

# Der Bruchmechanismus des Bodens bei der Bodenbearbeitung

Von **J. R. O'Callaghan**, Newcastle-upon-Tyne<sup>1)</sup>

Der Mechanismus der Bodenzerkleinerung durch einen senkrechten bzw. in Bewegungsrichtung schräggestellten Flachstahlzinken wird untersucht. Zwei Bruchformen für den flach- und den tiefarbeitenden Zinken werden beschrieben. Der Parameter, der diese Bruchformen bestimmt, ist das Verhältnis der Arbeitstiefe zur Arbeitsbreite des Zinkens. Die Gültigkeit der Modellvorstellung wurde durch einen Vergleich der berechneten mit den auf dem Feld gemessenen Zugkräften nachgewiesen.

Im Schrifttum der Bodenmechanik sind die Ergebnisse aufgezeigt, welche Bauingenieure über den Boden als „Werkstoff“ gewonnen haben. Wie bei der Untersuchung von Konstruktionswerkstoffen war es nötig, vereinfachende Annahmen zu treffen, um die Probleme mathematisch behandeln zu können. Den bisherigen Theorien fehlt eine exakte, umfassende Darstellung der Spannungszustände im Boden unter Last; sie ergaben aber brauchbare Methoden, um das Verhalten des Bodens zu berechnen, wenn er der statischen Belastung von Gebäuden ausgesetzt ist oder wenn die Belastung sehr langsam aufgebracht wird und ein Sicherheitsfaktor gegen Bruch erforderlich ist. In den letzten Jahren haben sich Landmaschineningenieure der Bodenmechanik zugewandt, um eine theoretische Erklärung für die Wirkungsweise von Raupenkettens, Rädern und Bodenbearbeitungswerkzeugen zu finden. Bei diesen Vorgängen ist die Geschwindigkeit der Lastaufbringung auf den Boden viel höher als dies auf dem Gebiet des Bauingenieurwesens der Fall ist; auch wird der Boden fast immer bis zum Bruch belastet.

Bodenwerkzeuge können als Flächen betrachtet werden, die dazu dienen, Kräfte auf den Boden aufzubringen. Wird ein solches Werkzeug durch den Boden gezogen, so wird der Boden vor dem Werkzeug einer Druckbeanspruchung ausgesetzt. Das Abscheren des Bodens unter dieser Beanspruchung erfolgt in dem gleichen Maße, wie das Werkzeug den Boden verdrängt.

Wenn sich der Boden im Ruhezustand befindet, wirkt die größte Normalspannung  $\sigma_1$  senkrecht; sie entspricht dem Bodengewicht:

$$\sigma_1 = \gamma t \tag{1}$$

Die entsprechende horizontale Spannung ist

$$\sigma_2 = \sigma_3 = K_0 \gamma t \tag{2}$$

wobei  $K_0$  den Koeffizient des Erddruckes in Ruhe,  $\gamma$  das spezifische Bodengewicht und  $t$  die Bodentiefe unterhalb der Erdoberfläche bedeuten.

Wenn eine ebene Platte senkrecht in den Boden eingetaucht und in horizontaler Richtung bewegt wird, so erhöht sich die horizontale Druckspannung im Boden vor der Platte. Wenn das kritische Stadium der Beanspruchung im Boden erreicht ist, bildet sich eine deutlich abgegrenzte Bruchfigur im Boden aus, wobei die Form der Bruchfigur von der geometrischen Form der Platte und der Größe der Scherkraftparameter des Bodens abhängt.

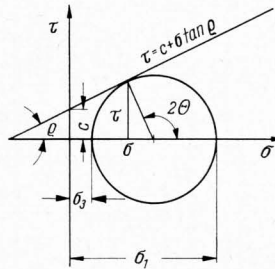
## Spannungsbedingungen beim Bruch des Bodens

In der Theorie der Bodenmechanik wird der Boden üblicherweise als steif-plastische, brüchige Masse angenommen. Unterhalb der Bruchspannung liegen die Verformungen im elastischen Bereich; diese sind so klein, daß sie vernachlässigt werden können. Die Bodenteilchen unterliegen sowohl der Reibung als auch der

Kohäsion. Beim Bruch folgt der Boden der Coulombschen Bruchbedingung

$$\tau = c + \sigma \tan \varrho \tag{3}$$

**Bild 1.** Dabei bedeuten  $\tau$  die Scherspannung beim Bruch,  $c$  die Bodenkohäsion,  $\sigma$  die Normalspannung und  $\varrho$  den Winkel der inneren Reibung.



