

# Über die Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden

Von Claus Sommer, Braunschweig-Völkenrode\*)

DK 631.43:631.37

Die weiter steigende Mechanisierung der Feldwirtschaft und die immer höheren Gewichte von Maschinen und Geräten lassen die Frage nach der Gefährlichkeit möglicher Bodenverdichtungen stellen. Die landwirtschaftlich orientierte Bodenphysik untersucht das Verformungsverhalten im Hinblick auf die Bodenfunktionen, die für das Pflanzenwachstum von Bedeutung sind.

Mit der vorliegenden Arbeit wird versucht, Gefügeveränderungen von zwei Böden in natürlicher Lagerung in gestaltlicher und funktioneller Hinsicht zu erfassen. Mit Hilfe von vier gewählten Zielfunktionen werden sie bezüglich ihrer Verdichtungsempfindlichkeit verglichen.

## Inhalt

1. Einleitung
2. Problemstellung und Ziel der Untersuchungen
3. Versuchsdurchführung
  - 3.1 Beschreibung der Versuchsböden
    - 3.1.1 Analysendaten der Böden
    - 3.1.2 Mikromorphologische Merkmale
  - 3.2 Versuchsapparatur
    - 3.2.1 Der Kompressions-Durchlässigkeits-Apparat und die Belastungseinrichtung
    - 3.2.2 Die Absaugvorrichtung
4. Versuchsergebnisse
  - 4.1 Die Verdichtungsfunktion
  - 4.2 Die Zeit-Zusammendrückungs-Kurve
  - 4.3 Die Wasser-(Saug-) Spannungskurve
    - 4.3.1 Zusammensetzung des Gesamtporenvolumens vor und nach der Belastung
    - 4.3.2 Änderung der mengenmäßigen Porenverteilung durch statische Belastung
  - 4.4 Der Durchlässigkeitsbeiwert als Funktion der Porenziffer
5. Diskussion der Ergebnisse
6. Zusammenfassung

## 1. Einleitung

Seit die Motorisierung mit dem Schlepper Eingang in den landwirtschaftlichen Betrieb gefunden hat, sieht der Praktiker nicht nur den Vorteil, der ihm mit einer beweglichen Energiequelle in die Hand gegeben wurde. Er fragt auch besorgt nach den möglichen Schäden, die beim Einsatz der Schlepper entstehen können, zumal im Laufe der Zeit Leistung und Masse erheblich vergrößert worden sind. Die steigende mittlere Motorleistung von 14 kW im Jahre 1954 auf etwa 41 kW im Jahre 1973, *Söhne* [2], hatte eine Massenzunahme unserer Schlepper zur Folge, obgleich die auf die Leistung bezogene Masse stark verringert wurde. Auch moderne

\*) Dr.-Ing. Claus Sommer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Biochemie des Bodens (Direktor: Prof. Dr. W. Flaig) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode. Der vorliegende Beitrag ist im wesentlichen der Dissertation [1] des Autors entnommen.

Reifenentwicklungen können einem Gespann aus einem 74 kW Schlepper mit 4 t Masse und dem Ackerwagen mit 8 t zulässiger Gesamtmasse seine Gefährlichkeit hinsichtlich möglicher Bodenverdichtungen nicht nehmen. Betrachtet man gar die neuesten Schlepperentwicklungen, mit denen die Industrie in Leistungsklassen kommt, an die der Landwirt bei Einführung der Motorisierung gewiß nicht zu denken gewagt hatte, so wird an Wissenschaft und Technik die Frage gestellt, ob und unter welchen Bedingungen mit Bodenschäden beim Einsatz schwerer Maschinen und Geräte auf landwirtschaftlich genutzten Flächen zu rechnen ist und wie diese evtl. zu vermeiden oder zu beseitigen seien.

*Söhne* hat grundlegende Arbeiten auf dem Gebiet der landwirtschaftlichen Bodenmechanik veröffentlicht [u.a. 3, 4]. In jüngster Zeit befassen sich einige Forscher mit speziellen Aspekten des Systems "Fahrzeug-Boden". *Krick* [5] benutzt kleine Meßelemente, die eine genaue und punktweise Messung der Druck-, Tangentialschub- und Querschubkräfte in der Berührungsfläche Reifen/Boden erlauben. *Holm* [6] untersucht das Verhalten von Reifen beim mehrmaligen Überfahren einer Spur und legt die Bodenkenwerte mit Platten- und Scherversuchen fest. Von Feldversuchen mit einer Einzelrad-Meßvorrichtung berichten *Sommer* u.a. [7] und stellen die Bedeutung des Radschlupfs für die Ausbildung von Bodenverdichtungen heraus. *Danfors* [8] entwickelt eine besondere Meßmethode, um tiefreichende Unterbodenverdichtungen festzustellen. Schließlich werden an zahlreichen Stellen Versuche durchgeführt mit dem Ziel, Korrelationen zwischen den verschiedenen Stufen von Bodenverdichtungen und dem Ertrag zu finden, z.B. *Hakansson* [9]. Die bislang bekannten Schwellenwerte für "optimales Porenvolumen", *Czeratzki* [10], gilt es zu differenzieren und zu erweitern.

Über die Fortschritte, die bei der Bearbeitung des Problems "Bodenverdichtung" aus landwirtschaftlicher Sicht insgesamt erzielt wurden, berichten *Barnes* u.a. [11]. Die Verfasser geben eine Übersicht über den Gesamtkomplex, aus der der Schluß gezogen werden kann, daß die weiter steigende Mechanisierung der Feldwirtschaft und die immer höheren Gewichte von Maschinen und Geräten das Problem "Bodenverdichtung" verschärfen werden. Deshalb werden von der Forschung nach wie vor Beiträge erwartet, die dem Landwirt eine Antwort auf die Frage geben sollen, wann und unter welchen Umständen mit Bodenverdichtungen zu rechnen ist, durch die das Pflanzenwachstum nachhaltig beeinträchtigt wird. Dabei muß dem Boden in seiner natürlichen Lagerung besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Entsprechende Arbeiten sollten auch in Zukunft im Labor und im Feld durchgeführt werden, weil damit einerseits unter reproduzierbaren Bedingungen gearbeitet werden kann, andererseits der Blick nicht dafür verlorenght, welche Zusammenschau aller Ergebnisse möglich ist.

## 2. Problemstellung und Ziel der Untersuchungen

In der Literatur des Bauingenieurs ist häufig von der "Zusammendrückbarkeit" bzw. der "Verdichtbarkeit" eines Bodens die Rede. Damit wird auf die Abhängigkeit zwischen dem Porenraum eines Bodens und der aufgetragenen Belastung hingewiesen. Für die "maximale Verdichtbarkeit" ist die Bodenfeuchte von ausschlaggebender Bedeutung, weshalb z.B. für den Straßenbau der "optimale Wassergehalt" mit Hilfe des Proctorversuchs ermittelt wird.

In der Landtechnik dient der Ackerboden als Fahrbahn für Maschinen und Geräte, wobei er entsprechend seinem Zustand unterschiedlichen Verformungen ausgesetzt ist, *Söhne* [4]. Dabei kommt der Bodenverdichtung die wesentlichste Bedeutung zu.

Aus landwirtschaftlich orientierter bodenphysikalischer Sicht müssen Bodenverdichtungen, die durch das Befahren hervorgerufen werden, im Zusammenhang mit der Änderung solcher Bodenfunktionen gesehen werden, die für das Pflanzenwachstum ausschlaggebend sind. Hierzu gehören die Wasserhaltefähigkeit und die Wasserdurchlässigkeit. Beide Bodeneigenschaften spielen für Böden, die leicht unter Wassermangel leiden bzw. für Standorte, die als staunäß bekannt sind, eine besondere Rolle. Die einen Bodenzustand aus der Sicht der Pflanze kennzeichnenden Größen sind das Porenvolumen und der für die Wasserführung und Durchlüftung maßgebende Anteil der groben Poren.

Wenn demnach die "Verdichtungsempfindlichkeit" von Ackerböden im folgenden untersucht wird, so soll das Verformungsverhalten – gemessen mit Hilfe der Porenziffer – zusammen mit damit verbundenen Änderungen von Funktionen dieser Böden betrachtet werden. Diese Betrachtungsweise knüpft an die Definition des Begriffs "Bodengefüge" nach *Altemüller* [12] an, nach der Gefügeveränderungen in gestaltlicher und funktioneller Hinsicht festzustellen sind.

Das Verformungsverhalten der ausgewählten Böden wird mit den Abhängigkeiten zwischen der Porenziffer und der Belastung bzw. der Belastungszeit wiedergegeben. Als wichtige Funktionen des Bodens, die durch die Änderung des Porensystems infolge Verdichtung betroffen sind, werden die Wasserhaltefähigkeit und die Wasserdurchlässigkeit untersucht. Damit stehen vier Zielfunktionen im Vordergrund:

1. die Verdichtungskurve
2. die Zeit-Zusammendrückungs-Kurve
3. die Wasser- (Saug-) Spannungskurve
4. die Abhängigkeit zwischen dem Wasserdurchlässigkeitsbeiwert und der Porenziffer.

Der Schwerpunkt muß dabei auf Bodenproben gelegt werden, wie sie in natürlicher Lagerung entnommen werden können, ohne auf den Vorteil gesiebter Aggregate ganz zu verzichten. Die Arbeit mit den homogeneren Gefügen von Modellen kann nämlich nur in seltenen Fällen die Untersuchung an natürlichen, gewachsenen Bodengefügen ersetzen. Oft zeigen die Ergebnisse solcher Bemühungen, daß die direkte Brücke nicht zu schlagen ist, weil Angaben, die das Modell gut beschreiben mögen (Korngrößen- und Aggregatgrößenzusammensetzung, Grad der Lockerheit, chemische und physikalische Eigenschaften u.a.), nicht ausreichen, um auf das Material eines Bodenprofils schließen zu können.

