

Einige Grundlagen für eine Landtechnische Bodenmechanik

Von Walter Söhne

Unter „Landtechnischer Bodenmechanik“ verstehen wir die Lehre von den mechanischen Gesetzmäßigkeiten des Ackerbodens, insbesondere bei der Wechselwirkung zwischen Ackerboden und landwirtschaftlichen Geräten. Sie umfaßt:

1. Alle unter der Einwirkung von Maschinen und Geräten im Boden auftretenden Kräfte, Spannungen, Verformungen und sonstigen physikalischen Veränderungen des Bodens, wie
 - a) die Druckverteilung im Boden unter Schlepper- und Landmaschinenreifen,
 - b) die Gesetze der Bodenverformung, und zwar der elastischen Verformung, der Bodenverdichtung und des plastischen Fließens in Abhängigkeit von der Druckverteilung,
 - c) die Übertragung horizontaler Kräfte auf den Boden und die damit verbundenen Verformungen und Abscherungen des Bodens und ihr Einfluß auf den Schlupf der Schlepperreifen,
 - d) die Untersuchung der bei der Bodenbearbeitung, z.B. beim Pflügen, auftretenden Vorgänge des Lockerns, Wendens und Mischens und die Messung und Aufgliederung der hierzu erforderlichen Kräfte.
2. Die Untersuchungen der physikalischen Eigenschaften der Ackerböden, soweit sie sich unter der Einwirkung von Geräten ändern, wie
 - a) die Bestimmung des Porenvolumens und des Wassergehaltes des Bodens,
 - b) Messungen der Verdichtbarkeit des Bodens in Abhängigkeit vom Wassergehalt,
 - c) die Bestimmung der Reibungsbeiwerte und der Adhäsion zwischen Stahl oder Gummi und Boden sowie der Kohäsion im Boden und der Reibung Boden auf Boden,
 - d) Messung der Wasser- und Luftdurchlässigkeit in verdichteten Bodenschichten.
3. Die Anwendung der theoretischen und empirischen Erkenntnisse vom Boden beim Entwurf von Landmaschinen und Geräten sowie bei landwirtschaftlichen Maßnahmen, z.B.
 - a) beim Entwurf der Schlepperreifenprofilierung und bei der Reifenwahl für Schlepper und Landmaschinen,
 - b) beim Entwurf von Pflugstreichblechen und anderen Bodenbearbeitungswerkzeugen,
 - c) bei den verschiedenen Methoden der Bodenbearbeitung.

Nun sind in der Vergangenheit die Bodenbearbeitungsgeräte im wesentlichen empirisch entwickelt worden. Bei der Dimensionierung von Schlepper- und Landmaschinenrädern und -reifen und bei der Entwicklung von Reifenprofilen hat man sich ebenfalls vor allem von Erfahrungswerten leiten lassen. Der Amerikaner *M.L. Nichols* nennt die Pflugkonstruktion eine Kunst, die für bestimmte Böden manche gute Pflüge geschaffen hätte; für andere Böden dagegen fehlten noch geeignete Geräte.

Vor 75 Jahren bezeichnet Prof. *Perels*, ein Landwirt, den analytischen Weg, Streichbleche auf Grund der Theorie zu entwickeln, als total unfruchtbar [1]. *A. Föppl*, bekanntlich ein hervorragender Mechaniker, nennt diesen Vorwurf einzigartig [2], da er einen mechanischen Vorgang betreffe, der eine der wichtigsten menschlichen Arbeiten sei. Als Grund für den Mißerfolg der Theorie gibt er an:

1. die Schwierigkeiten der Materie infolge der Verschiedenheit der Böden und ihrer Eigenschaften,
2. das geringe Interesse der Forscher auf dem Gebiet der Mechanik,
3. den fehlenden Kontakt und die fehlende Wechselwirkung zwischen Wissenschaft und den Erfahrungen der Praxis.

Der praktische Landwirt und der wissenschaftliche Mechaniker stünden sich fremd gegenüber, es herrsche sogar Mißtrauen des Landwirts wie auch der Pflugersteller gegenüber der Theorie.

Studiert man die umfangreichen, wissenschaftlichen Veröffentlichungen über das Pflügen, so findet man zwar recht gute, den Vorgang beschreibende Arbeiten, auch wertvolle Berichte über Messungen, dagegen sind die Arbeiten, die das Streichblech und seine Wirkung einer mechanischen Analyse unterziehen, häufig einseitig mathematisch ausgerichtet und gehen zum Teil an den wirklichen Vorgängen auf dem Streichblech vorbei. Es ergibt sich also folgendes Bild: Auf einem klassisch einfachen Gerät, nämlich dem Streichblechpflug, spielt sich ein ziemlich komplizierter, technologischer Vorgang ab. (Eine Ausnahme bildet lediglich die Arbeit des englischen Wendepfluges beim Rasenumbruch.) Man hat gute Pflüge empirisch entwickelt, und man kann durch den Augenschein feststellen, daß sie befriedigende Arbeit leisten. Man hat jedoch noch keine völlig befriedigende Kenntnis des me-

chanischen Vorganges auf dem Streichblech mit einer Aufgliederung der Pflugarbeit in ihre Komponenten für Schneid- und Lockerungsarbeit, Hub- und Beschleunigungsarbeit und Reibungsverluste auf dem Streichblech und im Boden.

