

Theoretische Untersuchung einer Methode zur Bestimmung der Schubfestigkeit des Bodens¹⁾

Dr.-Ing. K. Bernhardt, KDT

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

1. Problemstellung

Auf die Bedeutung der Kenntnis wichtiger Werkstoffeigenschaften des Bodens für die wissenschaftliche Entwicklung und Untersuchung von landwirtschaftlichen Bodenbearbeitungswerkzeugen wurde bereits mehrfach hingewiesen [1] [2] [3] [4]. Dabei werden unter wichtigen Werkstoffeigenschaften alle die Eigenschaften des Bodens verstanden, die den Energieaufwand und das Arbeitsergebnis der Bodenbearbeitung in der Landwirtschaft wesentlich beeinflussen.

Die Schubfestigkeit des Bodens ist eine solche wichtige Werkstoffeigenschaft [2] [4] [5] [6]. Die Untersuchung der Anwendbarkeit der bisher aus der Literatur bekannten Methoden für die Bestimmung der Schubfestigkeit des Bodens in der landtechnischen Bodenmechanik führte zu dem Ergebnis, daß keine dieser Methoden alle zu stellenden Hauptanforderungen erfüllt [5]. Deshalb wird im folgenden eine Methode zur Bestimmung der Schubfestigkeit des Bodens dargestellt, die bei der wissenschaftlichen Entwicklung und Untersuchung von landwirtschaftlichen Bodenbearbeitungswerkzeugen angewandt werden kann.

2. Theoretische Grundlagen

An eine Meßeinrichtung zur Bestimmung der Schubfestigkeit des Bodens sind aus der Sicht der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung besondere Forderungen zu stellen. Diese werden aus dem Wirken der Faktoren, die die Schubfestigkeit des Bodens beeinflussen und aus den spezifischen Bedingungen bei der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung abgeleitet. Folgende Hauptanforderungen müssen erfüllt werden [5] [6]:

- Verwirklichen des dreiaxialen Spannungszustands im Boden
- Zulassen einer unbehinderten räumlichen Verformung des Bodens
- Zulassen des freien Aufbrechens des Bodens, kein Erzwingen der Lage der Bruchfläche im Boden durch das Gerät
- Bestimmen der Schubfestigkeit ohne Probenentnahme im natürlichen Boden
- Bestimmen der Schubfestigkeit bei geringen Verformungsgeschwindigkeiten des Bodens unter quasistatischen Bedingungen.

Den erstgenannten vier Hauptanforderungen liegt der Gedanke zugrunde, die Bedingungen bei der Versuchsdurchführung weitgehend denen der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung anzugleichen. Die fünfte Forderung wurde gestellt, um die Schubfestigkeit des Bodens als Werkstoffeigenschaft unabhängig von Beschleunigungseinflüssen und dynamischen Vorgängen im Boden bestimmen zu können.

Im folgenden soll zunächst der Vorgang der Bearbeitung des Bodens mit Hilfe von landwirtschaftlichen Bodenbearbeitungswerkzeugen, bei deren Einsatz es zum Bruch des Bodens kommt, untersucht werden.

Bei der Wechselwirkung zwischen Bodenbearbeitungswerkzeug und Boden werden über die Arbeitsfläche und -kanten des Werkzeugs auf den Boden Kräfte eingeleitet, die Spannungen im Boden erzeugen, die von den Konstruktions- und Betriebsparametern des Werkzeugs sowie von den Bodeneigenschaften abhängig sind. Erreichen diese Spannungen die Festigkeitswerte des Bodens, so erfolgt der Bruch im Boden.

Für die Spannungen in der sich bildenden Bruchfläche zum Zeitpunkt des Bruches im Boden trifft die Coulombsche Bruchbedingung zu [4] [5] [6] [7] [8] [9]:

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

τ Schubfestigkeit
 σ Normalspannung

c Kohäsion

ϱ_i innerer Reibungswinkel

Bei gleichförmiger Bewegung des Werkzeugs läuft der Vorgang des Bruches periodisch ab. Als Periode des Bruchvorgangs wird die Zeit vom Beginn der Kraftübertragung zwischen Werkzeug und Boden bis zur vollständigen Ausbildung eines Bodenbruchkörpers definiert.

Setzt man voraus, daß innerhalb einer Periode nur ein Bodenbruchkörper entsteht, so ist der Bodenbruchkörper ein sich infolge des Einwirkens eines Werkzeugs bildender, selbständiger Teil des gesamten belasteten Bodens. Seine Form ist durch die Arbeitsfläche des Werkzeugs, der entstandenen Bruchfläche und der Bodenoberfläche vorgegeben.