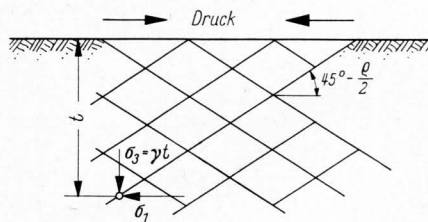
**Bild 1.** Coulombsche Gerade für kohäsiven Boden.

Verbindet man die Gl. (3) mit dem Mohrschen Spannungskreis, so zeigt sich, daß plastische Verformung im Boden dann auftritt, wenn in jedem Punkt die größte und die kleinste Normalspannung ( $\sigma_1$  und  $\sigma_3$ ) die Gleichung erfüllen:

$$\sigma_1 = 2c \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varrho}{2}\right) + \sigma_3 \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varrho}{2}\right) \tag{4}$$

Die Gleitflächen sind zur Richtung der größten Normalspannung

um  $\theta = \pm\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varrho}{2}\right)$  geneigt, **Bild 2.**



**Bild 2.** Gleitebenen bei einfachem kritischem Spannungszustand.

## Durch eine glatte Platte in der Bodenoberflächenzone verursachter Bruch

Wenn durch eine vertikale, ebene Platte mit glatter Oberfläche, die zu ihrer Arbeitstiefe verhältnismäßig breit ist, der Boden in horizontaler Richtung belastet wird, so bewirkt die entstehende Verformung des Bodens einen einfachen kritischen Spannungszustand, bei welchem die Gleitebenen um  $\theta = \pm\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varrho}{2}\right)$  zur Horizontalen geneigt sind; dabei wird eine kleine Bodenzone vor der Platte plastisch verformt.

Die senkrecht zur Platte wirkende Druckspannung ist im Boden in einer beliebigen Tiefe  $t$  gegeben durch

$$\sigma = 2c \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varrho}{2}\right) + \gamma t \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varrho}{2}\right) \tag{5}$$

Der auf die Platte wirkende Bodenwiderstand ist

$$P_1 = \int_0^t b \sigma dt \tag{6}$$

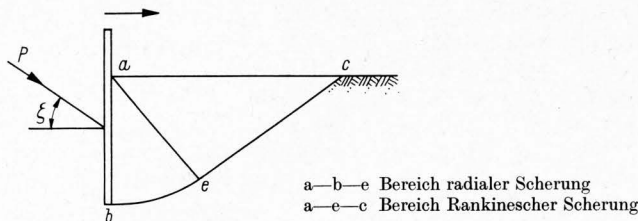
## Durch eine raue Platte in der Bodenoberflächenzone verursachter Bruch

Ist die Oberfläche der Platte rau, so werden die Kräfte nicht senkrecht zur Platte sein. Wenn sich die Platte vorwärts durch den Boden bewegt, schiebt sich der Boden an der Vorderseite

<sup>1)</sup> Vorgetragen auf der VDI-Tagung Landtechnik in Stuttgart am 25. Oktober 1966. Übersetzt von Dipl.-Ing. Rühling und Dipl.-Ing. Dobler, Hohenheim.