Will man diese Erkenntnisse gewinnen, so muß man u.E. durch Experimente im Laboratorium und in der Bodenrinne sowie durch Messungen und Untersuchungen auf dem Acker versuchen, die Lücken in der Theorie zu schließen. Dabei mag auch der Zeitlupenfilm eine Hilfe sein. Mit den Schwierigkeiten, die sich aus der großen Vielfalt der Erscheinungsformen des Ackerbodens mit seinem wechselnden Wassergehalt und Porenvolumen ergeben, muß man fertig werden, indem man beispielsweise eine kleine Anzahl typischer „Idealböden“ vom Sand bis Ton untersucht und sich begnügt, die Tendenzen zu erkennen, die sich z.B. bei veränderter Feuchtigkeit und Bodendichte ergeben.

Schon jetzt wird ein Konstrukteur von Anbaupflügen sich seine Arbeit erleichtern, wenn er sich der Meßergebnisse über die Größe der Kraftkomponenten und ihrer Streuung am Streichblech bedient. Je größer der Umfang der wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Vorgänge beim Pflügen und bei der übrigen Bodenbearbeitung wird, umso weniger wird der Konstrukteur in Zukunft auf sie verzichten können, wenn er weitere Fortschritte erzielen will [8]. Vor allem erscheint das auch notwendig bei der Entwicklung neuer Bodenbearbeitungsverfahren, die beim Übergang vom Pferdegespann zum Schlepper denkbar sind. Angesichts des ungeheuren Arbeits- und Zeitaufwandes, den die Bodenbearbeitung alljährlich erfordert, ist der verhältnismäßig geringfügige Aufwand für eine Erforschung der bodenmechanischen Vorgänge bei der Bodenbearbeitung gerechtfertigt, selbst wenn beim Pflug nur noch geringe Verbesserungen zu erwarten sind. Jedenfalls dürften die Einwände, die vor 50 Jahren der Pflugersteller hatte, heute nicht mehr zutreffen.

Es darf bei diesen Überlegungen an eine Parallele erinnert werden, die sich vor 50 Jahren in der Strömungslehre ergeben hatte. Damals gab es schon eine hochentwickelte, theoretische Hydromechanik, die – ausgehend von einer reibungslosen Flüssigkeit – es gestattete, auf Grund der Potentialtheorie die Druck- und Auftriebsverteilung an umströmten Körpern, wie Kugeln, Zylindern und Profilen, zu berechnen. Man konnte jedoch in der Praxis nichts damit anfangen, da sich nach der Theorie immer der Strömungswiderstand Null ergab. Aus diesem Grunde hatten die Praktiker sich daneben eine eigene empirische Disziplin, die Hydraulik, entwickelt, die es an Hand zahlreicher Versuche gestattete, Strömungswiderstände von Körpern und Strömungsverluste in Rohrleitungen zu berechnen.

Es gelang damals *L. Prandtl* mit seiner Grenzschichttheorie eine Brücke zwischen theoretischer Hydrodynamik und Hydraulik zu schlagen. Dabei dienten ihm Experimente – vor allem Messungen im Windkanal – als Hilfsmittel, die Theorie zu entwickeln, zu untermauern und Lücken zu schließen.

Der bodenmechanische Vorgang beim Pflügen

Von den einleitend genannten Problemen der landtechnischen Bodenmechanik soll zunächst der Vorgang beim Pflügen näher betrachtet werden. Dieser Vorgang kann aufgliedert werden in

1. das Abtrennen des „Erd balkens“ durch Sech und Schar,
2. das Wenden des „Erd balkens“ und die mit dem Abtrennen und Wenden verbundene Verformung des „Erd balkens“ durch Scherung, Biegung, Verdrehung und Stauchung bis zum Aufbrechen in Krümeln und Schollen; dazu wird der „Erd balken“ angehoben und ihm eine gewisse Relativgeschwindigkeit zum umgebenden Erdreich erteilt;
3. das Ablegen des „Erd balkens“; verbunden mit einer weiteren Drehung und Scherung. Sie werden dadurch hervorgerufen, daß der Erd balken unten wieder mit dem Erdboden bzw. der benachbarten Furche in Berührung kommt, die ihn abbremsst und festhält, während er oben von der Streichblechkante noch mitbewegt wird, so daß er weiterkippt, auseinandergeschert und gelokkert wird.

Entsprechend kann man auch die beim Pflügen aufgewendete Arbeit aufgliedern in

1. die Schneidarbeit von Sech und Schar,
2. die damit verbundene Verformungsarbeit durch Scherung, Biegung, Verdrehung und Stauchung bis zum Aufbrechen des Bodens in Krümeln und Schollen, wobei die Kohäsion und innere Reibung bei der Relativbewegung der Bodenteile gegeneinander überwunden werden muß.
3. die Hub- und Beschleunigungsarbeit des Erd balkens,
4. die Arbeit zur Überwindung der Reibung zwischen Erd balken und Streichblech,
5. die Arbeit zur Überwindung der Reibung zwischen Pflugsohle, Anlage und Boden.