Bei der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung werden meist Werkzeuge verwendet, deren Breite in der gleichen Größenordnung wie deren Arbeitstiefe liegt [4]. Für solche Fälle muß außer dem Aufbruch vor dem Werkzeug auch der seitliche Bodenaufbruch berücksichtigt werden.

Wird der Boden durch ein ebenes, senkrecht zur Bodenoberfläche stehendes, rechteckiges Werkzeug bis zum Bruch belastet, so entsteht durch den Bruch des Bodens der im Bild 1 dargestellte Bodenbruchkörper. Diese Aussage gilt nur für Werkzeuge mit einem Verhältnis $K = t/b_g < 0,6$ (t Arbeitstiefe, b_g Werkzeugbreite) [6].

Im Vertikalabschnitt parallel zur Bewegungsrichtung des Werkzeugs wird der Bodenbruchkörper durch die Verbindung der Punkte A, B, B₁ und C begrenzt. Die Verbindung von B und B₁ ist eine Kurve, die durch eine logarithmische Spirale oder durch einen Kreisbogen angenähert werden kann. In der Draufsicht erscheint der Bodenbruchkörper ellipsenförmig. In der Vorderansicht verlaufen die Bruchlinien parabolisch.

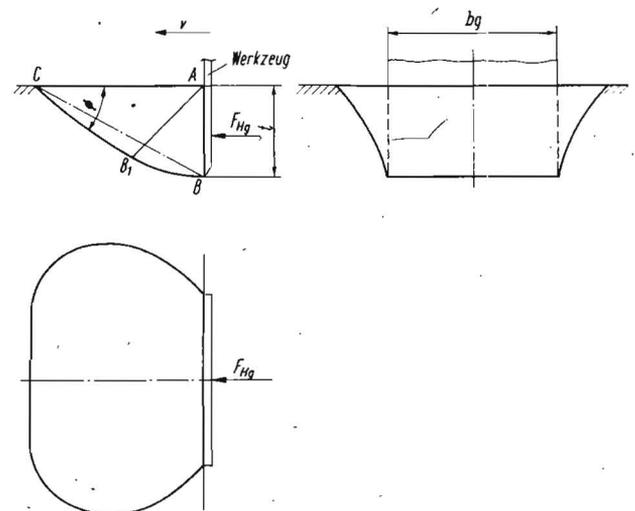


Bild 1. Schematische Darstellung des beim Einwirken eines ebenen, rechteckigen, senkrecht zur Bewegungsrichtung v angestellten Werkzeugs im Boden entstehenden Bodenbruchkörpers:
 — — — — — allgemeine Form des Bodenbruchkörpers
 — — — — — Bruchlinie für $\varrho_a < \varrho_i/3$

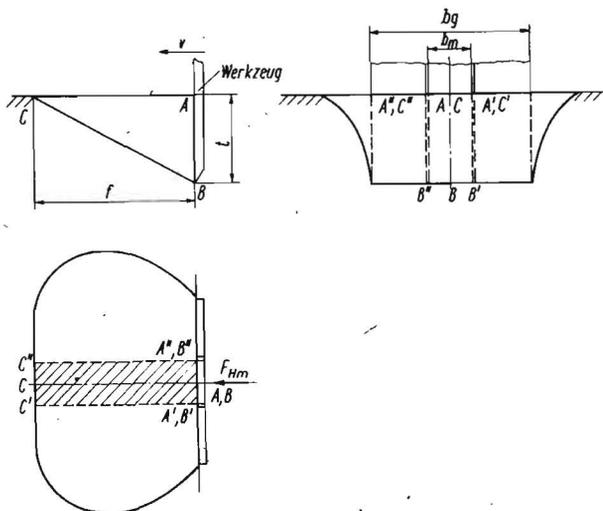


Bild 2. Schematische Darstellung zur abgeleiteten Methode; Teilbruchfläche in der Draufsicht schraffiert dargestellt

Die geometrische Form des Bodenbruchkörpers kann vereinfacht werden, wenn folgende zwei Bedingungen erfüllt sind:

- Der Anstellwinkel des Werkzeugs gegenüber der Bodenoberfläche beträgt 90° .
- Der Reibungswinkel ρ_a zwischen Arbeitsfläche des Werkzeugs und Boden ist kleiner als ein Drittel des inneren Reibungswinkels ρ_i des Bodens [9].

Sind diese erfüllt, so ist die Verbindung von B und C eine Gerade (Bild 1).

