

## Zum Problem der Festigkeitsmessung im Boden<sup>1</sup>

Dipl.-Ing. K. Bernhardt, KDT

Institut für Mechanisierung Potsdam-Bornim der AdL der DDR, Zweigstelle Meißen – Landwirtschaftlicher Transport

### 1. Problemstellung

Für die wissenschaftliche Entwicklung und Untersuchung von landwirtschaftlichen Bodenbearbeitungswerkzeugen ist es notwendig, wichtige Eigenschaften des Werkstoffs Boden zu kennen /1/.

Eine wichtige Werkstoffeigenschaft des Bodens ist seine Festigkeit. Sie bestimmt neben den Trägheits- und Reibkräften maßgeblich den Widerstand, den der Boden einem auf ihn einwirkenden Werkzeug entgegengesetzt und somit den Energiebedarf und das Arbeitsergebnis der Bodenbearbeitung.

Im folgenden soll der gegenwärtige Stand der Erkenntnisse zur Festigung des Bodens aus der Sicht der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung und zur Festigkeitsmessung im Boden dargestellt werden. Dabei wird das Ziel verfolgt, zu überprüfen, ob die bisher aus der Literatur bekannten Methoden zur Festigkeitsmessung für die Charakterisierung des Bodens bei der wissenschaftlichen Entwicklung und Untersuchung von landwirtschaftlichen Bodenbearbeitungswerkzeugen anwendbar sind.

### 2. Festigkeit des Bodens

Unter Festigkeit ist im allgemeinen die Fähigkeit eines Körpers zu verstehen, der Einwirkung von äußeren Belastungen Widerstand entgegenzusetzen /2/.

Bei der Wechselwirkung zwischen Werkzeug und Boden werden über Werkzeugflächen und -kanten in den Boden Kräfte eingeleitet, die zu unterschiedlichen Beanspruchungen des Bodens führen. Erreichen die durch das Wirken der Kräfte im Boden auftretenden Spannungen die Festigkeitswerte des Bodens, erfolgt der Bruch im Boden.

In der Baugrundmechanik geht man davon aus, daß die Deformationen im Boden hauptsächlich durch Verschiebungen zwischen den Bodenteilchen erfolgen. Deshalb ist nach Kezdi /3/ unter der Festigkeit von „Erdmassen“ die Scher- oder Schubfestigkeit zu verstehen. Im folgenden wird nur der Begriff Schubfestigkeit verwendet, da in der Technischen Mechanik mit den Begriffen Normal- und Schubspannung und Haupt- und Hauptschubspannung gearbeitet wird. Unter Schubfestigkeit des Bodens wird die vom Boden beim Einwirken äußerer Kräfte und Momente in der Ebene der größten Hauptschubspannung aufnehmbare maximale Schubspannung verstanden.

Die Aussage, daß der Bruch im Boden durch Überschreiten der Schubfestigkeit erreicht wird, gilt auch für die landtechnische Bodenmechanik /4/.

Die beim Bruch eines Werkstoffs auftretenden Spannungen werden in der Festigkeitslehre mit den Mohrschen Spannungskreisen dargestellt (Bild 1). Dabei werden nur die größte und die kleinste Hauptspannung berücksichtigt. Zeichnet man die Mohrschen Spannungskreise für verschiedene Bruchzustände, so erhält man eine gemeinsame Um-

hüllende, deren Form und Lage im Normal- und Schubspannungsdiagramm vom Werkstoff abhängig ist. Für Boden kann die Umhüllende in begrenzten Bereichen der Normalspannung in erster Näherung durch die Funktion einer Geraden beschrieben werden. Unter dieser Voraussetzung besteht im Fall des Bruches im Boden eine lineare Beziehung zwischen der Schubfestigkeit  $\tau$  und der Normalspannung  $\sigma$ ,

