

Bestimmung des Einflusses der Verformungsgeschwindigkeit auf die Bruchspannung im Boden

Dipl.-Ing. J. LUCIUS, KDT*

Die gestellten Ziele in der landwirtschaftlichen Produktion der DDR bedingen eine Steigerung der Arbeitsproduktivität bei der Bodenbearbeitung. Wird dies durch erhöhte Fahrgeschwindigkeiten realisiert, so hat das eine höhere Belastungsgeschwindigkeit des Bodens durch die Werkzeuge zur Folge. Die Kenntnis des Verhaltens der Böden unter hohen Verformungsgeschwindigkeiten ist Voraussetzung für eine wissenschaftliche Werkzeugentwicklung.

Bisher wurden relativ wenige Arbeiten durchgeführt, die den Einfluß der Verformungsgeschwindigkeit auf die Bruchspannung untersuchen. Hauptsächlich beschäftigen sich die Autoren mit der summarischen Erfassung der Änderung des Bodenwiderstandes als Funktion der Bearbeitungsgeschwindigkeit, das heißt, die Änderung der Bruchkraft infolge der Erhöhung der Verformungsgeschwindigkeit wird gemeinsam mit der erhöhten Kraft zur Beschleunigung der Bodenteilchen gemessen [1/ 2/ 3/]. Die Autoren [4/ 5/ 6/ 7/ 8/ 9/] geben in ihren Arbeiten eine Abhängigkeit der Bruchspannung von der Verformungsgeschwindigkeit an.

Ziel eigener Untersuchungen war es, die teilweise widersprüchlichen Aussagen der Verfasser hinsichtlich des Einflusses der Verformungsgeschwindigkeit auf die Bruchspannung im Boden zu überprüfen und die speziellen Kennwerte des Bodens in der Modellanlage der Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik der TU Dresden¹ zu bestimmen.

1. Versuchsmethodik

Zur Bestimmung der dynamischen Kennwerte des Bodens dient der Druck- bzw. Zugversuch. Dadurch ist es möglich, einfache, definierte Spannungszustände zu erhalten. Der Probenkörper wurde so gestaltet, daß er sowohl für den Zug- als auch für den Druckversuch verwendet werden kann (Bild 1). Im Rahmen dieser Arbeit wurden Messungen am Boden nur im Druckversuch vorgenommen. Die Versuchseinrichtung gestattete es, die Verformungsgeschwindigkeit im Bereich von 0 bis 10 m/s zu ändern, wobei während der Verformung des Probenkörpers die Geschwindigkeit konstant gehalten werden konnte. Die Messung der Kräfte erfolgte mit Kraftgebern, die in Verbindung mit dem Versuchsstand eine Systemeigenfrequenz von 795 Hz aufwiesen. Die Erregerfrequenz wurde zu maximal 416 Hz bestimmt. Somit ergibt sich ein Verhältnis der Erregerfrequenz zur Systemeigenfrequenz von

$$v \leq 0,52$$

Die Verstärkung des Meßsignals erfolgte durch einen Gleichspannungsverstärker mit einer Grenzfrequenz von 20 kHz. Zur Registrierung diente der Oszillograph 12 LS 1, dessen Meßwerke eine Eigenfrequenz von 4 000 Hz aufweisen. Die Kontrolle der Eignung dieser Meßwerke hinsichtlich der Dämpfung erfolgte über eine Vergleichsmessung mit dem Oszilloskop.

Als Versuchsboden wurde ein sandiger Lehm der im Bild 2 angegebenen Korngrößenverteilung verwendet. Der gleiche Boden befindet sich im Bodenkanal der Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik der TU. Für das Herstellen homogener Proben gleichen Zustands wurde der von einer Ausgangsfeuchtigkeit von etwa 11 Prozent auf 15,5 Prozent

(bezogen auf Feuchtsubstanz) gebrachte Boden mit einem 5 mm Rundlochsieb von größeren Bodenaggregaten getrennt. Die im Bild 3 dargestellte Einrichtung diente dazu, die entsprechend den Dichtestufen erforderlichen Bodenmassen zu verdichten. Die Untersuchungsfeuchtigkeiten konnten durch Abtrocknen an leicht bewegter Luft erzielt werden.

Der Boden wurde bei folgenden Parameteru untersucht:

Trockendichte	$\varphi_{T1} = 1,55 \text{ kg/dm}^3$
	$\varphi_{T2} = 1,33 \text{ kg/dm}^3$
Feuchtigkeit	$w_1 = 6 \%$
(bezogen auf Feuchtsubstanz)	$w_2 = 8 \%$
	$w_3 = 10 \%$

Je Versuchsparameter wurden drei Proben zerstört.