Aus den bisherigen Darlegungen wird deutlich, daß auch beim Einwirken eines relativ einfachen Werkzeugs bereits ein Bodenbruchkörper mit komplizierter Form entsteht. Seine Form und auch die am Werkzeug wirkenden Kräfte sind nicht nur von den Konstruktions- und Betriebsparametern des Werkzeugs, sondern auch von den Werkstoffeigenschaften des Bodens abhängig. Plötner [4] stellte fest, daß keines der bisher bekannten Berechnungsmodelle für den Bruchvorgang im Boden praktisch anwendbar ist. Einen Grund hierfür sieht er darin, daß die gewählten Bruchkörperformen nicht der Form des wirklichen Bodenbruchkörpers entsprechen.

Es war deshalb notwendig, bei der zu entwickelnden Methode zur Bestimmung der Schubfestigkeit des Bodens unter Berücksichtigung der genannten Hauptanforderungen ein neues Berechnungsmodell zu finden.

3. Beschreibung der Methode zum Bestimmen der Schubfestigkeit des Bodens

Bei Betrachtung der Form des im Bild 1 dargestellten wirklichen Bodenbruchkörpers wird deutlich, daß der Teil der Bruchfläche, der vor dem mittleren Teil des Werkzeugs liegt, eine ebene Rechteckfläche ist. Diese Aussage gilt nur für eine begrenzte Breite des mittleren Werkzeugteiles und nur dann, wenn die zwei Bedingungen dafür erfüllt sind, daß die Verbindung von B und C eine Gerade ist.

In der abgeleiteten Methode wird diesem ebenen, rechteckigen Teil der Bruchfläche, im folgenden Teilbruchfläche genannt, die Horizontalkraft an dem mittleren Teil des Werkzeugs zum Bruchzeitpunkt im Boden zugeordnet. Dazu muß das im Bild 1 dargestellte Werkzeug in drei voneinander unabhängige Teilwerkzeuge unterteilt werden (Bild 2).

Grundlage für die Zuordnung der Horizontalkraft am mittleren Teilwerkzeug und der direkt vor dem mittleren Teilwerkzeug liegenden Bruchfläche bildet die Erkenntnis, daß die an einem Werkzeug wirkende Horizontalkraft stets proportional der Werkzeugbreite ist. Für das senkrecht zur Bodenoberfläche stehende rechteckige Werkzeug heißt das, daß abgesehen von den Randgebieten des Bodenbruchkörpers, bei denen bereits eine Wölbung der Bruchfläche auftritt, jeder Teilfläche mit einer Breite Δb eine Horizontalkraft ΔF zuzuordnen ist. Diese Annahmen

konnten bereits durch experimentelle Untersuchungen bestätigt werden [6].

Bei der Ableitung der Berechnungsgleichungen für die Schubfestigkeit τ , die Normalspannung σ und die Schubparameter Kohäsion c und innerer Reibungswinkel ρ_i muß von dem Kräftegleichgewicht an dem vor dem mittleren Teilwerkzeug liegenden Teilbruchkörper zum Bruchzeitpunkt ausgegangen werden. Der Teilbruchkörper wird begrenzt von der Bodenoberfläche $A' C' C'' A''$, von der Arbeitsfläche des mittleren Teilwerkzeugs $A' B' B'' A''$, von der Teilbruchfläche $B' C' C'' B''$ und den beiden gedachten seitlichen Begrenzungsflächen $A' B' C'$ und $A'' B'' C''$.

Aus dem Kräftegleichgewicht und durch Einsetzen der sich aus der Form des Teilbruchkörpers ergebenden Beziehungen erhält man folgende Berechnungsgleichungen:

$$\tau = \frac{f}{b_m(t^2 + f^2)} [F_{Hm \max} - 1/2 t^2 b_m \rho g] \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{t}{b_m(t^2 + f^2)} [F_{Hm \max} + 1/2 t^2 b_m \rho g] \quad (3)$$

Beim Aufstellen des Kräftegleichgewichts bleiben Beschleunigungs-, Umform- und Schnittkräfte unberücksichtigt.

Aus dem Mohrschen Spannungskreis erhält man für den inneren Reibungswinkel ρ_i [5]:

$$\rho_i = 90^\circ - 2\Phi \quad (4)$$

wobei $\tan \Phi = t/f$.

Bei Kenntnis von τ , σ und ρ_i kann nach Auflösen der Gleichung (1) die Kohäsion c berechnen:

$$c = \tau - \sigma \tan \rho_i \quad (5)$$

Aus den Gleichungen (2) und (5) geht hervor, daß zur Berechnung der Schubfestigkeit τ , der Normalspannung σ , der Kohäsion c und des inneren Reibungswinkels ρ_i folgende Größen eingestellt oder während der Versuchsdurchführung gemessen werden müssen:

- Meßtiefe t
- Breite des mittleren Teilwerkzeugs b_m
- Länge des Bodenbruchkörpers f
- Horizontalkraft am mittleren Teilwerkzeug im Bruchzustand des Bodens $F_{Hm \max}$
- Bodendichte ρ .

