesetzmässigkeit eher der Formel $n = -A \ln p + C$ zu entsprechen. Danach besteht

also eine logarithmische Abhängigkeit des Porenanteils vom Druck. Jedoch sind die Grössen A und C bei jedem Boden und jeder Feuchtigkeit verschieden.

Um eine Vorstellung davon zu gewinnen, ist in Bild 13 bis 16 der Flächendruck im logarithmischen Masstab aufgetragen. Aus den Kurvenscharen in Bild 5, 7, 9 und 11 werden Scharen von in erster Annäherung geraden Linien. In Bild 13 fällt die Linie für 18,7% Feuchtigkeit heraus. Sobald nämlich das Porenvolumen erreicht ist, welches ganz mit Wasser gefüllt ist, gehen die Kurven in Horizontale über.

Bild 14 zeigt in derselben Art der Darstellung die Zusammendrückbarkeit des Lehmbodens B. Hierbei fällt die Kurve des trockenen Bodens und, wie in Bild 7, die des sehr nassen Bodens aus der Gesetzmässigkeit der übrigen Kurvenschar heraus.

Ganz ähnlich verlaufen die entsprechenden Kurven, die sich für den Lössboden C ergeben (Bild 15).

Bild 16 zeigt schliesslich noch die Zusammendrückbarkeit des lockeren lehmigen Tonbodens D. Auch hier gehen die Linien für hohen Feuchtigkeitsgehalt in Horizontale über. Die Darstellung auf halb-logarithmischen Papier hat einige Vorteile. Man erkennt nämlich, dass die Verdichtungskurven der Böden in halb-logarithmischer Darstellung im Bereich normaler Ackerfeuchtigkeit angenähert gerade Linien ergeben, d.h. der obigen Gesetzmässigkeit folgen. Die lufttrockenen Böden erfüllen diese Gesetzmässigkeit erst bei etwas höheren Drücken, während die nassen Böden aus dieser Gesetzmässigkeit herausfallen. Wie sich nasse Böden verhalten würden, wenn man durch länger andauernde Belastung dem Wasser Zeit und Gelegenheit geben würde, zu entwässern, wurde nicht untersucht.