Das Abscheren des Bodens beim Pflügen

Eine Untersuchung des Vorganges auf dem Streichblech ergab, wie im Folgenden näher gezeigt wird, daß die Zertrümmerung des „Boden balkens“ vorzugsweise durch Abscheren erfolgt, d.h., daß die Kohäsion im Boden im wesentlichen durch Schubspannungen überwunden wird. Dem gegenüber spielen reine Zugspannungen nur eine untergeordnete Rolle. Das ist nicht nur bei direkten Scher- und Torsionsbeanspruchungen, sondern auch bei Druckbeanspruchungen der Fall. Bekanntlich sind, wie

auch der Mohrsche Spannungskreis zeigt, immer dann Schubspannungen vorhanden, wenn die Hauptspannungen (in diesem Falle Hauptdruckspannungen) verschieden groß sind. Beim Abscheren bilden sich Scherflächen, die die Schollen voneinander trennen. Die Scherkraft hat neben der Kohäsion, also dem inneren Zusammenhalt der Bodenteilchen, einen beträchtlichen Reibungsanteil zu überwinden, der umso größer ist, je größer der Normaldruck im Boden ist. Formelmäßig gilt für die Scherspannung

$$\tau_B = c + \mu \sigma_d$$

wobei c die Kohäsion in kg/cm^2 , μ den Reibungsbeiwert und σ_d die Normaldruckspannung in der Scherebene bedeutet. Für eine bestimmte Scherfläche F ergibt sich die Scherkraft

$$T_{\max} = cF + \mu \sigma_d F = cF + \mu N$$

wobei N die Normaldruckkraft in der Scherebene ist. Die Arbeit zur Überwindung des Reibungsanteils ist Verlustarbeit.

Mit einfachen Schneidwerkzeugen in der Bodenrinne

Der erste Schritt zur Vertiefung der Kenntnisse auf dem Streichblech ist, wie schon oben bemerkt wurde, das Studium der Elementarvorgänge zwischen einfachen Schneidwerkzeugen, die sich schrittweise den Pflugformen und anderen Werkzeugformen annähern, und dem Boden in der Bodenrinne. In der Bodenrinne kann man gleichmäßige und gleichbleibende Bodenverhältnisse einhalten; man kann aber auch das Porenvolumen, also die Bodendichte, wie auch die Bodenfeuchtigkeit variieren.

Die Untersuchungen in der Bodenrinne wurden mit Schneidwerkzeugen in Form von geneigten Ebenen begonnen, die scharfartig den Boden durchschneiden und aufbrechen. Bild 1 bis 4 zeigen die verschiedenen Aufbruchsmöglichkeiten des Bodens, wie sie in der Bodenrinne beobachtet werden konnten. Dabei sind vor dem Wiederverdichten des gefrästen Bodens Farbebenen (F) eingebracht worden. Bild 1 gibt das Aufbrechen eines Sandes über einer schiefen Ebene wieder. Der Sand ist in diesem Falle verhältnismäßig dicht gelagert, so daß er durch statische Belastung in der Größenordnung der Schnittkräfte nur noch geringfügig verdichtet werden kann. Seine Feuchtigkeit ist nicht groß genug, als daß er plastisch fließen könnte. Dann spielt sich der Schneidvorgang folgendermaßen ab: Die Schneidkante versucht, den Sand nach oben zu verdrängen und ruft in ihm ein Spannungsfeld hervor.

Sobald die Schubspannung die Größe der Scherspannung, also der Kohäsion zuzüglich der inneren Reibung, erreicht hat, bildet sich eine Scherfläche, die sich schnell bis zur Bodenoberfläche ausdehnt. Der dadurch abgetrennte Bodenkörper schiebt sich auf der Scherfläche und dem Werkzeug nach oben. Denkt man das Werkzeug feststehend und den Boden

sich bewegend, so ergeben sich die eingezeichneten Geschwindigkeitsvektoren. Dieser Vorgang wiederholt sich periodisch, wobei nach jedem Abtrennen eines neuen Gleitkörpers, d.h. nach Überwindung der Kohäsion, der Schnittwiderstand zurückgeht, um dann allmählich infolge des Verdrängungswiderstandes vor der Schneidkante wieder bis zum Maximalwert im Augenblick des Abtrennens eines neuen Gleitkörpers anzuwachsen. Der Abstand der Scherflächen voneinander ist nicht immer völlig gleich. Er kann von einem Mittelwert um $\pm 50\%$ abweichen. Im großen und ganzen aber erfolgt der Vorgang doch in ziemlich regelmäßigem Abstand. Sobald sich eine neue Scherfläche gebildet hat, kommt die Bewegung in der vorhergehenden zur Ruhe. Der Abstand der Scherflächen voneinander ist abhängig von der Furchentiefe. Je geringer die Furchentiefe ist, umso enger folgen die Scherflächen aufeinander.

Bild 2 zeigt das Verhalten eines feuchten Lehmbodens, der sich schon etwas mehr plastisch verformen kann. Hierbei wird der Abstand der Scherflächen voneinander größer und auch die Neigung der Scherflächen zur Horizontalen wird größer. In Bild 3 sieht man das Verhalten eines nassen, sich plastisch verformenden Bodens, bei dem sich keine ausgesprochenen Scherflächen mehr ausbilden. Ein Bodenelement wird in der herausgezeichneten Weise plastisch deformiert.