Zusammenfassend sollen die wichtigsten Merkmale der abgeleiteten Methode dargestellt werden. Die Methode ist dadurch gekennzeichnet, daß

- in dem zu untersuchenden Boden eine senkrecht zur Bodenoberfläche stehende, ebene Bodenwand abgestochen wird.
- ein parallel zu dieser Bodenwand ausgerichtetes Meßwerkzeug mit einer konstanten Bewegungsgeschwindigkeit, deren Richtungsvektor senkrecht zur Bodenwand steht, in Richtung der Bodenwand bis zum Entstehen eines Bodenbruchkörpers bewegt wird
- das Werkzeug in seiner Breite in drei Teilwerkzeuge unterteilt ist
- der Horizontalkraft am mittleren Teilwerkzeug im Bruchzustand des Bodens die vor dem mittleren Teilwerkzeug liegende Teilbruchfläche zugeordnet wird
- nach abgeleiteten Berechnungsgleichungen die Größen τ , σ , c und ρ_i errechnet werden können.

Als Ergebnis der Untersuchungen sind für den jeweiligen Boden die statistischen Maßzahlen der Kohäsion und des inneren Reibungswinkels sowie der bei den Messungen vorliegende Normalspannungsbereich anzugeben. Zu dieser hier dargestellten Methode wurden an der TU Dresden, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik, umfangreiche experimentelle Untersuchungen unter Labor- und Feldbedingungen durchgeführt. Dabei konnte die Anwendbarkeit der Methode und einer nach dieser Methode arbeitenden Versuchsmeßeinrichtung nachgewiesen werden.

Aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen war es möglich, wichtige Erkenntnisse zur konstruktiven Gestaltung von Meßeinrichtungen dieser Art und ihren Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen zu gewinnen.

Zu der oben dargestellten Methode wurde der Entwurf eines

Fachbereichstandards erarbeitet [10], der für die Bestimmung der Schubfestigkeit von Böden bei der Untersuchung von landwirtschaftlichen Bodenbearbeitungswerkzeugen verbindlich erklärt werden soll.

4. Zusammenfassung

Für die wissenschaftliche Entwicklung und Untersuchung landwirtschaftlicher Bodenbearbeitungswerkzeuge, ist es notwendig, wichtige Werkstoffeigenschaften des Bodens zu kennen. Deshalb muß deren meßtechnische Erfassung eingehend untersucht und verbindlich festgelegt werden.

Im vorliegenden Beitrag wurde eine Methode zur Bestimmung der Schubfestigkeit des Bodens unter den Bedingungen der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung vorgestellt. Diese Methode baut auf dem gegenwärtigen Erkenntnisstand zum Bruch des Bodens beim Einwirken äußerer Belastungen auf und berücksichtigt weitgehend die spezifischen Bedingungen der Bodenbearbeitung in der Landwirtschaft.

Literatur

- [1] Gruner, W.: Über einige Möglichkeiten zur Bestimmung des Bearbeitungs-widerstandes des Ackerbodens. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden 3 (1953/1954) H. 2, S. 225—229.
- [2] 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.
- [3] Lucius, J.: Methode der Werkzeugentwicklung für die Boden-

- bearbeitung. Dt. Agrartechnik 22 (1972) H. 11, S. 515—517.
- [4] Plötner, K.: Untersuchungen über den Bodenwiderstand und den Bodenaufbruch beim Einsatz von Lockerungswerkzeugen. TU Dresden, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik, Dissertation 1970 (unveröffentlicht).
- [5] Bernhardt, K.: Zum Problem der Festigkeitsmessung im Boden. agrartechnik 25 (1975) H. 7, S. 357—359.
- [6] Bernhardt, K.: Eine Methode zur Bestimmung der Schubfestigkeit des Bodens unter den Bedingungen der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung. TU Dresden, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik, Dissertation 1974 (unveröffentlicht).
- [7] Bernhardt, K.: Eine Methode zur Bestimmung der Scherfestigkeit des Bodens aus der Sicht der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden 23 (1974) H. 2, S. 395—399.
- [8] Bernhardt, G.: Untersuchungen über das Verhalten des Bodens unter dem Einwirken eines um eine horizontale Achse rotierenden Werkzeuges. TU Dresden, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik, Dissertation 1972 (unveröffentlicht).
- [9] Kezdi, A.: Handbuch der Bodenmechanik, Bd. 1 Bodenphysik. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1969.
- [10] Bernhardt, K.: Bialojan: Fachbereichsstandard (3. Entwurf) Landtechnische Bodenmechanik, Schubfestigkeit des Bodens, Quasistatische Bestimmungsmethode. Standardisierung in der Land-, Forst- und Nahrungsgüterwirtschaft (in Vorbereitung). A 1178