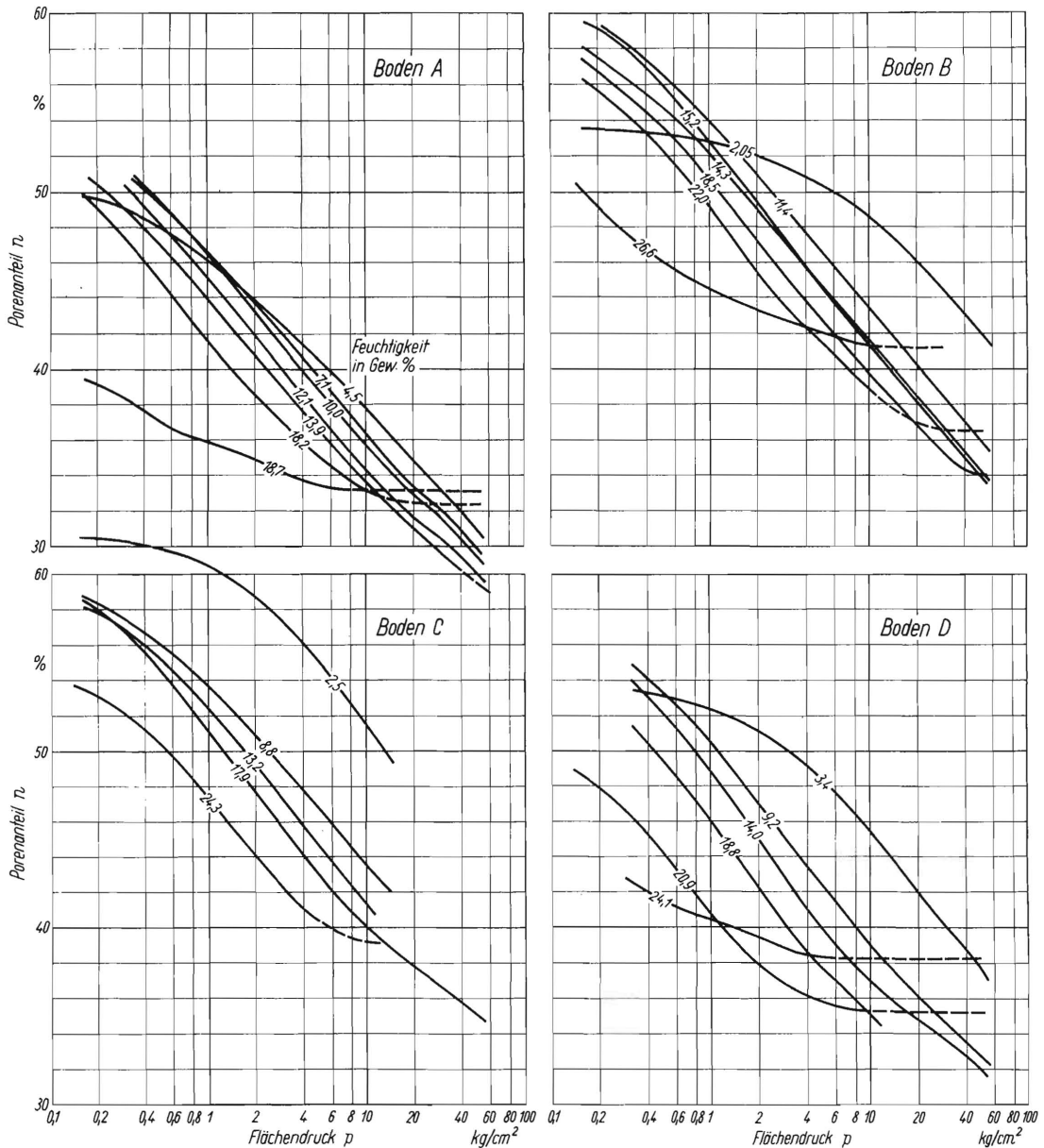


Bild 13 bis 16. Zusammendrückbarkeit der Böden A bis D bei verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt.
(Flächendruck p in logarithmischem Masstab aufgetragen)

- A lockerer, lehmiger Sandboden
- B lockerer, feinsandiger Lehmboden
- C lockerer Lössboden
- D lockerer, lehmiger Tonboden

Verdichtung natürlich gelagerter Böden

Für den Praktiker ist nun die Frage wichtiger, wie sich ein Ackerboden verhält, der sich während einer Vegetationsperiode mehr oder weniger gesetzt hat. Zu diesem Zweck wurden mit dem Zylinder Bodenproben in möglichst ungestörtem Zustand vom Acker entnommen und verdichtet. Bild 17 zeigt Verdichtungskurven des Sandbodens A. Die Kurve des Bodens, der auf dem Acker einen Porenanteil von 43 % hatte, (das ist etwa die normale Dichte für einen ungestörten Sandboden am Ende einer Vegetationsperiode), erreicht schon bei etwa 3 kg/cm^2 die Kurve des locker

eingesiebten Bodens. Die Kurve des dichter gelagerten Bodens aus der Schlepperspur läuft ebenfalls, allerdings erst bei höherer Flächenbelastung in die Kurve des locker eingesiebten Bodens ein. Bei Bild 19 werden die Kurven des locker eingesiebten Lössbodens C und eines natürlich gelagerten direkt vom Acker entnommenen Lösses verglichen. Die Kurven laufen wieder bei 3 kg/cm^2 Flächendruck zusammen. Bei höherem Flächendruck wird der natürlich gelagerte Boden weniger stark verdichtet, das mag aber mit seiner geringeren Feuchtigkeit zusammenhängen. Der Boden aus dem Vorgewende ist etwas leichter verdichtbar und zwar um rund 2 % Porenanteile.