Theoretische, halbempirische oder empirische Ansätze werden zur Auswertung der Ergebnisse der Laboruntersuchungen herangezogen, um in jedem möglichen Fall die Meßwerte mit Hilfe einfacher Methoden der Statistik darstellen zu können. Diese sollen den Überblick über das Verhalten von Böden unter äußerer statischer Belastung erleichtern, einen besseren Vergleich der ausgewählten Böden hinsichtlich ihrer Verdichtungsempfindlichkeit ermöglichen und den Zugang zur Deutung von Konstanten der herangezogenen Gesetzmäßigkeiten eröffnen.

### 3. Versuchsdurchführung

#### 3.1 Beschreibung der Versuchsböden

Die Bodenproben stammen von Versuchsfeldern, die die Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode in Bodenstedt und Salzdahlum unterhält.

##### 3.1.1 Analysendaten der Böden

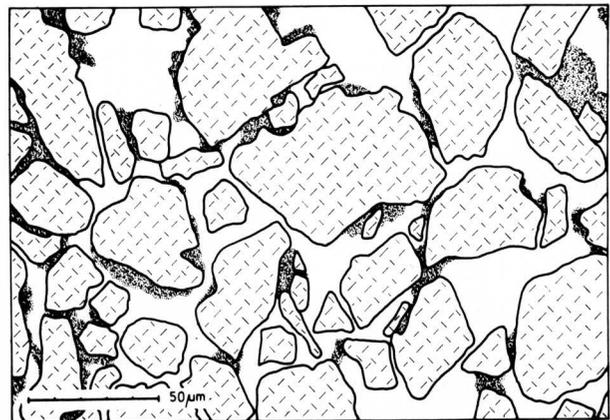
Die Profile hat *Altemüller* [13] beschrieben. In Bodenstedt (Boden A) handelt es sich um einen lehmigen Schluffboden. Die Schlämmanalyse weist mit etwa 1,5 % nur sehr wenig Sand aus und zeigt, daß der Tongehalt dieses Bodens bei etwa 12 % liegt. Vorherrschend ist mit 86 % der Schluff. Das Gesamtporenvolumen liegt in der Ackerkrume (1. Meßtiefe: 10 cm Tiefe) bei 44 Vol.-%, in der Schlepperradsohle (2. Meßtiefe: 30 cm Tiefe) bei 42 Vol.-% und im Unterboden (3. Meßtiefe: 40 cm Tiefe) bei 40 Vol.-%. Das C/N-Verhältnis beträgt 10, der pH-Wert (H<sub>2</sub>O) ca. 6,4.

In Salzdahlum (Boden B) handelt es sich um einen schluffigen Lehmboden. Nach dem Ergebnis der Schlämmanalyse macht der Sandgehalt in den ersten beiden Horizonten etwa 20 % aus und fällt in größerer Tiefe dort auf die Hälfte, wo Tongehalte um 40 % angetroffen werden können. Das Gesamtporenvolumen lag in der Ackerkrume (1. Meßtiefe: 10 cm Tiefe) bei 40 Vol.-%, in der Schlepperradsohle (2. Meßtiefe: 30 cm Tiefe) bei 38 Vol.-% und im Unterboden (3. Meßtiefe: 40 cm Tiefe) bei 42 Vol.-%. Das C/N-Verhältnis beträgt 9, der pH-Wert (H<sub>2</sub>O) ca. 7,7.

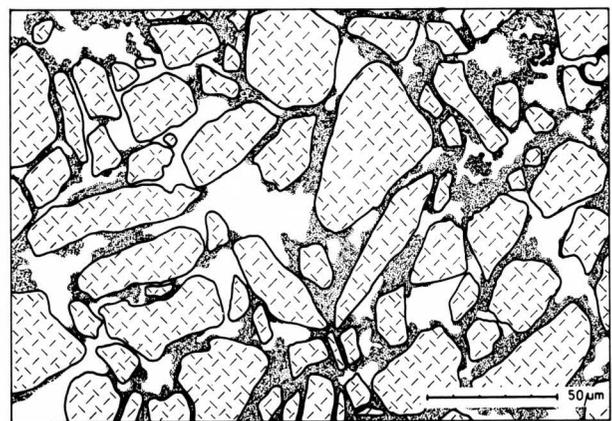
#### 3.1.2 Mikromorphologische Merkmale

Dünnschliffe<sup>1)</sup> von Proben in natürlicher Lagerung der beiden Böden geben einen guten Einblick in die räumliche Verteilung der Bodenbestandteile. Für die Verdichtungsempfindlichkeit eines Bodens scheint insbesondere die Kornpackung im Bereich des Mittel- und Grobschluffs von Bedeutung zu sein. Um dies deutlich zu machen, sind von Vergrößerungen der Dünnschliffbilder Strichzeichnungen angefertigt worden.

Für den lehmigen Schluffboden (Boden A) ist die Kornpackung vorherrschend aus Grobschluff aufgebaut. Die Zwischenräume sind entweder frei, **Bild 1**, oder auch teilweise mit Tonmasse gefüllt, **Bild 2**. Tonbeläge um die Grobschluffkörner sind selten, die Tonteilchen kaum orientiert.



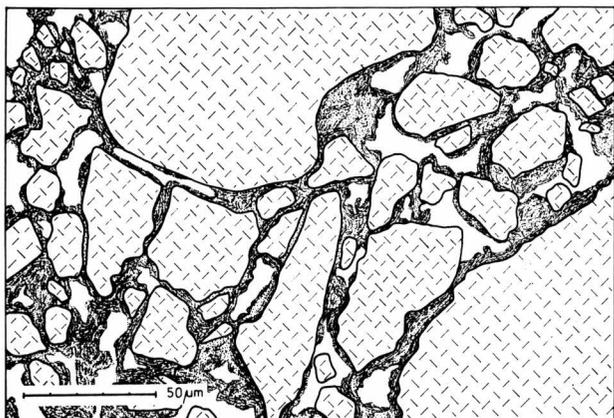
**Bild 1.** Kornpackung vorherrschend aus Grobschluff des Versuchsbodens A (Ackerkrume) vereinfacht gezeichnet: Korngefüge, tonige Matrix und Hohlräume (M: 400 : 1), tonarme Variante mit offenen Kornzwischenräumen.



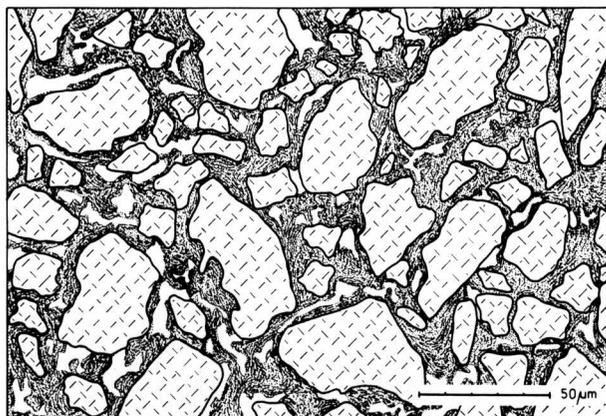
**Bild 2.** wie Bild 1, tonreiche Variante mit teilweise gefüllten Kornzwischenräumen.

<sup>1)</sup> Diese Untersuchungen sind Teil einer Zusammenarbeit zwischen Herrn Dr. *Altemüller* und dem Verfasser. Ziel ist, quantitative Aussagen über morphologische Merkmale von Böden machen zu können, um einen besseren Vergleich zwischen physikalischen und morphologischen Bodeneigenschaften zu ermöglichen.

Anders sieht dies bei dem schluffigen Lehm Boden (Boden B) aus. Zwar besteht die Kornpackung ebenfalls vorherrschend aus Grobschluff und hat etwa die gleiche Packungsdichte wie Boden A; die Kornzwischenräume sind jedoch stärker, Bild 3, oder gar vollständig mit Ton gefüllt, Bild 4. Aus den Originaldünnstliffbildern geht ferner hervor, daß sich ausgeprägte, gut orientierte Tonhüllen um die Körner gebildet haben und eine deutliche Kornbindung herstellen. Die Sandkörner sind in der Grundmasse aus Grobschluff und Ton so eingebettet, daß sie ohne gegenseitige Berührung bleiben. Damit kann kein Stützeffekt eintreten, woraus der Schluß gezogen wird, daß die Bedeutung des Sandanteils für die Gefügeeigenschaften nur gering ist.



**Bild 3.** Kornpackung vorherrschend aus Grobschluff des Versuchsbodens B (Ackerkrume) vereinfacht gezeichnet: Korngefüge, tonige Matrix und Hohlräume (M: 400 : 1), tonarme Variante mit teilweise gefüllten Kornzwischenräumen.



**Bild 4.** wie Bild 3, tonreiche Variante mit nahezu vollständig gefüllten Kornzwischenräumen.

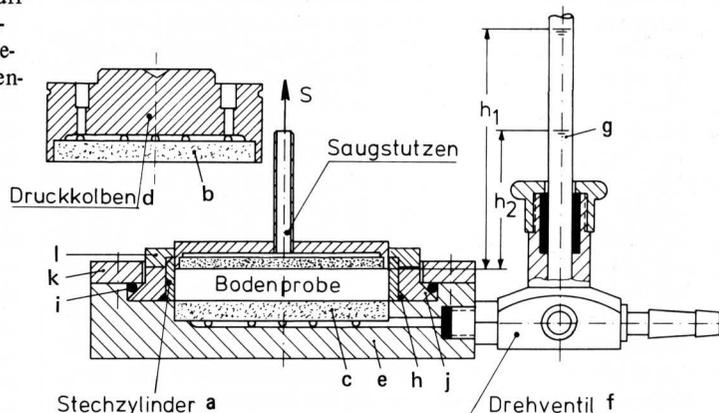
### 3.2 Die Versuchsanordnung

Die im Feld sorgfältig entnommenen Bodenproben ( $d = 100 \text{ mm}$ ,  $h = 16 \text{ mm}$ ) wie auch die vorbereiteten, gesiebten Modellböden werden zur Ermittlung der genannten Zielfunktionen 1, 2 und 4 in den Kompressions-Durchlässigkeits-Apparat nach *Casagrande* eingebaut und zur Bestimmung der Zielfunktion 3 auf keramische Saugplatten nach *Czeratzki* gebracht.