Der Auswertung der Kraftmeßschiebe liegt der maximale Ausschlag zugrunde. Gegebenenfalls wurde bei den hohen Verformungsgeschwindigkeiten eine Ausgleichskurve eingezeichnet, um die gering überlagerte Eigenfrequenz des Meßsystems zu eliminieren.

Von durchschnittlich 80 Prozent der zerstörten Proben blieb die untere Hälfte auf dem Meßgeber stehen, und es war möglich, den Bruchwinkel der Probe zu bestimmen (Bild 4). Bei jeder Probe erfolgte die Messung der Bodenfeuchtigkeit in der Bruchfläche.

Der mittlere Streubereich der Meßpunkte beträgt 18 bis 20 Prozent. Eine Absicherung der Meßwerte erfolgt durch den Verlauf der Kurven (Bilder 5, 6 und 7). Die Angabe der Streuungen s_α bei der Bruchwinkelmessung erfolgt in Tafel 1.

2. Versuchsergebnisse und Diskussion

Aus Bild 5 ist ersichtlich, daß bei Verformungsgeschwindigkeiten über 2 m/s eine wesentliche Änderung der Bruchspannung nicht erfolgt. In diesem Bereich können die Kurven durch Geraden ersetzt werden. Die durch Regression (Fehlerquadrat-Minimum nach GAUSS) bestimmten Koeffizienten der Geradengleichung

$$\sigma_D = a + b \cdot v,$$

mit

σ_D Normalspannung in Belastungsrichtung der Probe

v Verformungsgeschwindigkeit

a, b Koeffizienten.

für Verformungsgeschwindigkeiten im Bereich

$$2,0 < v \leq 10 \text{ m/s}$$

sind in Tafel 1 angegeben.

Um Untersuchungen zur Kennzeichnung des Bodens für die Werkzeugentwicklung nutzen zu können, ist es notwendig, das Verhalten des Bodens mathematisch zu formulieren. Dies geschieht durch Aufstellen von rheologischen Modellen. Für

Tafel 1. Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

φ_T	w	α	s_α	e_1	a	b	c_d	η
kg/dm ³	%	o	%	o	kp/cm ²	$\frac{\text{kps}}{\text{cm}^2 \cdot \text{m}}$	kp/cm ²	$\frac{\text{kps}}{\text{cm}^2 \cdot \text{m}}$
1,33	9,5 ... 10,5	31,5	26,0	27,0	3,17	-0,143	0,97	-0,044
1,33	8,0 ... 9,0	32,4	23,0	25,2	2,77	-0,002	0,88	-0,001
1,33	5,5 ... 6,5	34,8	14,5	20,4	6,34	+0,065	2,2	0,023
1,55	9,5 ... 10,5	32,7	18,0	24,6	8,99	-0,145	2,89	-0,047
1,55	8,0 ... 9,0	33,6	25,0	22,7	8,98	-0,067	2,99	-0,022

* Technische Universität Dresden, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik (Direktor: Prof. Dr. habil. R. THÜRME)

¹ s. 11. 7/1971, S. 337

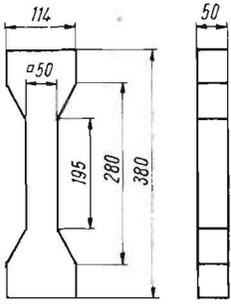
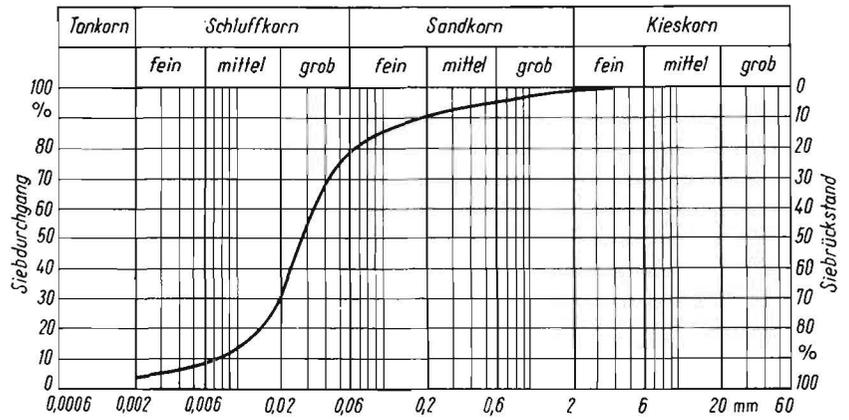