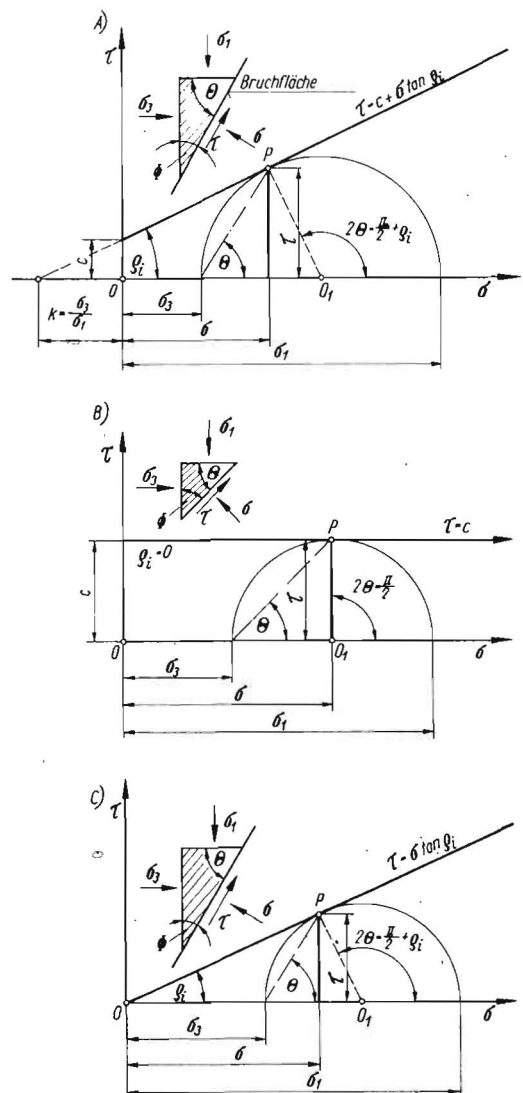


Bild 1. Mohrscher Spannungskreis und Coulombsche Bruchbedingung im Normal- und Schubspannungsdiagramm;

- A) allgemeiner Fall mit  $c > 0$  und  $q_1 > 0$
- B) Sonderfall mit  $c > 0$  und  $q_1 = 0$
- C) Sonderfall mit  $c = 0$  und  $q_1 > 0$

<sup>1</sup> Diese Untersuchung ist Bestandteil der Forschungsarbeiten des Verfassers an der Technischen Universität Dresden, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik, Bereich Landmaschinentechnik

die als Coulombsche Bruchbedingung bezeichnet wird (Bild 1):

$$\tau = c + \sigma \tan \varrho_i \quad (1)$$

Die Schubparameter, innerer Reibungswinkel  $\varrho_i$  und Kohäsion  $c$ , sind von der Bodenart und dem Bodenzustand abhängig.

Die Richtungen der Flächenelemente, zwischen denen der Bruch im Boden erfolgt, schließen mit der Ebene der größten Hauptspannung den Winkel  $\theta = 45^\circ + \frac{\varrho_i}{2}$  ein (Bild 1).

Damit beträgt der Winkel zwischen der Bruchfläche und der größten Hauptspannung  $\sigma_1$ :

$$\phi = 45^\circ - \frac{\varrho_i}{2} \quad (2)$$

Ein Nachteil der Coulombschen Bruchbedingung nach Gleichung (1) liegt darin, daß nur die größte und die kleinste Hauptspannung Berücksichtigung finden. Aus der Literatur geht hervor, daß auch die mittlere Hauptspannung Einfluß auf die Schubfestigkeit des Bodens hat /5/. Da aber gegenwärtig keine anwendbare Theorie existiert, die alle drei Hauptspannungen berücksichtigt, muß die Coulombsche Bruchbedingung in der oben angegebenen Form angewendet werden.

### 3. Einflußfaktoren auf die Schubfestigkeit

Die versuchstechnische Bestimmung der Festigkeit des Bodens gehört mit zu den schwierigsten Problemen der Bodenmechanik, da die Ergebnisse nicht nur durch die Bodeneigenschaften, sondern auch durch die Versuchsart und -durchführung beeinflusst werden.