Prof. Dr. J. R. O'Callaghan ist Ordinarius für das Landmaschinenwesen an der University of Newcastle-upon-Tyne (England).

der Platte nach oben, wobei in der Berührungsschicht zwischen Boden und der rauhen Metalloberfläche eine Schubspannung auf-treten wird. Die resultierende Kraft, die von der Platte auf den Boden ausgeübt wird, ist nicht mehr horizontal, sondern um den Winkel  $\zeta$  gegen die Plattennormale geneigt, **Bild 3**. Das Bruch-

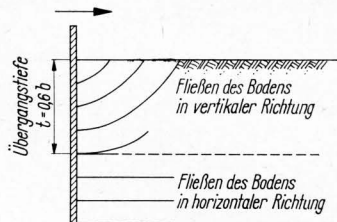


**Bild 3.** Bruchbild, hervorgerufen durch eine Platte mit rauher Oberfläche.

bild, das sich entwickelt, setzt sich zusammen aus einem Bereich radialer Scherkräfte a-b-e und einem passiven Rankineschen Bereich a-e-c.

Wenn eine Grenzscherspannung an der Übergangsstelle zwischen Platte und Boden auftritt, können die Gleitlinienfelder, die an der Platte angrenzen, analytisch nur unter der Annahme bestimmt werden, daß das Gewicht des Bodens vernachlässigt wird. Berücksichtigt man das Gewicht des Bodens, dann ändert sich der radiale Verlauf der Gleitlinien; der Druck, der auf die Stirnseite der Platte wirkt, kann entweder durch numerische Methoden oder durch die halbgraphische Methode von *Terzaghi* [1] gefunden werden. Vor kurzem wurden Kurvenscharen veröffentlicht [2], mit deren Hilfe die passiven Druckkräfte für die meisten zweidimensionalen Probleme der Bodenmechanik berechnet werden können.

Wenn eine tiefer gehende Platte senkrecht durch den Boden gezogen wird, so erfolgt der Bruch in zwei Zonen. Die Lage des Überganges von einer Zone zur anderen ist vom Tiefen/Breitenverhältnis der Platte abhängig. In der oberen Zone erfolgt der Bruch nach einem Bruchbild, das in der Bodenmechanik „passiver Erdwiderstand“ genannt wird. Der Boden fließt hier in Ebenen senkrecht zur Oberfläche. In der unteren Zone erfolgt der



**Bild 4.** Bruchbild bei einer tiefer gehenden Platte.

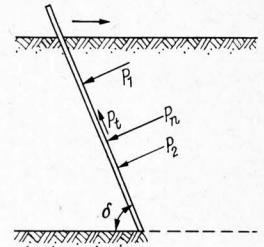
### Verwendete Formelzeichen

$c$	Kohäsion des Bodens
$k = t/b$	Verhältnis zwischen Arbeitstiefe und -breite des Werkzeuges
$K_0$	Koeffizient des Erddruckes in Ruhe
$P$	resultierende Bodenkraft
$P_H$	horizontale Kraft auf das Werkzeug (Bruchkraft)
$P_V$	vertikale Kraft auf das Werkzeug
$p_H$	(spezifischer) horizontaler Bodenwiderstand
$P_1$	normal zur Bodenplatte wirkende Bodenkraft in der Oberflächenzone
$P_2$	normal zur Platte wirkende Bodenkraft in der Tiefenzone
$P_n$	normal zur Platte wirkende Komponente der Gesamtbodenkraft
$P_t$	tangential zur Platte wirkende Komponente der Gesamtbodenkraft
$\delta$	Anstellwinkel des Werkzeuges
$\gamma$	Wichte des Bodens
$\zeta$	Winkel zwischen dem resultierenden Bodenwiderstand und der Horizontalen
$\theta$	Winkel zwischen Bodenoberfläche und Bruchlinie
$\rho$	Winkel der inneren Reibung des Bodens
$\sigma$	Normalspannung
$\sigma_1$	größte Hauptspannung
$\sigma_2$	mittlere Hauptspannung
$\sigma_3$	kleinste Hauptspannung
$\tau$	Scherfestigkeit