Bild 1. Probenkörper

Bild 2. Korngrößenverteilung: Boden aus der Bodenrinne der Sektion 16, Bodenart SL



den hier untersuchten Boden kann ein solches Modell für Verformungsgeschwindigkeiten im Bereich von

$$2 < v \leq 10 \text{ m/s}$$

als eine Parallelschaltung eines Coulombschen Reibgliedes mit einem Dämpfungsglied aufgestellt werden (Bild 8). Die zugehörige Scherspannungsgleichung lautet:

$$\tau_B = c_d + \eta \cdot v + \sigma_n \tan \varrho_i$$

Darin bedeuten

τ_B Bruchscherspannung ϱ_i innerer Reibwinkel
 c_d dynamische Kohäsion σ_n Normalspannung in Scherebene
 η Viskosität

Die Berechnung der Bodenparameter c_d und η erfolgt über die Auswertung des Spannungsgleichgewichtes an der Bruchprobe in Verbindung mit der Bruchbedingung (Bild 9).

Durch Koeffizientenvergleich ergibt sich:

$$c_d = \frac{a}{2} [\cos \varrho_i - \tan \varrho_i (1 - \sin \varrho_i)]$$

$$\eta = \frac{b}{2} [\cos \varrho_i - \tan \varrho_i (1 - \sin \varrho_i)]$$

Die Wertezusammenstellung gibt Tafel 1.

Allgemein kann aus den Ergebnissen folgendes abgeleitet werden: Der dynamische Widerstandsanteil beim Bewegen eines Werkzeuges durch den Boden besteht aus zwei Komponenten. Die eine Komponente beinhaltet die Beschleunigung der Bodenaggregate und die andere die Änderung der Bruchspannung infolge der Erhöhung der Verformungsgeschwindigkeit (Bild 5). Sind infolge der agrotechnischen Forderung Bearbeitungsgeschwindigkeiten größer als 2 m/s erforderlich, dann wird der dynamische Widerstandsanteil im wesentlichen von der Widerstandskraft beeinflusst, die durch die Beschleunigung der Bodenteile verursacht wird. (Widerstandskraft infolge Änderung der Verformungsgeschwindigkeit nimmt bei Werten $v > 2$ m/s geringfügig ab).

Hieraus folgt, daß bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten Energieeinsparungen möglich sind, wenn es gelingt, Werkzeuge zu entwickeln, die den Boden minimal beschleunigen. Eine obere Grenze der Verformungsgeschwindigkeit stellt die Spannungsausbreitungsgeschwindigkeit im Boden dar. Eine Abhandlung hierüber erfolgt in [7]. Sie liegt je nach den Bodenparametern bei 125 bis 250 m/s [11].

Hinsichtlich des Einflusses der Feuchtigkeit und der Dichte auf die Bruchspannung können die Ergebnisse in [10] ihrer Tendenz nach bestätigt werden (Bilder 6 und 7).

Die gemessenen Bruchwinkel α (Bild 10) weisen eine relativ hohe Streuung s_z auf (Tafel 1). Ein eindeutiger Einfluß der Feuchtigkeit und der Dichte auf diesen Winkel und somit auf den inneren Reibwinkel ϱ_i konnte nicht festgestellt werden. Aus den Meßergebnissen geht hervor, daß sich bei dieser Versuchsanstellung geringere Reibungswinkel ergaben als mit dem Ringschergerät nach SÖHNE [12]. Diese Tatsache bekräftigt die Notwendigkeit der Schaffung von Meßmethoden zur eindeutigen Charakterisierung des Bodenzustandes.

Kennzeichnend ist, daß bei allen untersuchten Proben der Anstieg der Kraft in wesentlich kürzerer Zeit erfolgt als der Abfall. Diese Tatsache kann zur Zeit nur dadurch erklärt werden, daß nach Erreichen der Bruchlast die eine Hälfte der Probe auf der Bruchpyramide der anderen abgeleitet und dadurch noch eine Kraft nach dem eigentlichen Bruch übertragen wird.

3. Einschätzung

Die in dieser Untersuchung ermittelten dynamischen Kennwerte des Bodens und ihre mathematische Formulierung gestatten die Anwendung auf Probleme der Werkzeugentwicklung bei Bodenbearbeitungsgeschwindigkeiten über 2 m/s. Es bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten, ein rheologi-