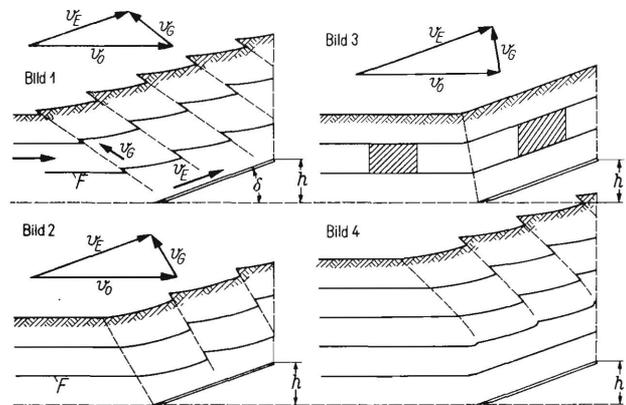


Bild 1 bis 4. Verschiedene Aufbruchformen des Bodens beim Schneiden mit einer geneigten Ebene.

- Bild 1, bei dichtgelagertem, nicht zu feuchtem Sand,
Bild 2, bei feinsandigem Lehm mit normaler Ackerfeuchtigkeit,
Bild 3, bei nassem, plastisch deformierbarem Boden,
Bild 4, bei dicht gelagertem, nicht zu feuchtem Sand bei grösserer Furchentiefe.

- F gefärbte Ebenen im Boden
 v_o Geschwindigkeit des Bodens gegenüber der geneigten Ebene
 v_E Relativgeschwindigkeit des Bodens entlang der geneigten Ebene
 v_G Relativgeschwindigkeit Boden gegen Boden in der Scherfläche

In der Ausbildung der Scherflächen können sich, wie die Versuche zeigten, folgende Verzögerungen ergeben: je größer die Furchentiefe ist, desto größer wird die erforderliche Scherkraft T_{\max} in der Scherfläche, und desto mehr wird sich der Boden über der

Schneide erst plastisch verformen und verdichten. Eine Verdichtung kann vor allem dann stattfinden, wenn der Boden etwas lockerer gelagert ist, ein plastisches Fließen dann, wenn er feucht ist. In diesen Fällen werden sich Scherflächen erst in einigem Abstand über dem Werkzeug ausbilden, wie es Bild 4 bei lockerem Sand und bei großer Furchentiefe zeigt.

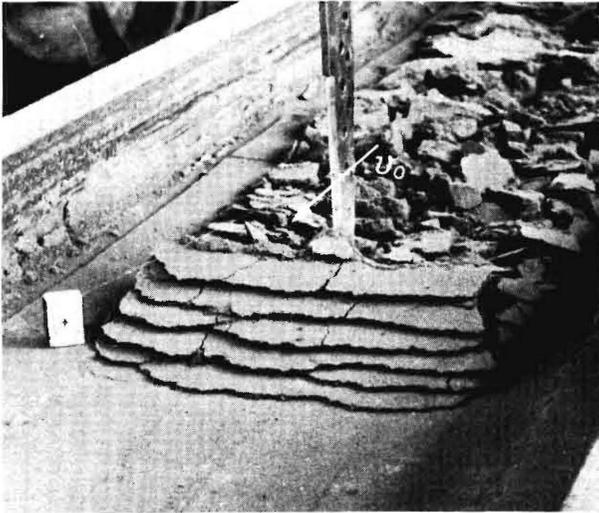


Bild 5. Ausbildung von Scherflächen in einem Sandboden beim Durchschneiden mit einer geneigten Ebene.

Bild 5 gibt eine Aufnahme aus dem Sandkasten wieder, bei der der Boden nach Bild 1 von einer geneigten Ebene abgeschert wird. Dieser Fall ist theoretisch besonders leicht zu erfassen. Bild 6 zeigt die auf den Bodengleitkörper mit dem Gewicht G wirkenden Kräfte. Das Schneidwerkzeug drückt mit der Normalkraft N_0 und mit der Reibkraft $\mu_E N_0$ gegen den Gleitkörper. Die Reibkraft beträgt ungefähr 45% der Normalkraft ($\mu_E = 0,45$). In der Scherfläche F_1 wirkt die Normalkraft N_1 und die Reibkraft Boden auf Boden $\mu_S N_1$, die ungefähr 70% der Normalkraft beträgt ($\mu_S = 0,70$). Ferner ist in der Gleitebene zunächst die Kohäsion $c F_1$ zu überwinden. Wenn sich ein neuer Scherkörper ausbildet und in Bewegung setzt, wirkt eine Beschleunigungskraft B , die dieser Zusatzbewegung entgegen-

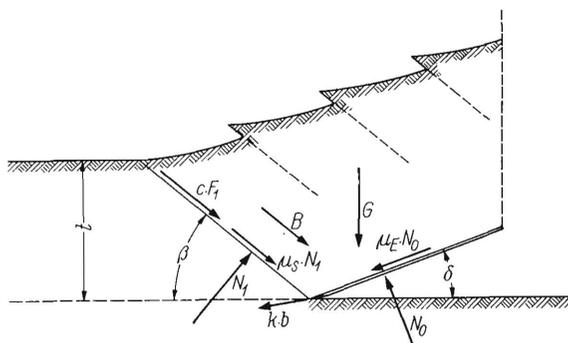


Bild 6. Kräfte auf einen Bodengleitkörper beim Schneiden mit einer geneigten Ebene.

engesetzt ist. Die Größe der Einzelkräfte und der resultierende Schnittwiderstand können nun berechnet werden, wenn die Geschwindigkeit und die Reibungsbeiwerte bekannt sind.