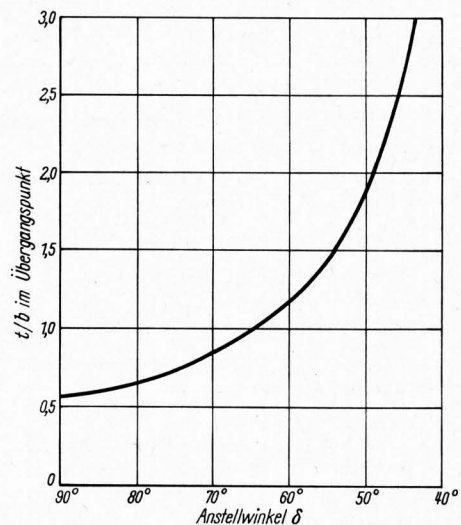
Bruch nach einem Bruchbild, das als „Boden unter einer Streifenlast“ bekannt ist. Hier fließt der Boden in horizontalen Ebenen, **Bild 4**. Theoretisch erfolgt der Übergang bei einem Tiefen/Breitenverhältnis von 1:2. Aufgrund von Messungen wurde nachgewiesen, daß für eine senkrechte Platte der Übergang bei  $t = 0,6 b$  liegt.

### Geneigte Platte in der Bodenoberflächenzone

Wenn die Platte nach **Bild 5** in Arbeitsrichtung geneigt ist, so kann der Erddruck, der zum Bruch des Bodens erforderlich ist, nach den gleichen Methoden wie für eine vertikale Platte berechnet werden.



**Bild 5.** Kräfte auf eine bewegte, in Arbeitsrichtung geneigte Platte.

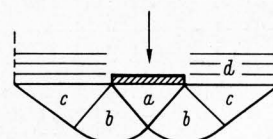


**Bild 6.** Tiefe des Übergangspunktes zwischen den beiden Zonen in Abhängigkeit vom Anstellwinkel der Platte.

Die Kraft  $P$ , die vom Boden auf eine geneigte Platte ausgeübt wird, kann in zwei Komponenten aufgelöst werden: in eine Komponente  $P_n$  normal zur Platte und eine Komponente  $P_t$  tangential zur Platte. Mit abnehmendem Anstellwinkel  $\delta$  wirkt eine Komponente der Resultierenden nach unten und verbessert so das Eindringen der Platte in den Boden. Wenn die Platte in Arbeitsrichtung geneigt ist, dann ist die resultierende Kraft der Platte auf den Boden nach oben gegen die freie Oberfläche des Bodens gerichtet. Der Boden leistet beim Bruch weniger Widerstand als im Falle der senkrechten Platte; der Übergang von einer Zone zur anderen verschiebt sich weiter nach unten. Experimentelle Werte von  $t/b$  beim Übergangspunkt sind in **Bild 6** als Funktion des Anstellwinkels  $\delta$  dargestellt.

### Durch eine Platte in der Tiefenzone verursachter Bruch

Im kritischen Spannungszustand bildet sich ein Bodenkeil a vor der Platte, **Bild 7**. An beiden Seiten des Keiles erscheinen Zonen b radialer Scherung. Zonen einfacher Rankinescher Scherung bilden sich außerhalb der radialen Scherzonen. Diese Rankineschen Zonen c sind der seitlichen Verdichtung, welche durch den Keil entsteht, zuzuschreiben.



**Bild 7.** Platte in der Tiefenzone.

- a Bodenkeil
- b Bereich radialer Scherung
- c Bereich Rankinescher Scherung
- d aufgelockerter Boden

Wenn man das Problem zweidimensional betrachtet und das Gewicht des Bodens vernachlässigt, kann man die Lösung von Prandtl für die Berechnung der Grenzspannung bei Bruch anwenden:

$$p_H = \frac{c}{\tan \varrho} \left[ \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varrho}{2} \right) e^{\pi \tan \varrho} - 1 \right] \quad (7).$$

Die Formel gilt zur Widerstandsbestimmung für den Teil der Platte nahe der Bodenoberfläche, der über dem Übergangspunkt liegt. Der Gesamtwiderstand  $P_H$  einer Platte in der Tiefenzone ist

$$P_H = P_1 + \frac{b(t - kb)}{\tan \varrho} c \left[ \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varrho}{2} \right) e^{\pi \tan \varrho} - 1 \right] \quad (8).$$