#### 3.2.1 Der Kompressions-Durchlässigkeits (KD)-Apparat und die Belastungseinrichtung

Im KD-Apparat wird eine zylindrische Bodenprobe durch die vertikal eingeleitete Belastung  $p$  zusammengedrückt, Bild 5. Dabei ist in waagerechter Richtung die Probe durch den Stechzylinder fest

eingespannt. Man spricht daher von einer verhinderten Seitendehnung. Dieser Spannungszustand unterscheidet sich sowohl von dem im einfachen Zylinderdruckversuch als auch im triaxialen Druckversuch und tritt strenggenommen im Feld weder unter Laufwerken noch unter der Einwirkung von Bodenbearbeitungswerkzeugen auf. Dort wird nämlich ein seitliches Ausweichen des Bodens nicht ganz verhindert.



**Bild 5.** Kompressions-Durchlässigkeits- (KD)-Apparat der Fa. Stenzel.

- |                  |                 |
|------------------|-----------------|
| a Stechzylinder  | g Meßpipette    |
| b,c Filtersteine | h O-Ringe       |
| d Druckkolben    | i Aufnahme ring |
| e Unterteil      | k Klemmring     |
| f Drehventil     | l Zentrier ring |

Dennoch sollte sich im Rahmen der eigenen Untersuchung die Größenordnung der einzuleitenden Normalspannungen nach den Flächendrücken in der Berührungsfäche zwischen Reifen und Boden richten. Diese liegen nach *Sitkei* [14] im niedrigen Druckbereich bis etwa  $1,4 \text{ daN/cm}^2$  und nach *Cerny* [15] bis  $2,5 \text{ daN/cm}^2$ . Nach *Söhne* [16] können unter Reifen von Ackerwagen bis etwa  $4,5 \text{ daN/cm}^2$  gemessen werden und unter den Stollen von Acker-schleppern auch höhere Werte.

Deshalb wurde eine Belastungseinrichtung verwendet, die es gestattet, Normalspannungen bis  $8 \text{ daN/cm}^2$  bei einem Probenquerschnitt von  $F = 80 \text{ cm}^2$  aufzubringen. Die Belastung erfolgte jeweils stufenweise, wobei die Druckzuwachsahl

$$\frac{p_{i+1}}{p_i} = 2$$

zugrundegelegt wurde.

#### 3.2.2 Die Absaugvorrichtung

Der Wassergehalt, bei dem die Belastung der Bodenprobe beginnen soll, wird mit Hilfe einer keramischen Platte nach *Czeratzki* [17] eingestellt. Sie ist in dem sog. Saugstutzen, s. Bild 5, eingekittet. Diese Platte läßt Unterdrücke bis etwa  $0,78 \text{ bar}$  zu, bevor neben Wasser auch Luft durch die Poren dringt und dann ein weiteres Absaugen nicht mehr möglich ist. Das Anlegen des Unterdruckes geschieht bis etwa  $0,1 \text{ bar}$  über eine hängende Wassersäule und darüber hinaus mit Hilfe einer Absaugvorrichtung.

Zur Bestimmung der Porengrößenverteilung vor und nach dem Belasten wird die genannte keramische Platte in Form der üblichen Saugplatte verwendet.

## 4. Versuchsergebnisse

### 4.1 Die Verdichtungsfunktion

Die Abhängigkeit des nach einer Belastung  $p$  in der Bodenprobe verbleibenden Porenraumes, über den zugehörigen Werten von  $p$  aufgetragen, soll als Verdichtungsfunktion bezeichnet werden. Diese Beziehung gibt einen indirekten Einblick in das Verhalten

des gestaltlichen Bodengefüges gegenüber eingeleiteten Normalspannungen. Die Form dieser Verdichtungskurven muß im Zusammenhang mit den Beanspruchungen gesehen werden, denen die Gefügeelemente in der Probe ausgesetzt sind. Druck, Schub und Biegung überlagern einander. Die Stabilität der Gefügeelemente und die Ausbildung des Porensystems werden neben den üblichen Größen, mit denen ein Boden beschrieben wird (Textur, Wassergehalt, Kohäsion, Winkel der inneren Reibung u.a.), die Koeffizienten der Verdichtungsfunktion beeinflussen.

In der Literatur ist eine ganze Reihe von mathematischen Ansätzen für die Verdichtungskurve zu finden. In Tafel 1 ist eine Auswahl zusammengestellt.

Gl. (5) hat gegenüber den anderen genannten Gleichungen den Vorteil einer waagerechten Asymptoten, *Kezdi* [18]. Diese muß vorhanden sein, weil zum einen der Zustand, in dem die Porenziffer  $e$  gleich Null ist nur bei sehr hohen Drücken und auch nur theoretisch möglich wäre, zum anderen in diesem Fall nicht mehr von "Boden" gesprochen werden könnte<sup>2)</sup>.

Dieses anschaulichen Vorteils wegen ist bei der Auswertung der eigenen Meßergebnisse Gl. (5) benutzt worden, obgleich mit ihr der mathematische Aufwand höher wird, da sie keine linearisierende Transformation zuläßt.

Gleichung Nr.	Mathematischer Ansatz für die Verdichtungskurve	Autor
(1)	$s' = a p^k$	<i>Moussa</i>
(2)	$s' = a \left(\frac{p}{P_1}\right)^k + c$	<i>Kotzias</i>
(3)	$e = e_0 - C_c \log \frac{p + p_0}{p_0}$	<i>Terzaghi</i>
(4)	$n = -a \ln p + c$	<i>Söhne</i>
(5)	$e = a + b \exp(c p)$	<i>Kezdi</i>

Tafel 1. Einige mathematische Ansätze für die Verdichtungskurve.

Bild 6 enthält als Beispiel die Meßwerte und die Ausgleichskurven für drei Einzelproben des Bodens A in natürlicher Lagerung. Die Kurven, die zur 1. bzw. 3. Meßtiefe gehören, verlaufen nach Berücksichtigung der unterschiedlichen Ausgangsporenziffer  $e_0 = e_{p=0}$  ähnlich, während die Abnahme der Porenziffer bei der Probe aus der 2. Meßtiefe geringer ist. Wegen der vorhandenen Schlepperradsole, die durch stetes Fahren in der Furche beim Pflügen entstanden ist, wird die daraus entnommene Bodenprobe bei gleicher Belastung also weniger verdichtet, *Moreno* u.a. [19]. Der Verlauf der Verdichtungskurven des Bodens B kann ähnlich interpretiert werden, Bild 7. Auch bei ihm liegt in der 2. Meßtiefe eine Schlepperradsole.

Nicht nur aus den gezeigten Ergebnissen für Einzelproben, sondern auch aus allen Serienversuchen geht anhand der Verdichtungskurven die höhere Empfindlichkeit des Bodens B gegenüber statischen Belastungen hervor [1]. Das bei gleicher Belastung  $p$  durchgeführte Porenzifferintervall  $\Delta e$  (Wert von  $b$  in Gl. (5)) ist stets größer und die minimale Porenziffer  $e_{\min}$  (Wert von  $a$  in Gl. (5)) immer kleiner als bei Boden A, Tafel 2.

Wie die Verdichtungskurven durch die zwei besonders wichtigen Einflußgrößen Ausgangsporenvolumen und Wassergehalt beeinflusst werden, soll anhand weniger Beispiele skizziert werden.

<sup>2)</sup> An dieser Stelle sei Herrn Prof. Dr.-techn. A. Kezdi, TU Budapest für manche persönliche Mitteilung herzlich gedankt.

Das Ausgangsporenvolumen entspricht dem Porenvolumen bei der Probenahme, wenn eine Quellung durch die notwendige Wassersättigung im Labor gering bzw. vernachlässigbar ist. Die gemessenen Werte schwanken für die Proben in natürlicher Lagerung des Bodens A je nach Meßtiefe um etwa 4 Vol.-%, für die des Bodens B um 5 ÷ 6 Vol.-%.