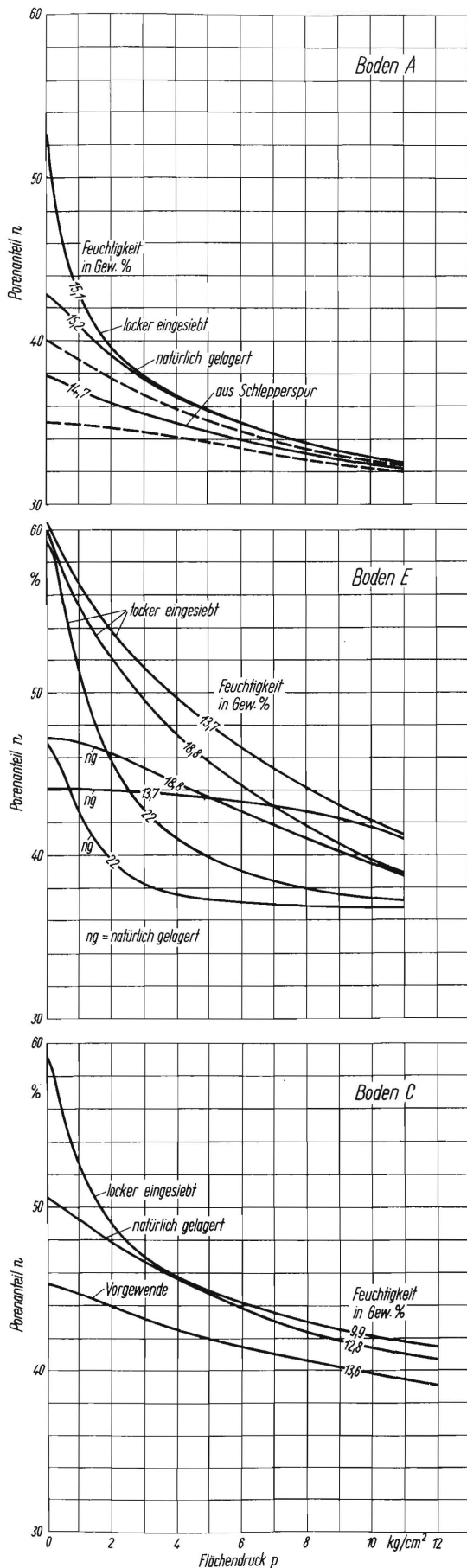


Bild 18 gibt schliesslich Verdichtungskurven des lehmigen Tonbodens E wieder. Die Kurve des in ungestörtem Lagerungszustand entnommenen, ziemlich dicht gelagerten Bodens mit 44% Porenanteil und 13,7% Feuchtigkeit läuft in die Kurve des locker eingesiebt Bodens mit 13,7% Feuchtigkeit ein. Der natürlich gelagerte Boden mit 18,8% Feuchtigkeit und einem Ausgangsporenanteil von 47% läuft mit guter Näherung in die Kurve des locker eingesiebt Bodens mit 18,8% Feuchtigkeit ein. Ganz anders jedoch verhält sich der nasse Boden mit 22% Feuchtigkeit. Der natürlich gelagerte Boden mit 48% Porenanteil wird bei geringen Drücken stark verdichtet und erreicht schon bei ca. 4 bis 6 kg/cm² den Zustand, bei dem alle Poren mit Wasser gefüllt sind. Aus diesen Vergleichskurven ist folgender Schluss zu ziehen:

In Bereichen mit normaler Ackerfeuchtigkeit laufen die Kurven des locker eingesiebt Bodens und des natürlich gelagerten Bodens im allgemeinen ineinander. Bei höherem Flächendruck sind die natürlich gelagerten Böden sogar gelegentlich weniger verdichtungsempfindlich. Nasse Böden können jedoch in natürlicher Lagerung manchmal leichter verdichtbar sein als locker eingesiebt Böden. Bei nassen Böden ist deren Tragfähigkeit labil, es ergeben sich bei der Verdichtung grössere Streuungen. Eine unterschiedliche Krümelbeständigkeit mag sich hierbei auswirken. Im ganzen genügen die bisherigen Versuche noch nicht, um das Verhalten des natürlich gelagerten Bodens gegenüber dem locker eingesiebt eindeutig zu kennzeichnen.