Die Einflußfaktoren auf die Festigkeit des Bodens und somit auf seine Schubfestigkeit sind /4/ /5/:

- bodenseitige Faktoren, wie Bodenart, -dichte und -feuchtigkeit, Sättigungsgrad, chemische und mineralogische Zusammensetzung, Durchwurzelung
- Spannungszustände (ein-, zwei- oder dreiaxialer Spannungszustand), Verformungsbedingungen (Behinderung von Verformungen des Bodens und Erzwingen von Bruchflächen durch die Versuchseinrichtung, Größe der Verformungsgeschwindigkeit) und Belastungsart (stufenweise oder kontinuierliche Lastaufbringung) bei der Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Schubfestigkeit
- Art der Entnahme der Bodenprobe und die von der Entnahme bis zur Versuchsdurchführung eintretenden Veränderungen in der Bodenprobe.

Aus den Einflußfaktoren sind Anforderungen an eine Methode zur Festigkeitsmessung im Boden und folglich auch an ein nach dieser Methode arbeitendes Meßgerät abzuleiten. So folgt aus den erstgenannten bodenseitigen Einflußfaktoren, daß die Ergebnisse von Festigkeitsmessungen nur für den jeweiligen Boden gelten. Eine geringe Veränderung, z. B. der Bodenfeuchtigkeit, -dichte oder der Durchwurzelung, hat eine Veränderung der Festigkeit zur Folge. Der Einfluß der Art der Entnahme von Bodenproben und der Veränderungen in den Bodenproben zwingt dazu, die Festigkeit im natürlich gewachsenen Boden zu bestimmen. Da auch die Spannungszustände, Belastungsarten und Verformungsbedingungen Einfluß auf die Festigkeit haben, ist es notwendig, bei der Versuchsdurchführung solche Bedingungen zu schaffen, wie sie bei der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung vorliegen.

Im Abschnitt 2 wurde gezeigt, daß die Schubfestigkeit besondere Bedeutung für den Bruchvorgang im Boden beim Einsatz landwirtschaftlicher Bodenbearbeitungswerkzeuge hat. Im folgenden werden deshalb vorwiegend Methoden zur Bestimmung der Schubfestigkeit des Bodens diskutiert.

Aufgrund des Wirkens der Einflußfaktoren auf die Schubfestigkeit müssen folgende Hauptanforderungen an eine Methode zur Bestimmung der Schubfestigkeit gestellt werden /4/:


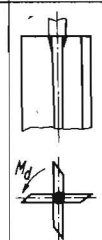
Methode	Sondenkörper	Arbeitsprinzip	Meßgröße	Bemerkungen
Rammsondierung		Einrammen des Sondenkörpers in den Boden durch eine von Fallgewichten erzeugte Kraft	Eindringtiefe des Sondenkörpers je Hub des Fallgewichtes	Bestimmung der Schubfestigkeit nicht möglich
Drucksondierung		Eindrücken des Sondenkörpers in den Boden mit konstantem Vor-schub	Kraft zum Eindrücken des Sondenkörpers	
Drehsondierung		Verdrehen des Sondenkörpers im Boden mit konstanter Winkelgeschwindigkeit	Drehmoment zum Verdrehen des Sondenkörpers	Bestimmung der Schubfestigkeit als Funktion der Normalspannung nicht möglich

Bild 2. Zusammenstellung der Methoden zur Bodensondierung

- a) Verwirklichen des dreiaxialen Spannungszustands im Boden
- b) Zulassen einer unbehinderten räumlichen Verformung des Bodens
- c) freies Aufbrechen des Bodens, d. h., die Bruchfläche im Boden darf nicht durch das Gerät erzwungen werden
- d) Bestimmen der Schubfestigkeit im natürlichen Boden ohne Probenentnahme
- e) Bestimmen der Schubfestigkeit bei geringen Verformungsgeschwindigkeiten des Bodens unter quasistatischen Bedingungen.

Es ist nun zu prüfen, inwieweit die aus der Literatur bekannten Methoden zur Bestimmung der Schubfestigkeit des Bodens und die nach diesen Methoden arbeitenden Geräte die Hauptanforderungen erfüllen.

### 4. Methoden zur Festigkeitsmessung im Boden

Bei der versuchstechnischen Bestimmung der Festigkeit des Bodens stützt man sich im wesentlichen auf die Erfahrungen und Erkenntnisse der Baugrundmechanik. Bei einer Übernahme der Untersuchungsmethoden und technischen Hilfsmittel ist jedoch eine weitgehende Analyse der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Baugrundmechanik und der landtechnischen Bodenmechanik notwendig.