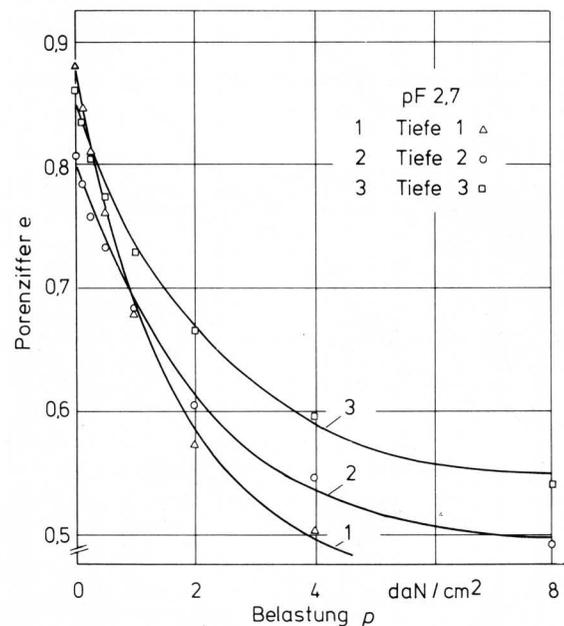
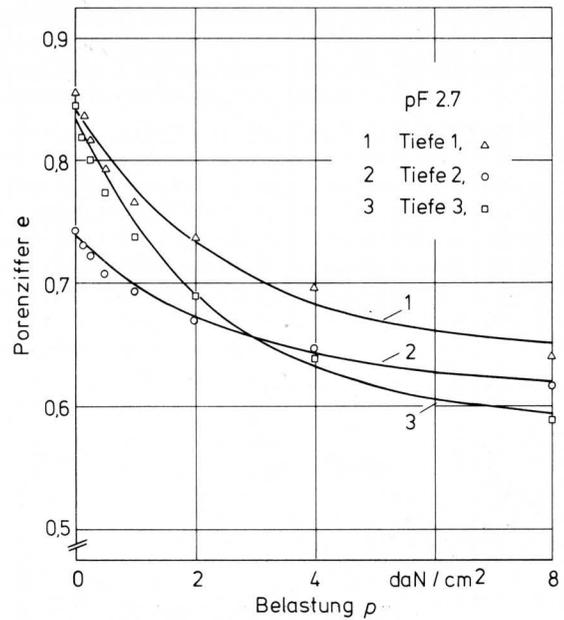
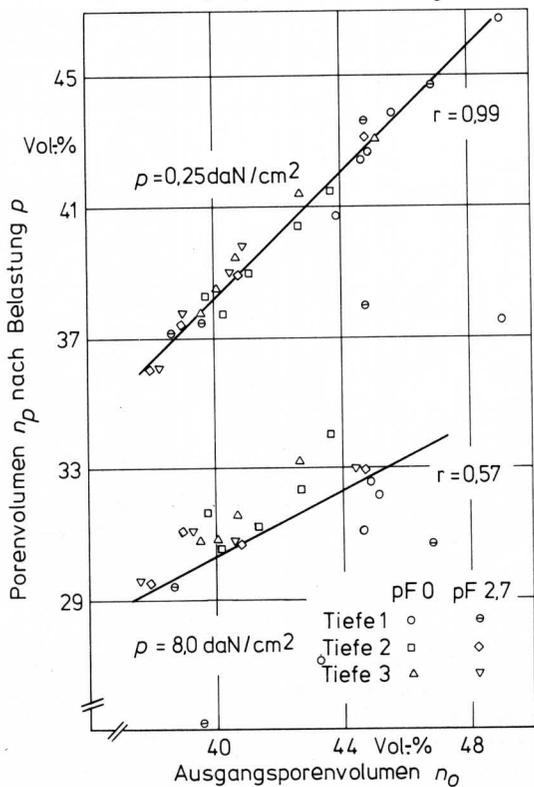
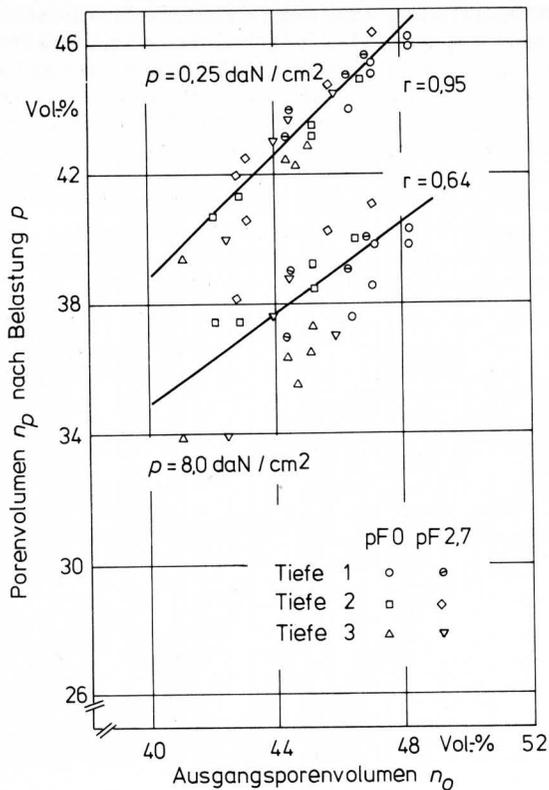


Bild 6 und 7. Porenziffer in Abhängigkeit von der Belastung; Vergleich zwischen den gemessenen Werten und den Ausgleichskurven bei einem Wassergehalt entsprechend pF 2,7.

Bild 6 für Einzelproben des Versuchsbodens A  
Bild 7 für Versuchsboden B

	$\bar{a} \pm m_{\bar{a}}$	$\bar{b} \pm m_{\bar{b}}$	$\bar{c} \pm m_{\bar{c}}$
Boden A	0,633 ± 0,017	0,191 ± 0,008	- 0,394 ± 0,029
Boden B	0,455 ± 0,057	0,280 ± 0,055	- 0,513 ± 0,041

Tafel 2. Beispiele (1. Tiefe, pF 2,7) für die Werte der Koeffizienten  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$ ,  $\bar{c}$ , und deren mittlere Fehler in der Verdichtungskurve  $e = \bar{a} + \bar{b} \exp(\bar{c} p)$ .



**Bild 8 und 9.** Porenvolumen  $n_p$  nach der Belastung  $p$  in Abhängigkeit vom Ausgangsporenvolumen  $n_0$  für Proben in natürlicher Lagerung.

Bild 8 Boden A

Bild 9 Boden B

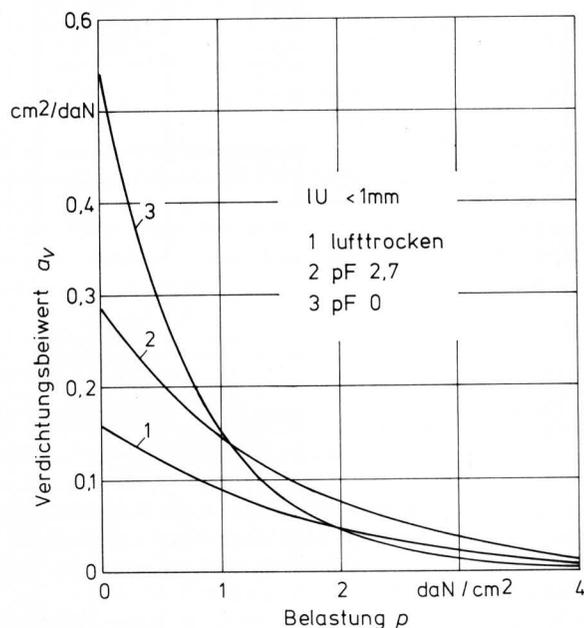
Bild 8 zeigt die Beziehung zwischen dem Porenvolumen  $n_p$  nach der Belastung  $p$  und dem Ausgangsporenvolumen  $n_0$  für Proben des Bodens A. Die Regressionsgeraden sind jeweils für die Belastungsstufen  $p = 0,25 \text{ daN/cm}^2$  und  $p = 8,0 \text{ daN/cm}^2$  ermittelt worden. Positive Regressionskoeffizienten  $b$  und zum Teil hohe

Korrelationskoeffizienten  $r$  weisen darauf hin, daß das verbleibende Endporenvolumen  $n_p$  um so höher ist, je höher das Ausgangsporenvolumen  $n_0$  war. Mit steigender Belastung werden die Ausgleichsgeraden jedoch stets flacher. Am deutlichsten zeigt der Boden B dieses Verhalten, das an den sehr unterschiedlichen Steigungen der Geraden in Bild 9 abzulesen ist. Wagt man eine Extrapolation zu Werten  $p > 8 \text{ daN/cm}^2$ , so wäre die in der Literatur zu findende Feststellung zu bestätigen, nach der sich trotz unterschiedlichen Ausgangsporenvolumens nach dem Befahren von Ackerflächen etwa gleiches Endporenvolumen einstellt, Feuerlein [20].

Die Bedeutung des Wassergehaltes für die Verdichtungskurven ist bekannt und soll deshalb nur kurz angesprochen werden. Hierzu wird der Verdichtungsbeiwert

$$a_v = - \frac{\Delta e}{\Delta p}$$

herangezogen, der als Quotient aus Porenziffer- und Belastungsänderung ermittelt wird. Der Differentialquotient läßt sich für die Ausgleichskurven berechnen und als Funktion der Belastung  $p$  auftragen. In Bild 10 ist dies für Aggregate  $> 1 \text{ mm}$  des Bodens A geschehen. Die Kurve der lufttrockenen Proben liegt bis etwa  $2 \text{ daN/cm}^2$  am tiefsten, die mit dem höchsten Wassergehalt (pF 0) weist auf den stärksten Abfall der Verdichtungskurven im niedrigen Druckbereich hin. Der sehr durchlässige Boden reagiert also mit zunehmendem Wassergehalt empfindlicher.



**Bild 10.** Verdichtungsbeiwert in Abhängigkeit von der Belastung für gesiebte Aggregate  $< 1 \text{ mm}$  des Bodens A.

#### 4.2 Die Zeit-Zusammendrückungs-Kurve

Das Ausmaß der Verdichtung eines Bodens hängt u.a. von der Größe der wirkenden Spannung und der Dauer ihrer Einwirkung ab. Für ungesättigte Böden weist Kezdi [18] mit seiner Konsolidierungsgleichung darauf hin, daß Dreiphasensysteme durch eine plötzliche und eine zeitabhängige Setzungskomponente charakterisiert sind. Das Verhältnis dieser beiden Anteile ist für die Bodenverdichtung durch landwirtschaftlichen Fahrverkehr wichtig, um die Bedeutung der in situ nur kurzen Belastungszeiten abschätzen zu können.

Die Zeit-Zusammendrückungs-Kurve erhält man, wenn die Setzung  $s$  des Bodens bei konstanter Belastung  $p$  zu verschiedenen Zeitpunkten  $t_i$  gemessen wird. Es ergeben sich bei logarithmischer Auftragung der Zeit  $t$  je nach Bodenart gerade oder s-förmige Linien.