Der Schnittwiderstand W^* errechnet sich aus:

$$W^* \left(\frac{\cos \delta - \mu_E \sin \delta}{\sin \delta + \mu_E \cos \delta} + \frac{\cos \beta - \mu_S \sin \beta}{\sin \beta + \mu_S \cos \beta} \right) = G + \frac{c F_1 + B}{\sin \beta + \mu_S \cos \beta}$$

Das Gewicht der Bodenmenge des Gleitkörpers ist

$$G = \gamma b t \left\{ l_0 \frac{\sin(\delta + \beta)}{\sin \beta} + \frac{t}{t \sin^2 \beta} [\sin^2(\delta + \beta) + 2 \operatorname{tg} \delta \sin^2(\delta + \beta)] \right\}$$

die Größe der Scherfläche im Boden ist

$$F_1 = \frac{b t}{\sin \beta}$$

und die Größe der Beschleunigungskraft

$$B = \frac{\gamma}{g} b t v_0^2 \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)}$$

hierbei bedeuten: γ spez. Gewicht des Bodens

b Furchenbreite

t Furchentiefe

l_0 Werkzeuglänge

v_0 Fahrgeschwindigkeit.

Die Ableitung dieser Gleichungen befindet sich in einem Anhang am Ende dieses Aufsatzes.

Der Nutzen der Gleichung ist nun nicht in erster Linie der, den gesamten Schnittwiderstand dieses Werkzeuges vorauszuberechnen – infolge der Inhomogenität des Bodens und der Schwankungen in der Größe der Kohäsion werden immer erhebliche Differenzen zwischen Rechnung und Messung und eine große Streuung bei der Messung auftreten –, sondern die Möglichkeit, den Schnittwiderstand zu analysieren, indem man die Anteile zum Heben, Beschleunigen und Aufbrechen des Bodens an der gesamten, geleisteten Arbeit berechnet und außerdem die Verlustarbeit durch Reibung zwischen Boden und Werkzeug und durch innere Reibung Boden auf Boden in der Scherebene bestimmt. Diese Reibungsarbeit läßt sich wiederum zergliedern in Anteile als Folge der Fub-, Beschleunigungs- und Lockerungsarbeit. Eine Einzelmessung sämtlicher Anteile ist versuchstechnisch nicht möglich.

In Bild 7 und 8 sind die in dieser Weise errechneten Schnittwiderstände in Abhängigkeit von der Furchentiefe und ihre Aufgliederung in die Einzelanteile als eine Energiebilanz wiedergegeben und zum Vergleich gemessene Gesamtwiderstände eingetragen. Dabei mag zunächst der hohe Anteil der Reibungsverluste am Gesamtwiderstand, der bei 55 bis 60% liegt, überraschen. Bei 10 cm Furchentiefe und 1 m/s Geschwindigkeit ist bei Sand