Bodenverdichtung und Pflanzenwachstum

Bild 20 zeigt einen Vergleich der Zusammendrückbarkeit verschiedener Böden, und zwar bei 12 und 18% Feuchtigkeit und von nassem Boden im Zustand maximaler Verdichtbarkeit. Nach Bild 6, 8, 10 und 12 beträgt der Wassergehalt, bei dem die untersuchten Böden ihre maximale Verdichtbarkeit haben, für Drücke zwischen 1 und 10 kg/cm²

- bei dem lehmigen Sand A 19 bis 18%,
- bei dem feinsandigen Lehm B 28 „ 23%,
- bei dem Löss C 27 „ 24%,
- bei dem lehmigen Ton D 21 „ 19%.

In dem schraffierten Bereich liegt etwa die Grenze, unter der man erfahrungsgemäss eine Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums erwarten kann. Diese Grenze liegt bei Sandböden und bei Löss tiefer als bei Lehm Böden. Da aber noch kein Landwirt verbindliche Zahlen über diese Grenze angeben kann, geben wir sie nur unter Vorbehalt wieder. Die verschiedenen Pflanzen wie Getreide, Kartoffeln, Rüben reagieren auch ganz verschieden auf die Verdichtungen. Bei Böden

Bild 17 bis 19. Zusammendrückbarkeit des lehmigen Sandbodens A, des Lössbodens C und des lehmigen Tonbodens E (Lucklum) bei verschiedener Ausgangsdichte. (Die gestrichelten Kurven bei Sandboden A beziehen sich auf angenommene Ausgangsdichten).

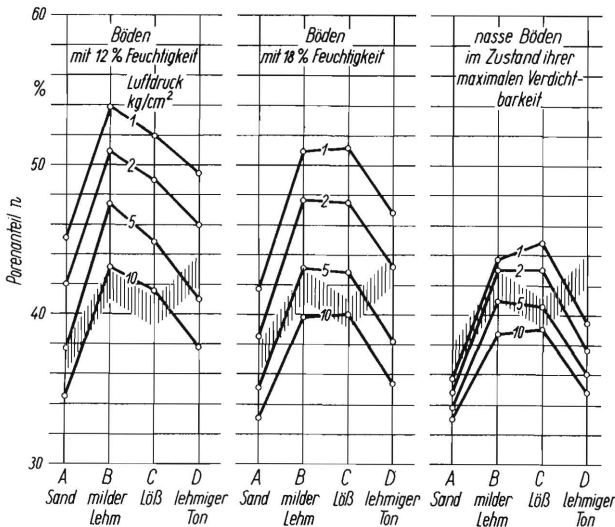


Bild 20. Bodenverdichtung der untersuchten Böden bei verschiedener Feuchtigkeit. Das schraffierte Gebiet gibt die vermutliche Grenze an, unter der eine Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums zu erwarten ist.

mit normaler Ackerfeuchtigkeit (z.B. bei 12% und 18%) treten bei den unter Schlepperrädern vorkommenden Flächendrücken, also Werten bis zu $2,5 \text{ kg/cm}^2$, im allgemeinen keine schädlichen Verdichtungen auf. Im nassen Zustand verhalten sich die Böden ganz verschieden. Der Sandboden A und der schwere Lehm D sind besonders leicht verdichtbar und die zulässige Grenze wird bei ihnen erheblich unterschritten. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Sandboden die über 18% hinausgehende Feuchtigkeit sehr schnell durch Versickern wieder verliert. Die Zeit nach schweren Regengüssen, in denen er besonders verdichtungsempfindlich ist, dauert nur etwa $\frac{1}{2}$ bis 2 Tage. Demgegenüber hält der tonige Lehm Boden die hohe Feuchtigkeit, bei der er besonders verdichtungsempfindlich ist, unter Umständen während des Winterhalbjahres mehrere Monate. Der Lehm B kann gerade noch Flächendrücke von 2 kg/cm^2 vertragen. Einzig der Löss scheint von den untersuchten Böden auch bei grosser Feuchtigkeit noch befahrbar zu sein, ohne dass schädliche Verdichtungen auftreten.