### Feldversuche

Die Gültigkeit von Gl. (8) wurde durch Zugkraftmessungen im Feldversuch bewiesen. Durch über 500 Versuche wurden die theoretisch errechneten Werte bestätigt, Bild 8. Die Ergebnisse dieser Versuche zeigen, daß

1. die Gl. (8) zufriedenstellend für die Berechnung des Bodenwiderstandes rechteckiger, ebener Platten ist, wenn diese dazu gebraucht werden, landwirtschaftlich genutzten Boden zu zerkleinern,
2. es zwei verschiedene Bruchvorgänge gibt, entsprechend der Zone nahe der Bodenoberfläche und der Tiefenzone,
3. der Übergang von einem Vorgang zum anderen vom Tiefen-Breitenverhältnis der Platte abhängt,
4. mit dem kleiner werdenden Anstellwinkel  $\delta$  einer Platte dieser Übergang in einer größeren Tiefe stattfindet,
5. der Bruchwiderstand mit zunehmender Tiefe in der Tiefenzone schneller wächst als in der Zone nahe der Bodenoberfläche und
6. der Bruchwiderstand mit abnehmendem Anstellwinkel  $\delta$  abnimmt.

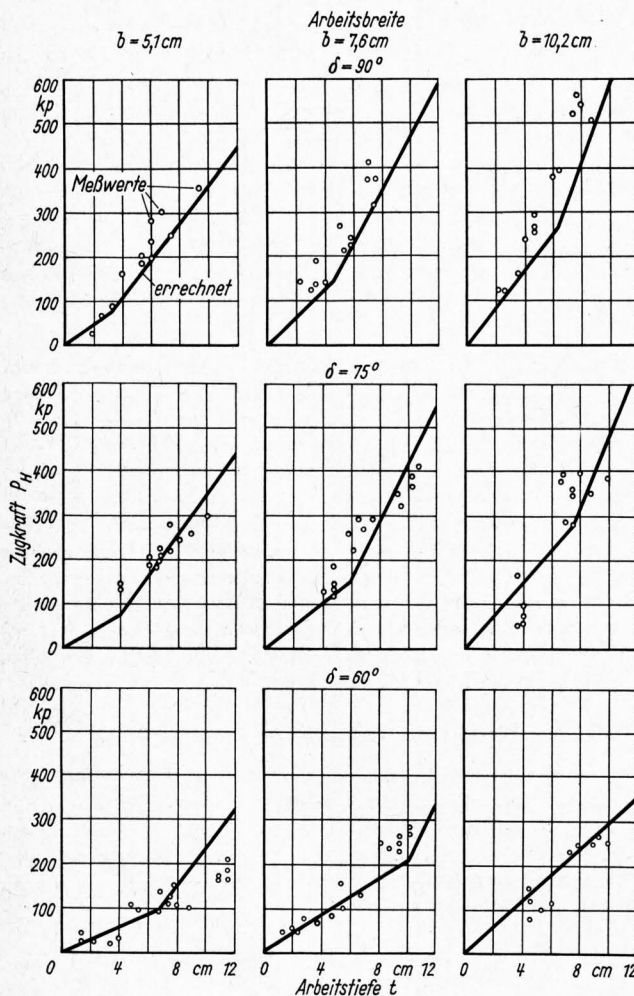


Bild 8. Vergleich zwischen gemessenen und nach Gl. (8) errechneten Zugkräften in Abhängigkeit von der Arbeitstiefe für je drei verschiedene Zinkenbreiten  $b$  und Anstellwinkel  $\delta$ .

### Konstruktion von Hackgeräten

Welche Konsequenzen können aus diesen Versuchen für die Konstruktion von Hackgeräten gezogen werden? Die Abmessungen der Zinken an Hackgeräten sind so, daß sie als „tiefe Platten“ bezeichnet werden können. Es ist nicht zweckmäßig, Platten ohne Keilwinkel als Zinken zu benutzen, weil vor solchen Zinken an der tiefer liegenden Zone ein Bodenkeil gebildet wird, der während der Arbeit sich an der Plattenvorderseite aufwärts bewegt und Erdklumpen im Saatbett bildet.