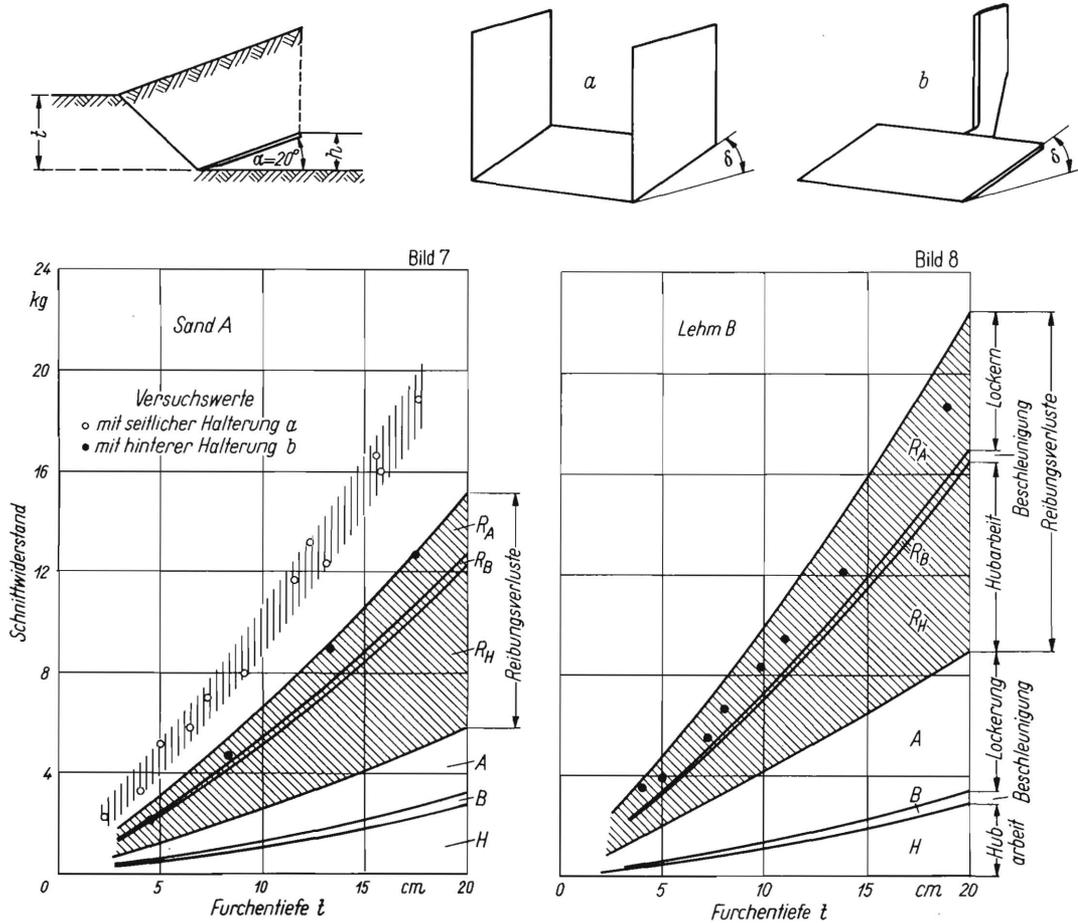


Bild 7 und 8. Gerechneter Schnittwiderstand beim Schneiden mit einer geneigten Ebene im Boden (Sand A und Lehm B) in Abhängigkeit von der Furchentiefe t und den Einflusskomponenten: Heben, Beschleunigen, Aufbrechen, Reibung. Vergleich des Gesamtwiderstandes mit gemessenen Werten bei seitlicher Halterung und Halterung hinter dem Werkzeug.

Schnittwinkel $\delta = 20^\circ$ Hubhöhe $h = 5$ cm Furchenbreite b auf 10 cm bezogen Fahrgeschwindigkeit $v = 1$ m/s

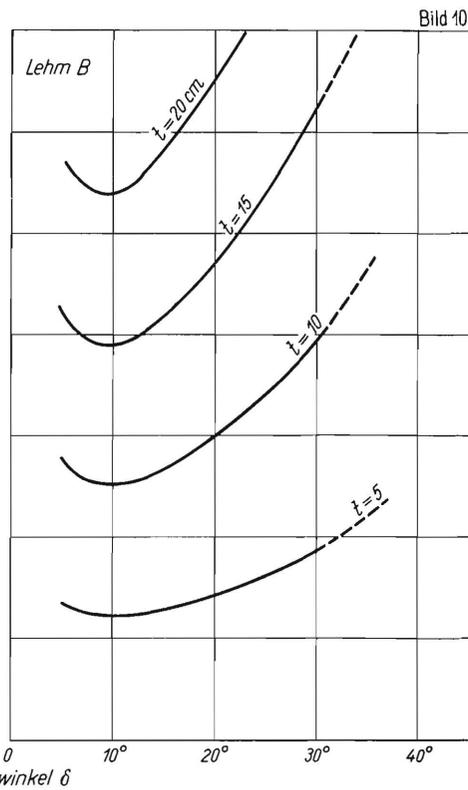
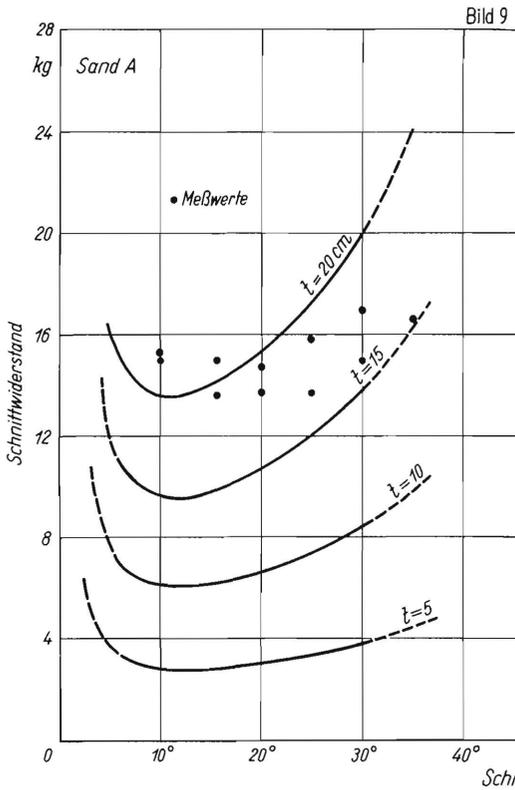
der Anteil zum Heben	15%
„ „ zum Beschleunigen	4%
„ „ zum Aufbrechen	20%
	40%
der Reibungsanteil infolge des Hebens	38%
„ „ „ der Beschleunigung	3%
„ „ „ der Aufbrucharbeit	19%
	100%

Die berechneten Gesamtwiderstände stimmen in der Tendenz gut mit den gemessenen Werten überein. Beim Sand (Bild 7) stimmen auch die absoluten Werte mit den gerechneten gut überein, soweit es sich um Versuche handelt, bei denen sich der Halterungsstiel hinter dem Werkzeug befand. Bei einer seitlichen Halterung entstehen zusätzliche Reibungsverluste, die durch das senkrecht schraffierte Gebiet wiedergegeben sind.