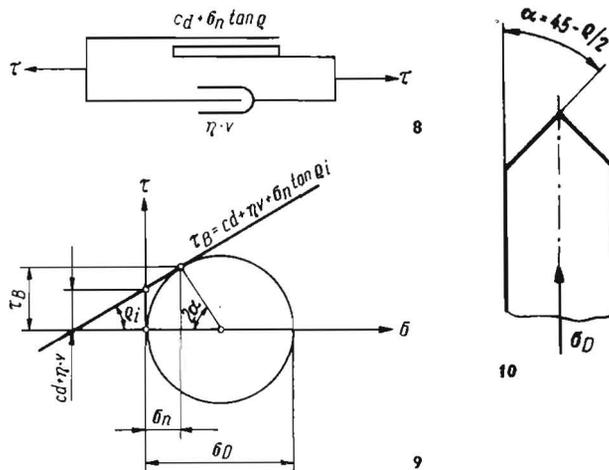


Bild 8. Rheologisches Modell des Bodens bei Verformungsgeschwindigkeiten über 2 m/s

Bild 9. Darstellung der Bruchbedingung

Bild 10. Messung des Bruchwinkels

sches Modell aufzustellen, das den gesamten Verformungsgeschwindigkeitsbereich beinhaltet.

Weiterhin sind die Meßergebnisse statistisch abzusichern, um Gesetzmäßigkeiten zwischen Viskosität, dynamischer Kohäsion und den anderen Bodenparametern, wie Dichte und Feuchtigkeit, eindeutig festlegen zu können.

Zusammenfassung

Für die Werkzeugentwicklung zur Bearbeitung des Bodens bei hohen Geschwindigkeiten ist es notwendig, sein Verhalten unter Einwirkung von hohen Verformungsgeschwindigkeiten zu kennen. Es werden experimentell ermittelte Kennwerte des Bodens unter Verformungsgeschwindigkeiten bis zu 10 m/s sowie ein rheologisches Modell für sein Verhalten im Verformungsgeschwindigkeitsbereich von $2 < v \leq 10$ m/s angegeben.

Literatur

- [1] SÖHNE, W.: Untersuchungen über die Form von Pflugkörpern bei erhöhter Fahrgeschwindigkeit. Grundlagen der Landtechnik (1955) H. 11, S. 22 bis 39
- [2] SÖHNE, W.: Einige Grundlagen für eine landtechnische Bodenmechanik. Grundlagen der Landtechnik (1956) H. 7, S. 11
- [3] LEHOCZKY, L.: Über die Auswirkung der Steigerung der Pfluggeschwindigkeit auf den Zugkraftbedarf und auf einige physikalische Eigenschaften des Bodens. Archiv für Landtechnik (1962) H. 1, S. 18
- [4] ROWE, R. J.: Influence of speed on elements of draft of all tillage tool. (Der Einfluß der Geschwindigkeit auf den Zugkraftbedarf eines Bodenbearbeitungswerkzeuges). Transactions of the ASAE 4 (1961) S. 55 bis 57
- [5] GUPTA, C. P. / A. C. PANDYA: Behavior of soil under dynamic loading: Its Application to Tillage Implements (Verhalten des Bodens unter dynamischer Last: Anwendung auf Bodenbearbeitungsgeräte). Transactions of the ASAE 10 (1967) S. 352 bis 358; 363
- [6] SIEMENS / WEBER / THORNBURN: Mechanics of soil as influenced by model tillage tools (Mechanische Eigenschaften des Bodens unter dem Einfluß von Modellbodenbearbeitungswerkzeugen) Transactions of the ASAE 8 (1967) H. 1, S. 1 bis 7
- [7] —: Voprosy tehnologii mehanizirovannogo sel'skochozjajstvennogo proizvodstva. (Technologische Probleme der mechanisierten landwirtschaftlichen Produktion.) Gosudarstvennoje izdatel'stvo sel'skochozjajstvennoj literatury, BSSR, Minsk 1963, S. 49 bis 79
- [8] HENDRICK, J. G. / VANDEN BERG: Strength and energy relations of a dynamically loaded clay soil. (Spannungs- und Energiebeziehungen eines dynamisch belasteten Lehmbodens.) Transactions of the ASAE 4 (1961) S. 31 bis 36
- [9] HANSON, T. L. / H. P. JOHNSON / D. F. YOUNG: Dynamik shearing resistance of soils. (Der dynamische Scherwiderstand von Böden.) Transactions of the ASAE 10 (1967) H. 4, S. 439 bis 443
- [10] BAGANZ, K.: Druckfestigkeit definierter Erdkluten bei unterschiedlichen Feuchtigkeiten und Dichten. Deutsche Agrartechnik 17 (1967) H. 11, S. 337 und 338
- [11] LORENZ: Grundbau-Dynamik. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer Verlag 1960, S. 199
- [12] DENNHARDT: Experimentelle Bestimmung bodenmechanischer Kennwerte von Ackerböden. Diplomarbeit 1969, TU Dresden. Sektion 16/I (unveröffentlicht) A 8310