Das Fliessen des Ackerbodens

Während die Verdichtung des Ackerbodens dadurch hervorgerufen wird, dass sich die einzelnen Krümel unter dem aufgetragenen Druck plastisch verformen und die Poren ausfüllen, soll unter dem Fliessen eine plastische Verformung des gesamten Bodens, getrennt von der gleichzeitigen Verdichtung, verstanden werden. Ein nasser Boden, dessen Porenvolumen restlos mit Wasser gefüllt ist, lässt sich bei kurzzeitiger Belastung zwar nicht mehr verdichten, eine nennenswerte Belastung z.B. durch darüberrollende Räder ist trotzdem nicht möglich, weil der Boden seitlich unter der Belastung wegzufliessen beginnt, die Räder eine tiefe Spur hinterlassen und der Rollwiderstand zu gross wird.

Diese Verformung ist messtechnisch schwer zu erfassen, weil sie im allgemeinen gleichzeitig mit der Verdichtung auftritt und weil die Kräfte auch noch stark von der Verformungsgeschwindigkeit abhängen.

Bild 21 zeigt nun einen ersten Versuch, diese plastische Verformbarkeit des Bodens zu erfassen. Hierbei wurde in den mit Boden gefüllten Zylinder ein Stempel gedrückt, dessen Querschnittsfläche nur ein Drittel des Zylinderquerschnitts beträgt. Dabei quillt der Boden zwischen Stempel und Zylinderwand hoch. Durch die Bewegung des Bodens an der Zylinderwand wird der Zylinder angehoben, sodass sich zwischen Zylinder und Unterlage ein Schlitz bildet, durch den der Boden schliesslich ebenfalls plastisch herausquellen kann. Bei diesem Vorgang erreicht die aufgetragene Kraft einen Maximalwert und fällt dann wieder ab, sobald der Schlitz eine gewisse Grösse erreicht hat.

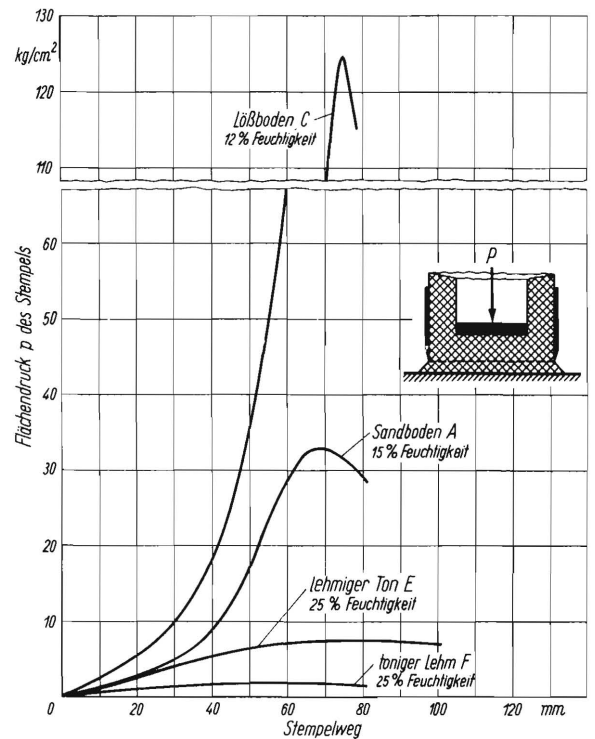


Bild 21. Plastische Verformung verschiedener Böden bei verschiedener Feuchtigkeit.