Beim feinsandigen Lehm B (Bild 8) mit einer höheren Kohäsion als dem Sand A sind die gerechneten Widerstände um rund 18% größer als die gemessenen Werte. Dies mag vor allem daran liegen, daß die gerechneten Werte Maxialwerte im Augenblick

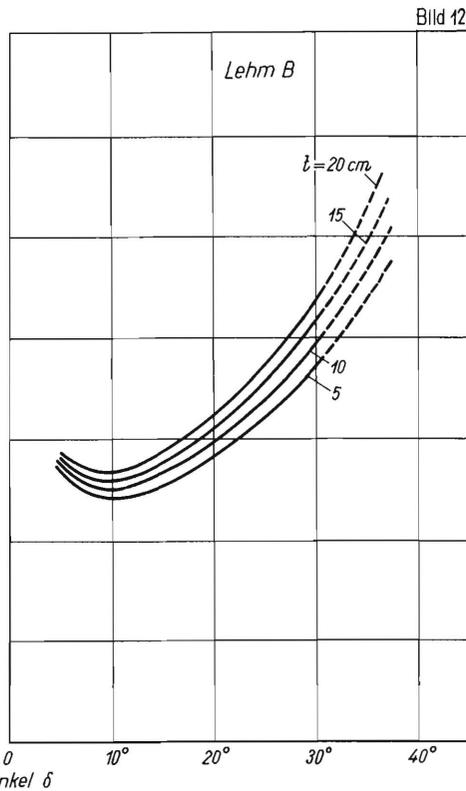
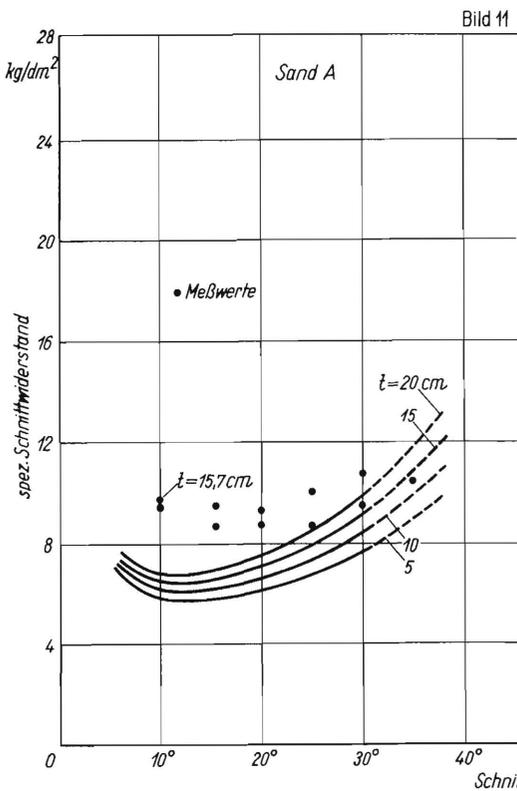
des Abscherens einer Gleitebene sind, während die gemessenen Werte Mittelwerte während eines längeren Schnittes sind.

Bild 9 und 10 zeigt die Schnittwiderstände in Abhängigkeit vom Schnittwinkel δ der geneigten Ebene, aber bei konstanter Hubhöhe h , und **Bild 11 und 12** die entsprechenden, spezifischen Widerstände, bezogen auf einen Furchenquerschnitt von einem dm^2 . Die Werkzeuglänge wird umso größer, je kleiner der Schnittwinkel ist. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung ist nicht besonders gut. Das liegt vor allem daran, daß in diesem Falle die Werkzeuge seitlich gehalten waren, wodurch besonders bei flachen Winkeln erhebliche, zusätzliche Reibungsverluste an den hierbei sehr breiten Halteblechen entstanden. Nach der Rechnung ergeben sich Minima der Schnittwiderstände zwischen 15° und 11° Neigung der geneigten Ebene. Bei den gemessenen Werten liegt das Minimum bei einem etwas größeren Schnittwinkel. Abgesehen von dem aus der Halterungsart entstehenden Fehler mag noch eine Rolle spielen, daß bei kleineren Schnittwinkeln δ der geneigten Ebene sich keine eindeutigen Scherflächen



$h = 5 \text{ cm}$ $v = 1 \text{ m/s}$
 b auf 10 cm bezogen
Messwerte $t = 15,7 \text{ cm}$

Bild 9 und 10. Gerechneter Schnittwiderstand einer geneigten Ebene im Boden in Abhängigkeit vom Schnittwinkel δ und der Furchentiefe t . Vergleich mit gemessenen Werten.



Versuchsdaten
wie bei Bild 9 und 10

Bild 11 und 12. Gerechneter spezifischer Schnittwiderstand einer geneigten Ebene im Boden in Abhängigkeit vom Schnittwinkel δ und der Furchentiefe t . Vergleich mit gemessenen Werten.

mehr ausbilden, sondern sich der Boden nur noch plastisch verformt. Damit trifft aber der Vorgang nach Bild 1 nicht mehr ganz zu, auf dem die Widerstandsformel aufgebaut war.

Bild 13 zeigt den Einfluß der Schnittgeschwindigkeit auf den spezifischen Schnittwiderstand für den Sand A und den Lehm B. Die Beschleunigungskräfte steigen mit dem Quadrat der Geschwindigkeit, und

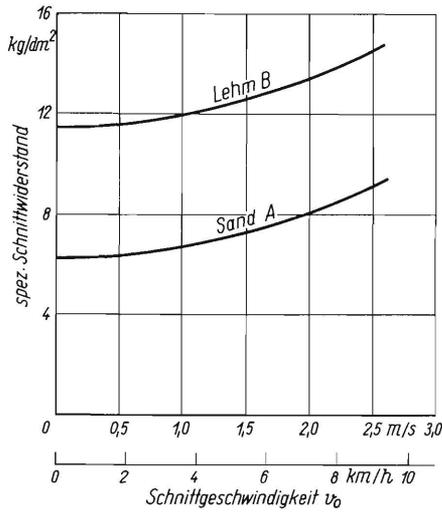


Bild 13. Spezifischer Schnittwiderstand einer geneigten Ebene im Boden in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit.