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

Entwicklung des Findlingsrodgers B 373 und Einsatzerfahrungen

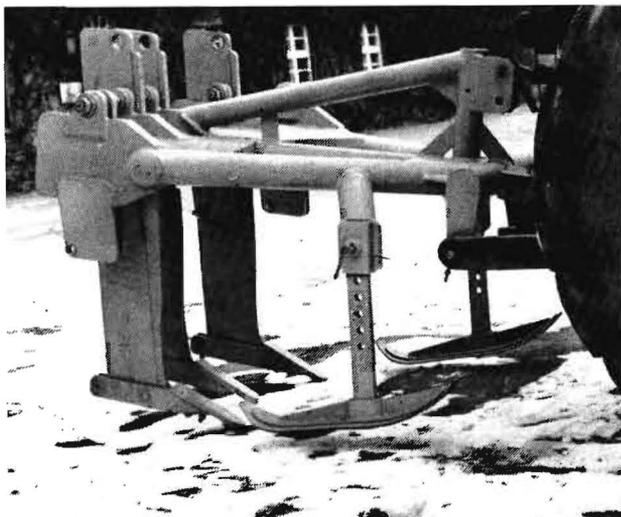
Dipl.-Ing. U. Forbriger, KDT/Dr. H. Hess, KDT, Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg der AdL der DDR

1. Aufgabenstellung

Die Durchsetzung industriemäßiger Methoden der Pflanzenproduktion in der DDR wird auf rd. 2,0 Mill. ha AF durch Steinbesatz erschwert. Rund 50% dieser Flächen entfallen auf die D-Standorte.

Allgemein treten neben Steinen der Grobkiesklasse (Durchmesser > 6 cm) auch Steine mit Kantenlängen bis zu 50 cm in der Krume auf, während im Unterboden Findlinge mit Kantenlängen von 50 cm bis 150 cm verbreitet sein können.

Bild 1. Tieflockerer FA 3/2 B



Die Konzeption der Maschinenreihe zur meliorativen Ackerbodenentsteinung sieht eine stufenweise Entsteinung vor, die die Findlingsrodung, die Räumung und die Krumenentsteinung umfaßt. Dies ist notwendig, weil die Größen- und Massendifferenzierung so groß ist, daß eine Einzelmachine nicht das gesamte Spektrum der Steine (Kantenlänge von 2 cm bis 150 cm, Masse von 0,05 kg bis 2,5 t) aufnehmen kann.

Der Einsatz eines Findlingsrodgers zur Entfernung aller Steine mit einem Durchmesser > 30 cm aus dem Unterboden bis 60 cm Tiefe ist daher eine Voraussetzung für den Einsatz der Krumenentsteinungsmaschine B 381.

Durch die kontinuierliche Vertiefung der Ackerkrume auf den D-Standorten werden Entmischungshorizonte (Steinsohlen) im oberflächennahen Unterboden von Bodenbearbeitungsgeräten angefahren, die hier zu starken Beschädigungen führen und Schadkosten bis zu 60 M/ha verursachen [1]. In solchen Fällen ist eine Findlingsrodung als selbständige Meliorationsmaßnahme oder als spezielle Tieflockerung mit Steinrodung vorzusehen. Zur Erfüllung der genannten Forderungen ist ein Findlingsrodegerät zu entwickeln, das mit den in der DDR vorhandenen Zugmitteln K-700 bzw. T-100 eingesetzt werden kann. Die von diesem Gerät zu rodenden Steinmengen betragen bis zu 150 t/ha.

2. Stand der Technik zur Findlingsrodung

In der DDR wird die meliorative Entsteinung in 16 Meliorationsbetrieben durchgeführt.

Für die Findlingsrodung befand sich bisher der ungarische Tieflockerer FA 3/2 B (Bild 1) im Einsatz.

Seit 1968 wurde er in zwei Entsteinungsbrigaden (Penzlin/Waren und Strausberg) eingesetzt [2]. Das Gerät war auf den 20-kN-Traktor D4KB abgestimmt. In beetweiser Flächenbearbeitung wurden damit Findlinge bis 80 cm Durchmesser erfaßt und durch Ausheben des Roders auf der Oberfläche abgesetzt. Der