Um den Boden durch eine Belastung in horizontaler Richtung zu zerkleinern, ist es nötig, daß ein Widerstand des Bodenkörpers vorhanden ist, unter dessen Wirkung der Boden zum Brechen gebracht werden kann. Beim ersten Hacken ist gewöhnlich ein solcher Widerstand vorhanden, und der Zerkleinerungseffekt von Hackgeräten mit Zinken ist hoch. Bei nachfolgendem Hacken ist der Boden jedoch lose, so daß es schwierig ist, eine weitere Zerkleinerung des Bodens mit horizontal arbeitenden Zinkenwerkzeugen zu erreichen.

Die Kraft, die am Hackgerät aufgewendet werden muß, hängt direkt von der Fläche der Platten im Boden und dem Anstellwinkel der Platten ab. Die Verkleinerung der Stirnfläche der Platte ist von entscheidender Bedeutung bei der Verbesserung des Wirkungsgrades der unter Boden arbeitenden Werkzeuge. Voruntersuchungen mit Hackgeräten haben gezeigt, daß breitere Zinken, die größere Kräfte zur Brucherzeugung im Boden erfordern, auch ein größeres Maß an Zerkleinerung erzeugen als schmale Zinken. Der Unterschied in der Wirkung ist jedoch nicht so groß wie die aufgewendete Kraft erwarten läßt. In jedem Fall verminderte eine Neigung der Platte in Arbeitsrichtung den Kraftbedarf zur Brucherzeugung im Boden, ohne die Gesamtzerkleinerung zu vermindern. Das bedeutet, eine Neigung der Platte erhöht ihre technologische Wirkung im Vergleich zum energetischen Aufwand.

### Keilförmige Zinken

Die Mehrzahl der Hackmaschinenwerkzeuge sind keine ebenen Flachstahlzinken, sondern haben einen winkelförmigen Querschnitt. Bei Zugkraftmessungen mit winkelförmigen Zinken mit Winkeln zwischen  $60^\circ$  und  $90^\circ$  fand man, daß diese sich nahezu ähnlich verhalten wie ebene Zinken mit gleichen Hauptabmessungen. Der Hauptunterschied zwischen einem winkelförmigen und einem Flachstahlzinken besteht darin, daß beim winkelförmigen Zinken ein Stahlkeil den Bodenkeil, der sich vor dem Flachstahlzinken bildet, ersetzt und so weniger Erdklumpen erzeugt werden.

### Schwingende Zinken

Es zeigte sich, daß relativ große Kräfte entwickelt werden müssen, um bei stetig aufgebrachtter Belastung Bruch zu erzeugen. Bei schwingenden Zinken fand man, daß für Frequenzen im Bereich von 10 bis 35 Hz die Zugkraft in dem Maße abnimmt, wie die Frequenz erhöht wurde. Die Zugkraft hängt ferner von der Amplitude der Schwingung und der Arbeitsgeschwindigkeit ab, Bild 9. Die Erforschung des Bruchvorganges im Boden bei schwingenden Zinken wird fortgesetzt.

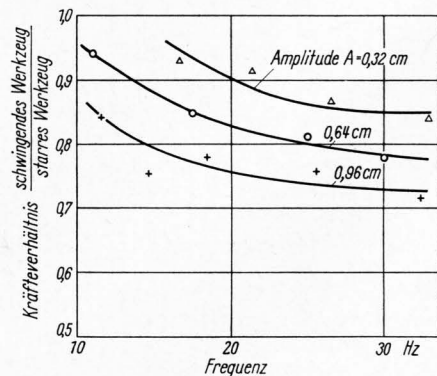


Bild 9. Kräfteverhältnis zwischen starren und schwingenden Werkzeugen in Abhängigkeit von der Frequenz für drei verschiedene Amplituden.

## Schrifttum

- [1] *Terzaghi, K.*: Theoretical soil mechanics. New York: J. Wiley & Sons Inc., 1943. (Deutsche Übersetzung durch *R. Jelinek*: Theoretische Bodenmechanik. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer-Verlag 1954.)
- [2] *Hettiaratchi, D. R. P., B. D. Witney und A. R. Reece*: The calculation of passive pressure in two-dimensional soil failure. J. Agric. Engng. Res. **11** (1966) Nr. 2, S. 89/107.