Bei einer Untersuchung der aus der Literatur bekannten Methoden zur Festigkeitsmessung im Boden erscheint es sinnvoll, auch die „Bodensondierung“ zu betrachten, da diese in der Vergangenheit große Bedeutung erlangt hatte.

Unter „Bodensondierung“ werden alle Untersuchungsmethoden verstanden, bei denen Sonden in den Boden getrieben werden und aus dem Widerstand, den der Boden diesen Sonden entgegengesetzt, auf dessen Eigenschaften geschlossen wird. Die beim Einrammen (Rammsondierung), Eindrücken (Drucksondierung) oder Verdrehen (Drehsondierung) eines Sondenkörpers verrichtete Arbeit gibt einen Anhalt über die Festigkeit des Bodens und die Lage von Schichtgrenzen im Boden (Bild 2).

Aus den Ergebnissen von Ramm- und Drucksondierungen können nach Gruner /6/ Aussagen über die Lagerungsverhältnisse des durchfahrenen Bodens gemacht werden. Eine Ramm- oder Drucksondierung ist jedoch nur dann sinnvoll,

Bild 3. Zusammenstellung der Methoden zum Bestimmen der Schubfestigkeit des Bodens

Methode		Spannungszustand	Form der Bruchfläche	Lage der Bruchfläche	Messung ohne Probenentnahme	Widerspr. zu Hauptanforderg.
unmittelbarer Scherversuch	Translations-scherversuch			Rechteck- oder Kreisfläche	bedingt möglich	a...c (d)
	Rotations-scherversuch		zweiachsig	Kreis- oder Kreisringfläche	durch das Gerät vorgegeben	a...c
Druckversuch	einaxialer Druckversuch		einaxial			
	zweiachsigler Druckversuch		zweiachsig	je nach Form der Bodenprobe	bildet sich in der Bodenprobe frei aus	a und d
	dreiachsigler Druckversuch		dreiachsig			d

wenn bereits Kenntnisse über den Boden vorhanden sind /7/. Die Aussagen sind deshalb als zusätzliche Aufschlüsse zu betrachten und meist nur qualitativer Art. Außerdem ist der Zusammenhang zwischen Sondenwiderstand und Schubfestigkeit noch weitgehend ungeklärt. Auch die Drehsondierung kann nur für vergleichende Untersuchungen eingesetzt werden, da die Schubfestigkeit nicht als Funktion der Normalspannung bestimmt werden kann /5/.

Die Geräte zur Bestimmung der Schubfestigkeit des Bodens teilt Kezdi /3/ nach dem Arbeitsprinzip in Geräte ein, die

- nach dem unmittelbaren Scherversuch und
- nach dem Druckversuch arbeiten (Bild 3).

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Geräten beider Gruppen besteht darin, daß die Bruchfläche im Boden in der ersten Gruppe durch die Geräte erzwungen wird, während sie sich in den Geräten der zweiten Gruppe frei ausbilden kann.

Der Translationsscherversuch ist dadurch gekennzeichnet, daß eine Bodenprobe in Form eines Quaders oder eines Zylinders in einen Scherkasten oder in eine Scherbüchse eingebaut wird, deren Oberteil gegenüber dem Unterteil in horizontaler Richtung geradlinig verschiebbar ist. Gemessen wird die für die Verschiebung notwendige Horizontalkraft bis zum Zeitpunkt des Bruches im Boden. Beim Rotations-scherversuch wird ein Scherkopf in den Boden eingedrückt und um die vertikale Achse verdreht. Je nach Gestaltung des Scherkopfes ist die im Boden erzwungene Bruchfläche eine Kreis- oder Kreisringfläche (vgl. Bild 3).

Der Druckversuch ermöglicht es, in der Bodenprobe ein-, zwei- oder dreiachsigle Spannungszustände zu erzeugen. Die Bodenproben sind zylinder- oder quaderförmig (Bild 3).