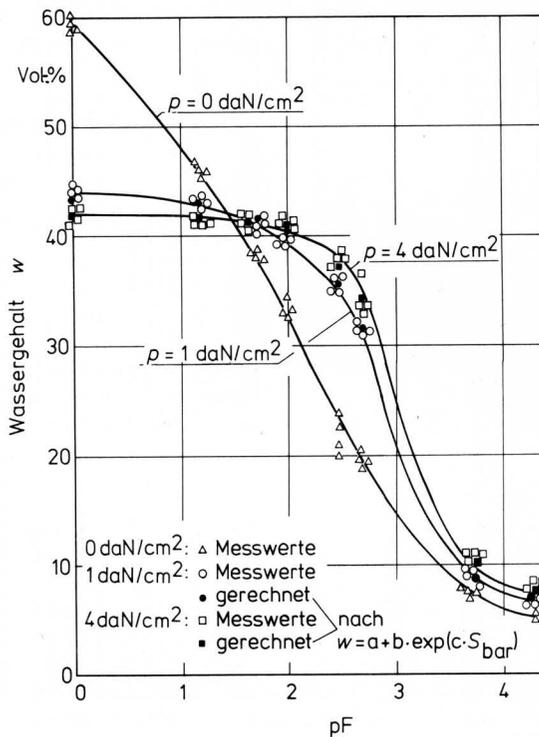
Die Ergebnisse seien hier nicht im einzelnen dargestellt, sondern nur zusammengefaßt. Es wurde deutlich, daß der plötzliche Anteil der Zusammendrückung gegenüber dem zeitabhängigen Anteil die dominierende Rolle spielt. Sowohl für die Belastungsphase als auch für die Entlastungsphase ändert sich der plötzliche Anteil mit steigendem Flächendruck stärker als der zeitabhängige Anteil der Zusammendrückung. Demnach sollten sich unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten landwirtschaftlicher Maschinen – innerhalb der in der Praxis üblichen Grenzen – auf das Ausmaß der entstehenden Bodenverdichtung bei mittlerem Wassersättigungsgrad kaum auswirken.

Am Rande sei erwähnt, daß das zeitliche Verhalten eines Bodens unter einer Belastung mit Konsolidierungsgleichungen beschrieben werden kann und daß die zu ermittelnden Koeffizienten der zugehörigen Ausgleichsfunktion Richtwerte darstellen, die bei der Simulation z.B. mit dem Analogrechner Ausgangspunkt für die Untersuchungen sein können.

### 4.3 Die Wasser- (Saug-) Spannungskurve

Die Wasserspannungskurve stellt die Abhängigkeit des Wassergehalts  $w$  eines Bodens von der angelegten Saugspannung  $S$  dar. Wird die  $S$ -Achse logarithmisch geteilt, weil damit die wichtigen kleinen Wasserspannungswerte gegenüber den hohen auseinandergezogen werden, so spricht man von der  $pF$ -Kurve. Sie gibt Auskunft über die Wasserbindungsintensität des Bodens und ermöglicht darüber hinaus, die Porengrößenverteilung – hier vor und nach einer Belastung – zu bestimmen.

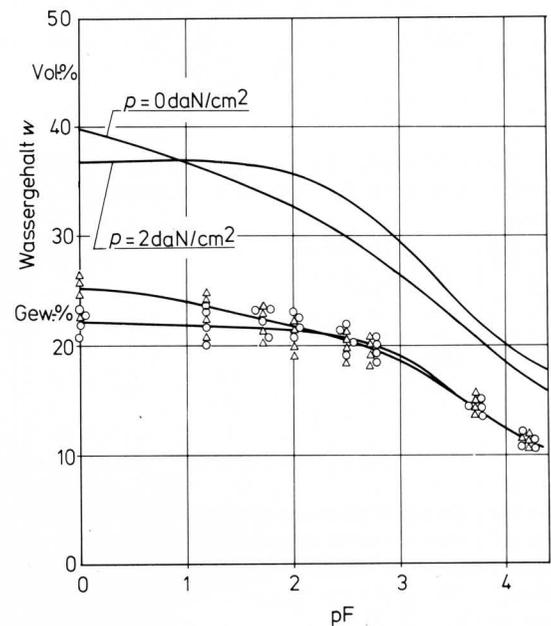
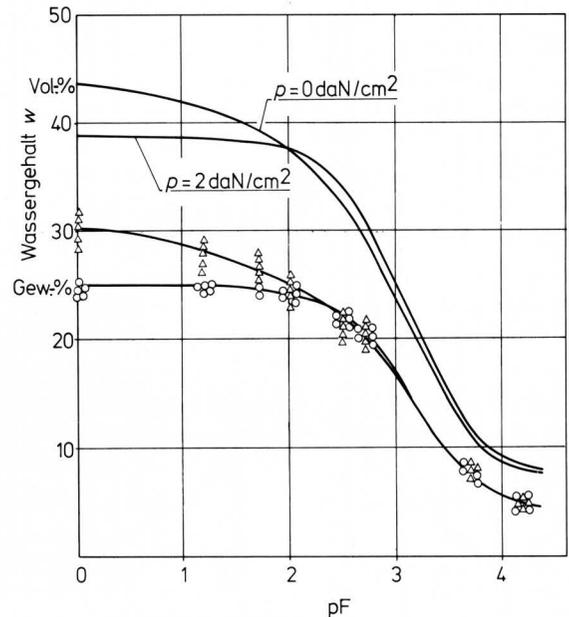
Die  $pF$ -Kurven in Bild 11 gelten für Aggregate  $< 1$  mm des Bodens A. Der Wassergehalt des locker eingefüllten Modellbodens fällt mit zunehmendem  $pF$ -Wert stark ab. Die Belastung mit 1 und 4  $daN/cm^2$  macht sich im niedrigen  $pF$ -Bereich durch eine starke Abnahme, im mittleren  $pF$ -Bereich durch eine Zunahme des Wassergehalts  $w$  [Vol.-%] bemerkbar. Ein empirischer Ansatz bringt nur für die verdichteten Proben eine gute Anpassung an die Meßwerte.



**Bild 11.** Wassergehalt  $w$  in Abhängigkeit von der Saugspannung für nichtgepreßte ( $0 daN/cm^2$ ) und gepreßte ( $1$  bzw.  $4 daN/cm^2$ ) Aggregate  $< 1$  mm des Bodens A.

Für Proben in natürlicher Lagerung sind die Differenzen der Wassergehalte insbesondere bei mittleren und hohen  $pF$ -Werten nicht so groß. Als Beispiel hierfür möge Bild 12 für Boden A und Bild 13 für Boden B dienen. Letzterer reagiert auf Belastungen etwas empfindlicher, was aus den größeren Wassergehaltsdifferenzen im Bereich  $pF$  1 bis  $pF$  3 zu schließen ist. Bei Auftragung des Wassergehalts  $w$  [Gew.-%] liegen die Kurven ab  $pF$  2 enger zusammen, die Wasserbindung pro Masseneinheit des Bodens wird also nur wenig erhöht. Ab  $pF$  3,2 ist der Wassergehalt nicht mehr gefüge-, sondern im wesentlichen nur noch texturbedingt.

Die  $pF$ -Kurven gestatten es, Aussagen über die durch vertikale Belastung hervorgerufene Änderung der Porengrößenverteilung zu machen. Unter Berücksichtigung des Kapillaritätsgesetzes kann der Abszisse einer  $pF$ -Kurve nämlich eine zweite hinzugefügt werden, die als Einteilung den Porendurchmesser  $d$  trägt. Hiermit werden die Verhältnisse in einer Probe zwar stark idealisiert, aber sehr anschaulich wiedergegeben. Die Änderung der Porengrößenverteilung durch niedrige, statische Belastung soll unter zwei verschiedenen Aspekten betrachtet werden.



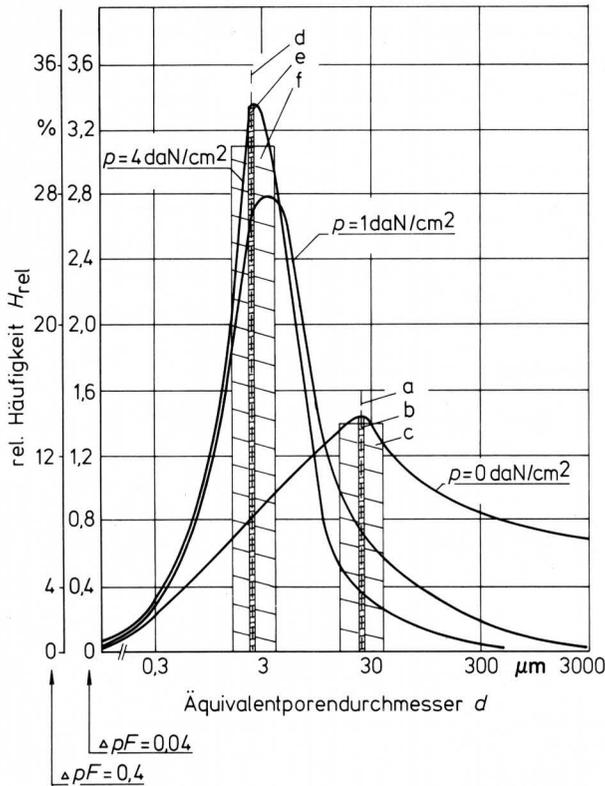
**Bild 12 und 13.** Wassergehalt  $w$  in Abhängigkeit von der Saugspannung für Proben in natürlicher Lagerung (1. Tiefe). Belastungsstufen  $p = 0$  und  $2 daN/cm^2$ .