- [3] *O'Callaghan, J. R., und K. M. Fareilly*: Cleavage of soil by tined implements. J. Agric. Engng. Res. **9** (1964) Nr. 3, S. 259/70.
- [4] *O'Callaghan, J. R., und P. J. McCullen*: Cleavage of soil by inclined and wedge-shaped tines. J. Agric. Engng. Res. **10** (1965) Nr. 3, S. 248/54.
- [5] *Eggenmüller, A.*: Versuche mit schwingenden Hackwerkzeugen. Grndl. Landtechn. Heft **10** (1958) S. 70/88 und 143/50.

DK 624.131

# Beitrag zur Gestaltung von zinkenartigen Bodenbearbeitungswerkzeugen

Von **Wolfgang Vornkahl**, Hannover<sup>1)</sup>

Eine wirkungsvolle Maßnahme zur Steigerung der Produktivität bei landwirtschaftlichen Arbeiten ist die Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeit. Ihre Auswirkung auf die Gestaltung von Bodenbearbeitungswerkzeugen für die verschiedenen Einsatzbedingungen ist theoretisch nur schwierig zu erfassen. In der landtechnischen Bodenmechanik wird versucht, die Vorgänge zwischen Boden und Werkzeugen unter Annahme von Bruchbildern mit Hilfe von Theorien aus der (statischen) bautechnischen Bodenmechanik zu erklären. Die Gültigkeit dieser Theorien wird jedoch von der Werkzeugform und der Arbeitsgeschwindigkeit beeinflusst.

Die Untersuchungen über den Bodenwiderstand von gezogenen, zinkenartigen Bodenwerkzeugen unterschiedlicher Form bei steigender Arbeitsgeschwindigkeit wurden in einer mit trockenem Feinsand gefüllten Bodenrinne vorgenommen [1]. Die geometrischen Abmessungen der Werkzeuge, **Bild 1**, wurden in folgenden Bereichen verändert:

Werkzeugbreite  $b = 20$  bis  $80$  mm;  
Keilwinkel  $\varphi = 30$  bis  $180^\circ$ ;  
Anstellwinkel  $\delta = 45$  bis  $90^\circ$ .

Die Arbeitstiefe  $t = 135$  mm wurde konstant gehalten, so daß nach *O'Callaghan* [2] die Werkzeuge mit einem Tiefen/Breitenverhältnis größer als 0,6 als relativ tieferarbeitend gelten können. Mit einer elektronischen Meßeinrichtung wurden die horizontale Bodenkraft  $P_H$ , die vertikale Bodenkraft  $P_V$ , der Winkel  $\zeta$  zwischen der resultierenden Bodenkraft  $P$  und der Horizontalen sowie der Abstand  $f$  zwischen dem Angriffspunkt des resultierenden Bodenwiderstandes und der Bodenoberfläche ermittelt.

Die Arbeitsgeschwindigkeit  $v$  konnte in fünf Stufen zwischen 1,1 und 5,5 m/s bzw. etwa 4 und 20 km/h eingestellt werden; mit der Versuchseinrichtung konnte also der Einfluß höherer Geschwindigkeiten, als sie heute in der landwirtschaftlichen Praxis üblich sind, untersucht werden. Ferner wurde die von den Werkzeugen hervorgerufene Bodenverformung ermittelt, da zum Verständnis der komplexen Vorgänge beim Aufbrechen des Bodens durch ein Werkzeug der Bodenwiderstand und die Bodenverformung in einem engen Zusammenhang betrachtet werden müssen [1].