Untersucht man die hier dargestellten Methoden hinsichtlich der Erfüllung der im Abschnitt 3 angegebenen Hauptanforderungen, so muß festgestellt werden, daß keine Methode allen Hauptanforderungen gerecht wird. Eine Anwendung der Bodensondierung ist nicht möglich, da sie keine Bestimmung der Schubfestigkeit entsprechend Gleichung (1) zuläßt.

Die Geräte, die nach dem unmittelbaren Scherversuch arbeiten, erfüllen nicht die Hauptanforderungen a) bis c), während der Druckversuch der Hauptanforderung d) nicht genügt. Außerdem ist eine exakte Wiedergabe der in der Praxis auftretenden Spannungsverhältnisse im Versuch nicht erreichbar /5/.

Neben den in den Bildern 2 und 3 zusammengefaßten Methoden zur Festigkeitsmessung im Boden sind in der Literatur noch andere Methoden zur Bestimmung der Schubfestig-

keit bekannt, die jedoch noch nicht in einem Meßgerät praktisch verwirklicht wurden (vgl. /8/).

Da keine der Methoden alle Hauptanforderungen erfüllt, wurde an der TU Dresden, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik, eine Methode zur Bestimmung der Schubfestigkeit des Bodens unter den Bedingungen der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung entwickelt, die für die Anwendung bei der wissenschaftlichen Entwicklung und Untersuchung von landwirtschaftlichen Bodenbearbeitungswerkzeugen vorgeschlagen wird /4/. Diese Methode wird Gegenstand einer weiteren Veröffentlichung sein.

### 5. Zusammenfassung

Die Kenntnis wichtiger Eigenschaften des Werkstoffs Boden ist eine Voraussetzung für die wissenschaftliche Entwicklung und Untersuchung von landwirtschaftlichen Bodenbearbeitungswerkzeugen. In der vorliegenden Arbeit wird dargestellt, daß die Festigkeit und insbesondere die Schubfestigkeit des Bodens eine solche wichtige Eigenschaft ist. Weiterhin werden Hauptanforderungen an eine Methode zur versuchstechnischen Bestimmung der Schubfestigkeit des Bodens aufgestellt, die aus den spezifischen Bedingungen der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung und aus der Diskussion der Einflußfaktoren auf die Schubfestigkeit abgeleitet wurden. Die Untersuchung der bisher aus der Literatur bekannten Methoden zur Bestimmung der Schubfestigkeit ergab, daß keine dieser Methoden allen Hauptanforderungen gerecht wird.

### Literatur

- 1/ Soucek, R.; Bernhardt, G.; Bernhardt, K.; Leitholdt, B.: Die Bedeutung des Bodens als Werkstoff für das Entwickeln von Bodenbearbeitungswerkzeugen. agrartechnik 24 (1974) H. 9, S. 444—446.
- 2/ Meyers Neues Lexikon. Leipzig: VEB Bibliographisches Institut 1962.
- 3/ Kezdi, A.: Handbuch der Bodenmechanik, Bd. 1, Bodenphysik. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1969.
- 4/ Bernhardt, K.: Eine Methode zur Bestimmung der Schubfestigkeit des Bodens unter den Bedingungen der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung. Dissertation TU Dresden 1974, unveröffentlicht.
- 5/ Bernhardt, K.: Reproduzierbare Bestimmung der Schubfestigkeit des Bodens. Literaturbericht TU Dresden, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik 1971, unveröffentlicht.
- 6/ Gruner, W.: Über einige Möglichkeiten zur Bestimmung des Bearbeitungs-widerstandes des Ackerbodens. Wiss. Zeitschrift der TH Dresden 3 (1953/54) H. 2, S. 225—229.
- 7/ Sparmann, H.: Die leichte Rammsonde. Erläuterungen zur TGL 11 461, Bl. 2. Veröff. d. VEB Baugrund Berlin (1963) H. 1.
- 8/ Bernhardt, K.: Eine Methode zur Bestimmung der Scherfestigkeit des Bodens aus der Sicht der landw. Bodenbearbeitung. Wiss. Zeitschrift der TU Dresden 23 (1974) H. 2, S. 395—399. A 9824