Bild 12 Versuchsboden A    Bild 13 Versuchsboden B

#### 4.3.1 Zusammensetzung des Gesamtporenvolumens vor und nach der Belastung

Zur Beantwortung dieser Frage wird die pF-Kurve als Summenhäufigkeitskurve angesehen, indem ihr Schnittpunkt mit der Ordinate gleich 100 % (Gesamtporenvolumen) gesetzt wird. Durch graphische Differentiation erhält man die Häufigkeitsverteilung, nach der Unterteilung in gleichbreite pF-Klassen die relative Häufigkeit  $H_{rel}$  der zugehörigen Porenbereiche.

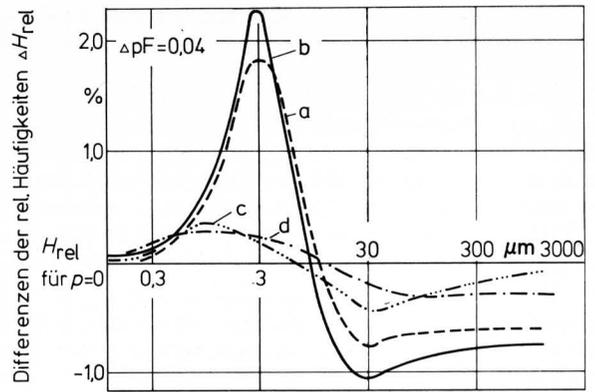
**Bild 14** stellt die Verhältnisse für die Aggregate < 1 mm des Bodens A dar. Das Maximum der Häufigkeitskurven verschiebt sich mit der Belastung von 0 auf 1 daN/cm<sup>2</sup> stark zu kleinerem Porendurchmesser d. Die Erhöhung auf p = 4 daN/cm<sup>2</sup> läßt die Häufigkeit der am meisten vorkommenden Poren ansteigen, der Durchmesser dieser Poren verringert sich kaum.



**Bild 14.** Relative Häufigkeit der Porendurchmesser für unbelastete und verschieden belastete Bodenproben aus Aggregaten < 1 mm des Bodens A.

- a pF 2,1 ± 0,2 (d = 15,1 ÷ 38,0 μm)
- b pF 2,1 ± 0,02 (d = 22,9 ÷ 25,1 μm)
- c pF 2,1 (d = 24,0 μm)
- d pF 3,1 ± 0,2 (d = 1,5 ÷ 3,8 μm)
- e pF 3,1 ± 0,02 (d = 2,3 ÷ 2,5 μm)
- f pF 3,1 (d = 2,4 μm)

In **Bild 15** sind die Differenzen der relativen Häufigkeiten der verschiedenen Porendurchmesser dargestellt, wie sie durch die vorgenommene Kompression verursacht werden. Der Wert 0 der Ordinate steht für den Vergleichswert  $H_{rel, p=0}$ , so daß die Kurven die Zunahme der Poren bis etwa 8 μm und deren Abnahme im Bereich bis etwa 2000 μm deutlich machen. Die Böden in natürlicher Lagerung reagieren erwartungsgemäß nicht so stark wie die gesiebten Aggregate < 1 mm. Festzuhalten bleibt, daß der Anteil der Poren > 100 μm infolge einer Belastung von 2,0 daN/cm<sup>2</sup> beim Boden B in natürlicher Lagerung stärker vermindert wird als beim Boden A.

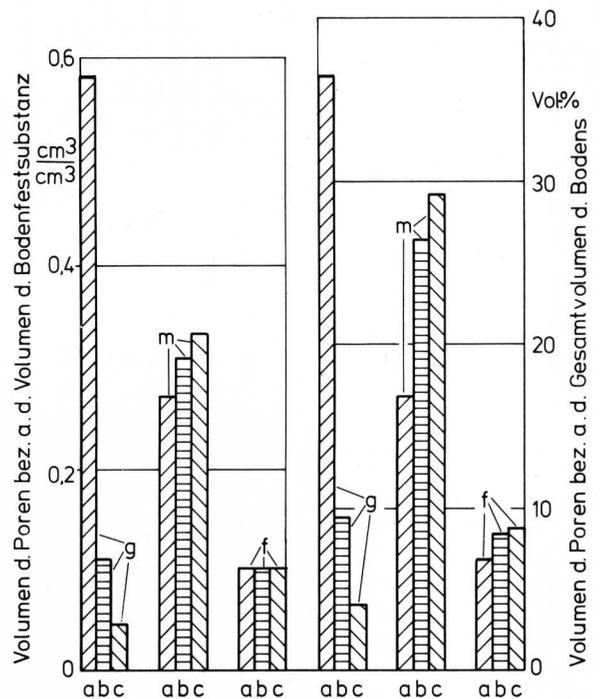


**Bild 15.** Differenzen der relativen Häufigkeiten zwischen belasteten und nichtbelasteten Bodenproben in Abhängigkeit vom Porendurchmesser.

- a Boden A < 1 mm, p = 1 daN/cm<sup>2</sup>
- b Boden A < 1 mm, p = 4 daN/cm<sup>2</sup>
- c Boden A nat. Lagerung (1. Tiefe), p = 2 daN/cm<sup>2</sup>
- d Boden B nat. Lagerung (1. Tiefe), p = 2 daN/cm<sup>2</sup>

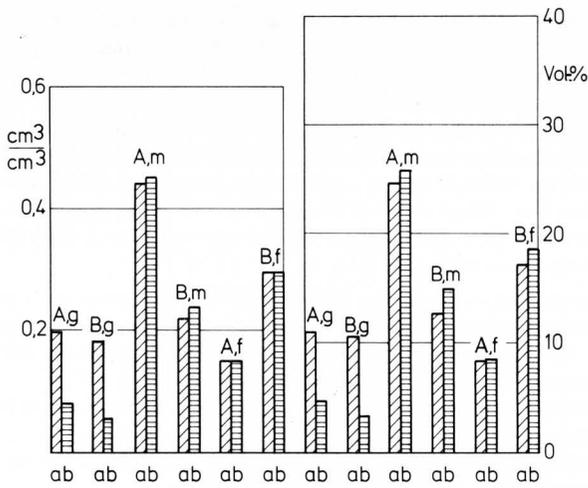
#### 4.3.2 Änderung der mengenmäßigen Porenverteilung durch statische Belastung

Zur Beantwortung dieser Frage wird die Porenziffer e, die das Verhältnis des Volumens aller Poren zum Volumen der Bodenfestsubstanz darstellt, in Bereiche unterteilt, die hier der Übersicht wegen nur die Grob-, Mittel- bzw. Feinporen umfassen, obgleich die Unterschiede zwischen Boden A und Boden B erst durch eine feinere Unterteilung deutlich werden. **Bild 16** (linker Teil) zeigt Ergebnisse für Aggregate < 1 mm des Bodens A. Die Grobporen d > 10 μm sind bis 4 daN/cm<sup>2</sup> stark vermindert, die Mittelporen (10 μm > d > 0,2 μm) ein wenig vermehrt und der Anteil der Feinporen (d < 0,2 μm) gar nicht verändert worden. Bezieht man die Porenanteile auf das durch Belastung veränderte Gesamtvolumen des Bodens, **Bild 16** rechter Teil, so kann dies zu falschen Interpretationen der Ergebnisse führen. Wiederum sind die jeweiligen Differenzen für Böden in natürlicher Lagerung geringer, **Bild 17**.



**Bild 16.** Änderung der Porengrößenverteilung durch Belastung, Boden A, Aggregate < 1 mm.

- a p = 0 daN/cm<sup>2</sup>
- b p = 1 daN/cm<sup>2</sup>
- c p = 4 daN/cm<sup>2</sup>
- g Grobporen (> 10 μm)
- m Mittelporen (10 ÷ 0,2 μm)
- f Feinporen (< 0,2 μm)

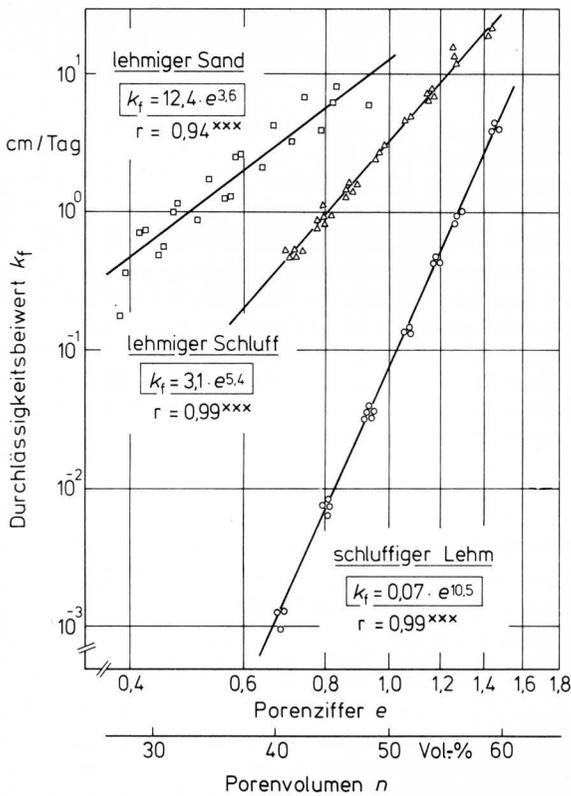


**Bild 17.** Änderung der Porengrößenverteilung durch Belastung, Böden in natürlicher Lagerung.

A Boden A            g Grobporen (> 10 μm)  
 B Boden B            m Mittelporen (10 ± 0,2 μm)  
 a p = 0 daN/cm<sup>2</sup>    f Feinporen (< 0,2 μm)  
 b p = 2 daN/cm<sup>2</sup>