Der Bodenwiderstand läßt sich in einen statischen, von der Arbeitsgeschwindigkeit unabhängigen und in einen dynamischen, vom Quadrat der Geschwindigkeit abhängigen Anteil aufteilen. Die von *Gorjatschkin* [3] entwickelte Gleichung wurde für die Auswertung der Meßwerte zugrunde gelegt:

$$p = z + \varepsilon v^2 \quad (1),$$

darin ist  $p$  der Bodenwiderstand bezogen auf die wirksame

<sup>1)</sup> Vorgetragen auf der VDI-Tagung Landtechnik in Stuttgart am 25. Oktober 1966. Es wird über Teilergebnisse einer am Institut für Landtechnik Stuttgart-Hohenheim durchgeführten Forschungsarbeit berichtet, die mit Mitteln des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Nordrhein-Westfalen durchgeführt wurde.

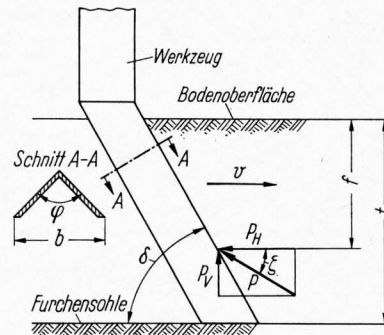
Dipl.-Ing. Wolfgang Vornkahl war wissenschaftlicher Assistent am Institut für Landtechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. Georg Segler) in Stuttgart-Hohenheim und ist jetzt im Radschlepperversuch der Rhein Stahl Hanomag AG in Hannover tätig.

Werkzeugfläche ( $b t$ ),  $z$  der statische Widerstandsanteil,  $v$  die Arbeitsgeschwindigkeit und  $\varepsilon$  der Geschwindigkeitsfaktor.

$\varepsilon$  ist von der Werkzeugform und dem bewegten Boden abhängig. Um den Einfluß der Bodenmassen zu eliminieren, kann

$$\varepsilon = \frac{\gamma}{g} x \quad (2)$$

gesetzt werden, worin  $\gamma$  die Wichte des Bodens,  $g$  die Erdbeschleunigung und  $x$  ein dimensionsloser Geschwindigkeitsfaktor bedeuten.



**Bild 1.** Bezeichnungen bei den Versuchszinken.

- $b$  Werkzeugbreite
- $t$  Arbeitstiefe
- $v$  Arbeitsgeschwindigkeit
- $\varphi$  Keilwinkel des Zinkenquerschnittes
- $\delta$  Anstellwinkel des Werkzeuges gegenüber der Furchensohle
- $P$  resultierende Bodenkraft
- $P_H$  horizontale Bodenkraft
- $P_V$  vertikale Bodenkraft (positiv bei Wirkung von unten nach oben)
- $f$  Abstand zwischen Bodenoberfläche und Angriffspunkt der resultierenden Bodenkraft
- $\zeta$  Neigungswinkel zwischen der resultierenden Bodenkraft und der Horizontalen

## Statischer Widerstandsanteil

Der statische Widerstandsanteil läßt sich mit Gleichungen [2; 4] berechnen, die aus typischen Aufgaben der bautechnischen Bodenmechanik entwickelt wurden. Bei zinkenartigen Bodenwerkzeugen ist der Bodenaufbruch ein Verdrängungsvorgang. Er läßt sich rechnerisch unter Verwendung der Bodenkennziffern, der Kohäsion und des inneren Reibungsbeiwertes des Bodens auf die beiden Bruchbilder für den Fall einer mit Boden hinterfüllten Wand großer Breite (des passiven Erdwiderstandes) und für den Fall eines Bodens unter einer Streifenlast (der Tragfähigkeit) zurückführen. Je nach dem Tiefen/Breitenverhältnis des Werkzeuges herrscht die Bruchform nach der Tragfähigkeit oder nach dem passiven Erdwiderstand vor, wobei im letzteren Fall das Aufbrechen des Bodens die geringeren Kräfte erfordert. *O'Callaghan* [2] entwickelte und bestätigte seine Gleichungen für einen Boden mit relativ großer Kohäsion und geringem inneren Reibungsbeiwert. Nach den vorliegenden Ergebnissen läßt sich der statische Bodenwiderstand auch bei Boden mit geringer Kohäsion und großem inneren Reibungsbeiwert mit diesen Gleichungen erfassen.