Die auf diese Weise ermittelten Maximaldrücke hängen nun ganz entscheidend von der Feuchtigkeit ab. Bei 12–14% Feuchtigkeit ergaben sich für Sandboden Werte zwischen 30 bis 15 kg/cm^2 , bei Lehm und Löss Werte von 125 bis 150 kg/cm^2 . Bei schwerem Lehm und Tonboden waren sie noch erheblich höher und konnten nicht bestimmt werden. Im ganzen liegen sie also weit oberhalb der in der Praxis vorkommenden Drücke. Sobald der Boden aber eine bestimmte Feuchtigkeit überschreitet, fallen die Maximalwerte ganz erheblich ab. So wurden für lehmigen Ton mit 25% Feuchtigkeit Maximalwerte von 6–10

kg/cm² und für tonigen Lehm bei 25% Feuchtigkeit Maximalwerte von 1,6 kg/cm² gemessen.

Diese Ergebnisse können aber nur als Vergleichszahlen gewertet werden, da sie auch von den Zylinder- und Stempelabmessungen abhängen. Unter einem Reifen wird der Boden nun nicht solchen starken Verformungen ausgesetzt wie bei unseren Versuchen. Er wird auch nicht durch eine Zylinderwand daran gehindert, sich zu verformen. Die entsprechenden Drücke bis zum Fließen unter Reifen auf dem Acker liegen also noch erheblich niedriger als die Werte der Druckversuche im Zylinder. Vielleicht gelingt es später, die plastische Verformung durch Fließen noch besser in Mass und Zahl zu erfassen. Ubrigens merkt der Landwirt sehr schnell an seinen Radspuren und dem hohen Fahrwiderstand, wenn das Fließen so gross wird, dass er den Acker nicht mehr befahren darf. Im Gegensatz dazu kann er leider nicht so leicht erkennen, wann die oben besprochenen, schon bei geringerer Feuchtigkeit erfolgenden Verdichtungen eintreten.

Zusammenfassung

Die Verdichtungsversuche wurden angestellt, um von der Seite der landtechnischen Bodenmechanik einen Beitrag zu der umstrittenen Frage der Verdichtungsschäden der Böden zu geben und dabei

Zahlenwerte zu ermitteln, soweit man bei einem so heterogenen Medium wie dem Ackerboden überhaupt exakte Zahlen angeben kann. In dem unterschiedlichen Verhalten der einzelnen Böden bei verschiedenen Feuchtigkeiten ist der Grund dafür zu sehen, warum so widersprechende Beobachtungen über Verdichtungsschäden gemacht worden sind. Für den Biologen und Landwirt sollen die Versuchsergebnisse eine Hilfe sein, wenn er die Beeinträchtigung des Pflanzenwuchses durch Bodenverdichtungen untersucht. Für den Schlepper- und Reifenkonstrukteur ergibt sich aus unseren früheren Versuchen [1] über den Einfluss von Gesamtlast und Flächendruck auf die Druckverteilung im Boden und aus den vorstehenden Versuchen über die Bodenverdichtung folgende Erkenntnis: Für den Bereich normaler Ackerfeuchtigkeit besteht bei den üblichen Flächendrücken unter Schlepperrädern bis 2,5 kg/cm² keine Gefahr einer schädlichen Bodenverdichtung. Will man jedoch gewisse Böden noch im nassen Zustand befahren, so muss der Flächendruck der Räder noch erheblich unter dem Wert von 1 kg/cm² liegen.

Schrifttum

- [1] Söhne, W.: Das mechanische Verhalten des Ackerbodens. Grundlagen d. Landtechn. 1951, H. 1, S. 87/94.
- [2] Kögler, F. und A. Scheidig: Baugrund und Bauwerk. 4. Auflage, Berlin 1944.

Institut für Landtechnische Grundlagenforschung
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode
Direktor: Prof. Dr. Ing. W. Kloth

Anschrift des Verfassers: Dr.-Ing. Walter Söhne, (20b) Braunschweig, Forschungsanstalt für Landwirtschaft