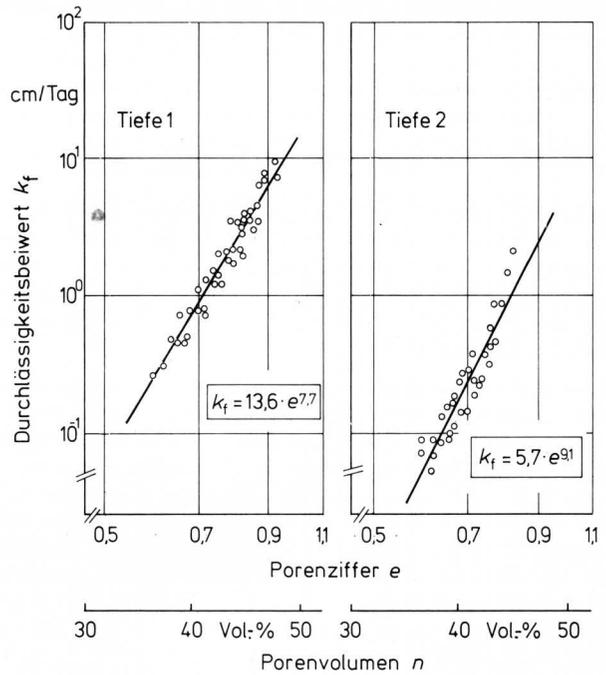
**4.4 Der Durchlässigkeitsbeiwert als Funktion der Porenziffer**

Da das Porensystem durch Aufbringen von Belastungen stufenweise verändert wurde (s. 3.2.1), konnte jeweils der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  bei Wassersättigung bestimmt und der entsprechenden Porenziffer  $e$  zugeordnet werden. Schon die Ergebnisse für gesiebte Böden, Bild 18, legen es nahe, die Steigung der in doppeltlogarithmischer Darstellung entstehenden Geraden als ein weiteres Maß für die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden zu benutzen. Je flacher die Geraden ermittelt werden, um so geringer ist die Änderung der Durchlässigkeit unter dem Einfluß einer Belastung.

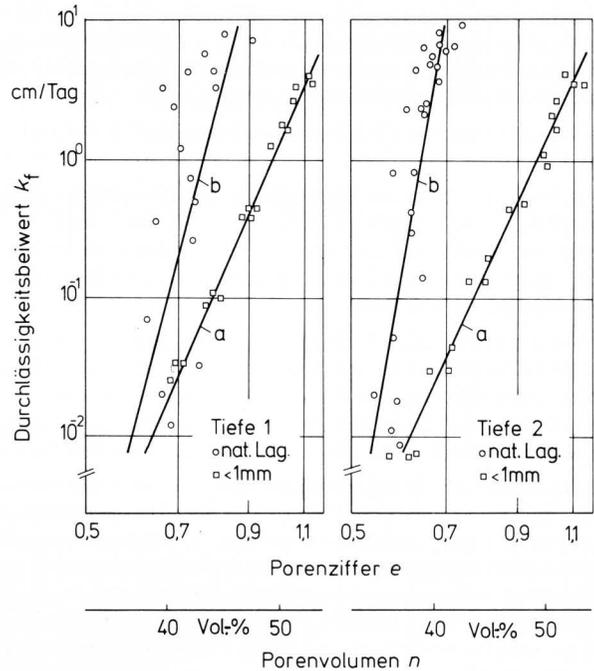


**Bild 18.** Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Porenziffer für gesiebte Aggregate < 1 mm dreier Böden.

Vergleicht man die beiden Böden, Bild 19 und 20, so ist festzustellen, daß für Boden B die Wasserdurchlässigkeit bei der hohen Porenziffer  $e = 1$  stets wesentlich höher ist als bei Boden A, sie jedoch für etwa gleiches Porenzifferintervall stärker abnimmt. In Tafel 3 ist dieses Ergebnis anhand der a- bzw. b-Werte zusammengefaßt. Allerdings sind für Boden B sehr große Streuungen zu verzeichnen, was als Kennzeichen für den Gefügebau angesehen wird.



**Bild 19.** Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Porenziffer für Bodenproben in natürlicher Lagerung zweier Horizonte des Bodens A.



**Bild 20.** Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Porenziffer für Bodenproben zweier Horizonte des Bodens B.

a gesiebte Aggregate < 1 mm  
 b Proben natürlicher Lagerung

	a	$b \pm m_b$
Boden A	13,6	$7,7 \pm 0,3$
Boden B	99,0	$17,9 \pm 2,6$

Tafel 3. Beispiele (1. Tiefe) für die Werte der Koeffizienten a, b in der Beziehung zwischen Durchlässigkeitswert  $k_f$  und Porenziffer e:  $k_f = a + e^b$ .

## 5. Diskussion der Ergebnisse

Zur Untersuchung der Verdichtungsempfindlichkeit zweier Ackerböden sollte das Verformungsverhalten der Böden und die dadurch hervorgerufene Änderung bestimmter Bodenfunktionen ermittelt werden. Zu diesem Zweck sind Bodenproben in natürlicher Lagerung entnommen und im Labor mit verschiedenen physikalischen Methoden untersucht worden.

Boden A ist ein lehmiger Schluffboden und seinem Gefügebau nach in der Ackerkrume (1. Meßtiefe) als mäßig kohärent, in der Schlepperradsohle (2. Meßtiefe) als dicht und geschlossen und im Unterboden (3. Meßtiefe) als feinporig und weniger dicht anzusprechen. Boden B ist ein schluffiger Lehm Boden. Ihn prägen in der Ackerkrume (1. Meßtiefe) scharfkantige, dichte Polyeder. Die Schlepperradsohle (2. Meßtiefe) liegt ziemlich dicht und kompakt, wird aber durch feine Spalten in scharfkantige Polyeder gegliedert. Der durchgehend feinporige Unterboden (3. Meßtiefe) setzt sich aus gleichmäßig feinpolyedrischen Aggregaten zusammen, zwischen denen ebenfalls zahlreiche Risse zu finden sind.

Dieser unterschiedliche Aufbau des Makrogefüges ist neben der Körnungsart entscheidend für die Empfindlichkeit hinsichtlich einer Bodenverdichtung infolge des landwirtschaftlichen Fahrverkehrs.

Das Verformungsverhalten der Böden wird durch die Verdichtungskurven wiedergegeben. Die Ausgleichskurven, die zur 1. bzw. 3. Meßtiefe des Bodens A gehören, verlaufen nach Berücksichtigung der unterschiedlichen Ausgangsporenziffer ähnlich, während die Abnahme der Porenziffer bei den Proben der 2. Meßtiefe geringere Werte aufweist. Wegen der vorhandenen Schlepperradsohle werden diese bei gleicher Belastung also weniger verdichtet.

Die Verdichtungskurven des Bodens B können ähnlich interpretiert werden.

Vergleicht man die Kurven beider Böden, so wird die höhere Empfindlichkeit des Bodens B gegenüber statischen Belastungen im Bereich von 0 bis 8 daN/cm<sup>2</sup> deutlich. Das bei gleicher Belastung durchgeführte Porenzifferintervall ist stets größer und die minimale Porenziffer immer kleiner.

Die Erklärung dafür wird in dem Gefügebau gesehen. Leitbahnen für die Wasserführung und Durchlüftung, wie die nicht orientierten feinen Risse und Spalten des Bodens B, brechen unter Last einwirkung schnell zusammen, womit im wesentlichen der Grobporenanteil betroffen wird. Solche Leitbahnen fehlen dem Boden A.

Vergleicht man den Anteil der groben Poren vor und nach einer Belastung von  $p = 2 \text{ daN/cm}^2$  (Bild 17, rechter Teil) mit den von Czeratzki [10] angegebenen Schwellwerten, die als Richtwerte für 'optimales Pflanzenwachstum' angesehen werden, so wird die Auswirkung der relativ geringen Belastung deutlich. Für den Boden A werden 10 Vol.-% an groben Poren als optimal angesehen, die bei den nicht verdichteten Proben mit etwa 12 Vol.-% noch vorhanden waren. Nach der Belastung sind jedoch nur 4 Vol.-% an groben Poren ermittelt worden. Noch ungünstiger fällt der Vergleich für Boden B aus. Der Anteil der groben Poren nach der Belastung lag um etwa 10 Vol.-% unter den als optimal erkannten 12 Vol.-%. Der Gasaustausch kann bei solchen Werten beeinträchtigt sein, was sich dann wachstumsschädlich auswirkt.

In enger Beziehung zu dem Grobporenanteil steht die Wasserdurchlässigkeit bei Sättigung, Hartge [21]. Ihre Abhängigkeit von der Porenziffer stellt einen weiteren Hinweis für die höhere Empfindlichkeit des Bodens B gegenüber Druck dar, Tafel 3. Die mit Hilfe der pF-Kurve ermittelte unterschiedliche Porenverteilung, Bild 15, ist dafür ausschlaggebend. Nach der schnellen Vernichtung der groben Poren findet das Wasser in der Probe des Bodens B nur langsam seinen Weg, während ihm auch ein großer Teil des Intergranularraumes zwischen den Grobschluffkörnern des Bodens A zur Verfügung stehen kann, Bild 1 bis 4.

Ohne bislang ausreichendes quantitatives Zahlenmaterial zur Verfügung zu haben, wird vermutet, daß bei schluffreichem Material die Veränderungen im Porensystem durch niedrige statische Verdichtung überwiegend den Sekundärporenbereich betreffen, Sommer u.a. [22]. Eine Aussage darüber, ob auch Primärporen im Intergranularraum betroffen sind, wird allerdings dadurch erschwert, daß die Körner in natürlicher Lagerung schon vor dem Versuch häufig in recht unterschiedlicher Packungsart liegen.

Alle Untersuchungen weisen übereinstimmend den schluffigen Lehm Boden (Boden B) gegenüber dem lehmigen Schluff Boden (Boden A) als verdichtungsempfindlicher aus. Für die Befahrbarkeit dieses Bodens bedeutet dies, daß gerade nach frostarmen Winterperioden Vorsicht geboten ist. Der Luftgehalt kann dann bei ihm rasch zum begrenzenden Wachstumsfaktor werden. Hinzu kommt die bekannt schlechte Regenerationsfähigkeit des schweren Bodens, da das kompakte Innengefüge erst durch mehrfachen Angriff der Witterungsfaktoren wie Befuchtung, Trocknung und Frost wieder aufgeschlossen werden kann.

## 6. Zusammenfassung

Der Einsatz immer leistungsstärkerer Kraft- und Arbeitsmaschinen bringt der Feldwirtschaft und hier insbesondere der Bodenbearbeitung große Vorteile. Andererseits verursacht die Übertragung hoher Zugkräfte im Boden Schub- und Normalspannungen, die zu schädlichen Bodenverdichtungen führen können. Über die Empfindlichkeit von Böden gegenüber solchen Verdichtungen können nur Aussagen gemacht werden, wenn Gefügeveränderungen in gestaltlicher und funktioneller Hinsicht untersucht werden. Deshalb wird am Beispiel zweier Böden deren Verhalten gegenüber statischen Belastungen mit Hilfe von vier ausgewählten Zielfunktionen verglichen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen weisen übereinstimmend den schluffigen Lehm (Boden B), der auch als schwerer bearbeitbar gilt, gegenüber dem lehmigen Schluff (Boden A) als verdichtungsempfindlicher aus. Die unterschiedliche Körnungsart spielt dabei eine Rolle. Ausschlaggebender ist jedoch der Gefügebau.

Mikromorphologische und bodenphysikalische Untersuchungen tragen damit gleichermaßen zur Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden bei. Die Darstellung der Ergebnisse in mathematischen Ausdrücken erleichtert den Überblick über das Verhalten eines Bodens, gestattet einen besseren Vergleich verschiedener Böden und ermöglicht die Deutung von Konstanten der herangezogenen Gesetzmäßigkeiten.

### Verwendete Formelzeichen

$a_v$	Verdichtungsbeiwert
a, b, c, k	Beiwerte
$\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$	Mittelwerte von a, b, c
b	Regressionskoeffizient
$C_c$	Kompressions-Index
d	Äquivalentporendurchmesser
e	Porenziffer
$\Delta e$	Porenzifferintervall
$e_{\min}$	minimale Porenziffer
$H_{\text{rel}}$	relative Häufigkeit

$k_f$	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert bei Sättigung
$m_{\bar{a}}, m_{\bar{b}}, m_{\bar{c}}$	mittlere Fehler von $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$
$n$	Porenvolumen
$n_0$	Ausgangsporenvolumen
$n_p$	Porenvolumen nach Belastung $p$
$p$	Belastung
$pF$	$\log S_{cmWs}$
$r$	Korrelationskoeffizient
$S$	Saugspannung
$s$	Setzung
$s'$	bezogene Setzung
$t$	Zeit
$w$	Wassergehalt
$\rho_t$	Dichte des trockenen Bodens

## Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] *Sommer, C.*: Die Verdichtungsempfindlichkeit zweier Ackerböden. Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 26 (1975) Diss. TU Braunschweig.
- [ 2 ] *Söhne, W.*: Versuch einer Prognose der Leistung und Produktion der Ackerschlepper sowie ihrer konstruktiven Weiterentwicklung. Grundl. Landtechnik Bd. 22 (1972) Nr. 6, S. 161/92.
- [ 3 ] *Söhne, W.*: Die Verformbarkeit des Ackerbodens. Grundl. Landtechnik (1952) Nr. 3, S. 51/59.
- [ 4 ] *Söhne, W.*: Grundlagen für eine landtechnische Bodenmechanik. Grundl. Landtechnik (1956) Nr. 7, S. 11/27.
- [ 5 ] *Krick, G.*: Druck- und Schubverteilung unter Rädern und Reifen auf nachgiebigem Boden unter Berücksichtigung der Reifendeformation. Proc. 3. Int. Konf. I.S.T.V.S. Bd. II (1969) S. 50/75.
- [ 6 ] *Holm, I.C.*: Das Verhalten von Reifen beim mehrmaligen Überfahren einer Spur. Proc. 3. Int. Konf. I.S.T.V.S. Bd. II (1969) S. 96/123.
- [ 7 ] *Sommer, C., H. Steinkampf, M. Zach u. W. Czeratzki*: Ein Beitrag zum Problem der Bodenverdichtung beim Einsatz leistungsstarker Schlepper. Landbauforschung Völkenrode Bd. 25 (1975) Nr. 2, S. 69/74.
- [ 8 ] *Danfors, B.*: Compaction in the subsoil. Swedish Institute of Agricultural Engineering. Spez. Mitt. S. 24 (1974).
- [ 9 ] *Hakansson, I.*: The sensitivity of different crops to soil compaction. Proc. 6. Int. Conf. on Soil Tillage, Wageningen.
- [ 10 ] *Czeratzki, W.*: Die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand. Landbauforschung Völkenrode Bd. 22 (1972) Nr. 1, S. 29/36.
- [ 11 ] • *Barnes, K.K., W.M. Carleton, H.M. Taylor, R.J. Throckmorton u. G.E. Vanden Berg*: Compaction of agricultural soils. ASAE Monograph 1971.
- [ 12 ] *Altemüller, H.J.*: Gedanken zum Aufbau des Bodens und seiner begrifflichen Erfassung. Z. Kulturtechnik Bd. 3 (1962) Nr. 6, S. 323/36.
- [ 13 ] *Altemüller, H.J., W. Czeratzki u. C. Sommer*: Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben "Manöverschäden". Interner Bericht der Institute für Pflanzenbau und Biochemie des Bodens FAL 1973.
- [ 14 ] *Sitkei, G.*: Das Verhalten von Ackerschlepperreifen auf nachgiebigem Boden. Grundl. Landtechnik Bd. 19 (1969) Nr. 2, S. 33/36.
- [ 15 ] *Cerny, V.*: Veränderungen des physikalischen Bodenzustandes und die Beeinflussung der Vegetationsfaktoren durch die Bodenbearbeitung. Sammelchrift der Vorträge der Int. Wiss. Tagung Brünn 1966.
- [ 16 ] *Söhne, W.*: Druckverteilung und Bodenverformung unter Schlepperreifen. Grundl. Landtechnik (1953) Nr. 5, S. 49/63.
- [ 17 ] *Czeratzki, W.*: Eine keramische Platte zur serienmäßigen Untersuchung von Porengrößen im Boden im Spannungsbereich bis ca. 1 Atm. Z. Pflanzenernähr., Düngung, Bodenkd. Bd. 81 (1958) Nr. 1, S. 50/56.
- [ 18 ] *Kezdi, A.*: Grundlagen einer allgemeinen Bodenphysik. VDI-Z. Bd. 108 (1966) Nr. 5, S. 161/66.
- [ 19 ] *Moreno, F., C. Sommer u. W. Czeratzki*: Einige bodenphysikalische Untersuchungen an der Schleppersohle einer degradierten Schwarzerde. Landbauforschung Völkenrode Bd. 24 (1974) Nr. 2, S. 123/32.
- [ 20 ] *Feuerlein, W.*: Zum Einfluß des Schlepperrades auf den Acker. Landbauforschung Völkenrode Bd. 11 (1961) Nr. 3, S. 69/72.
- [ 21 ] *Hartge, K.H.*: Die Erfassung der Kontinuität der groben Poren aus ihrem Anteil im Boden und dem Permeabilitätskoeffizienten. Z. Pflanzenernähr., Düngung, Bodenkd. Bd. 94 (1961) Nr. 2/3, S. 147/54.
- [ 22 ] *Sommer, C., K.W. Stoinev u. H.J. Altemüller*: Das Verhalten vier verschiedener Modellböden unter vertikaler Belastung. Landbauforschung Völkenrode Bd. 23 (1972) Nr. 1, S. 45/56.

## Wirkung und Leistungsbedarf von Nachschneidesystemen für Exakthäcksler

Von Werner Darnedde und Heinrich Peters, Braunschweig-Völkenrode\*)

DK 631.353.7:633.004.12

Durch den Einsatz von Nachschneidesystemen soll die Verdichtbarkeit des Häcksels erhöht und seine Handhabung verbessert werden. Bezogen auf die zusätzliche Zerkleinerung ist der Leistungsbedarf relativ hoch. Der Zerkleinerungsgrad läßt sich durch die Wahl der Sieblochgröße beeinflussen. Die Schüttdichte des Häcksels nimmt um 8 - 15 % zu.

\*) Dr. sc. agr. Werner Darnedde ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Ing. (grad.) Heinrich Peters Mitarbeiter am Institut für Landmaschinenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

### 1. Einleitung

Über den Wert eines kurzen Exakthäcksels für die Silagebereitung herrscht auch in der Praxis heute allgemein Klarheit. Kurzes Häcksel erhöht die Dichte, begünstigt den Siliervorgang und verbessert die Handhabung bei der Ein- und Auslagerung entscheidend. Die einzelnen Faktoren haben für die verschiedenen Verfahrensketten unterschiedliche Bedeutung. Eine allgemeine Quantifizierung des Einflusses der Häcksellänge bzw. der Häcksellängenverteilung ist daher nur schwer möglich. Dies gilt insbesondere für eine über das heute übliche Maß — theoretische Häcksellänge von 4 ÷ 6 mm bei Silomais und 10 ÷ 20 mm bei Welksilage — hinausgehende Zerkleinerung, wie sie durch den Einsatz von Nachschneidesystemen möglich ist [1 bis 4]. Die Motive zur Einführung der Nachschneidevorrichtungen waren verschiedener Art. Der Übergang in