Versuchsdaten wie bei Bild 9 und 10

so ergibt sich ein parabelförmiges Ansteigen des Schnittwiderstandes über der Schnittgeschwindigkeit. Wenn sich z.B. die Schnittgeschwindigkeit von 1 m/s auf 2 m/s erhöht, muß sich der Anteil der Beschleunigungsarbeit und die von der Beschleunigung hervorgerufenen Reibungsverluste vervierfachen. Der Anteil der Beschleunigungsarbeit als eine eindeutige mechanische Beziehung ist theoretisch verhältnismäßig genau zu erfassen.

Es wurde im vorhergehenden schon auf den überraschend hohen Anteil der Reibungsverluste an der Gesamtarbeit hingewiesen. Es werde nun angenommen, daß es gelänge, den Reibungsbeiwert μ_E zwischen Boden und Werkzeug zu verringern. In **Bild 14** ist dargestellt, in welchem starkem Maße sich die Schnittwiderstände verringern, wenn der Reibungsbeiwert μ_E abnimmt. Die tatsächlich zwischen Boden und Stahl auftretenden Reibungsbeiwerte liegen innerhalb des schraffierten Bereiches. Sie ändern sich etwas mit der Bodenart und mit der Bodenfeuchtigkeit.

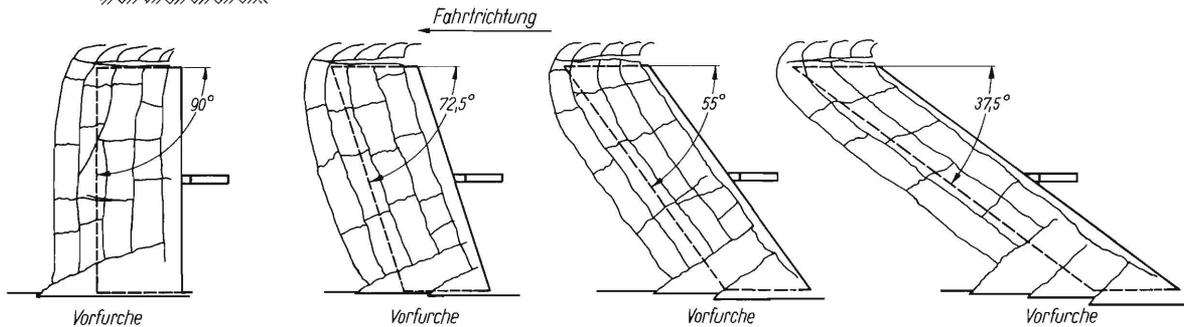
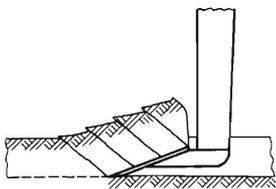


Bild 15. Ausbildung der Scherflächen beim Schneiden mit geneigten Ebenen im Boden entlang einer Furche. Einfluss verschiedener Scharschneidenwinkel.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Schneidvorgang von geneigten Ebenen untersucht, bei denen sich der Scharschneidenwinkel von 90° auf $37,5^\circ$ ändert, **Bild 15**. Dabei waren die Schnittwiderstände innerhalb eines gewissen Streubereiches gleich. Läßt man die Werkzeuge entlang einer Vorfurche schneiden, so bildet sich eine zweite Art von Gleitebene etwa unter 30° bis 45° zur Furche hin, wie es in **Bild 15** dargestellt ist. Dieser Vorgang ist von besonderem Interesse für die Ausbildung der Scherebenen bei Pflugkörpern.

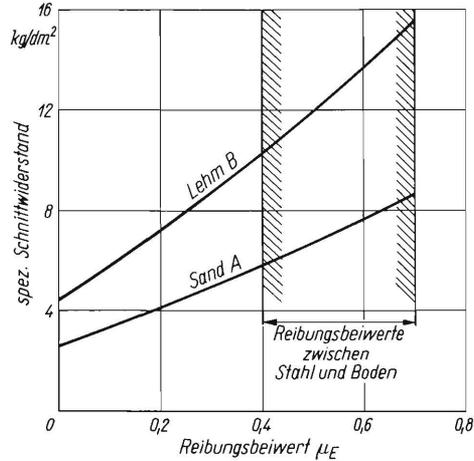


Bild 14. Spezifischer Schnittwiderstand einer geneigten Ebene im Boden in Abhängigkeit vom Reibungsbeiwert.

Versuchsdaten wie bei Bild 9 und 10

Weitere Versuche wurden mit Werkzeugen, bei denen anstelle der geneigten Ebene geneigte, konvex- oder konkavgewölbte Flächen verwendet wurden, sowie mit Stahlsaiten von 1,5 mm ϕ gemacht. Auch bei den Stahlsaiten bildeten sich Scherflächen aus, die bis zur Oberfläche aufbrachen. Erst bei Schnitttiefen über 10 cm drangen diese Scherflächen nicht mehr bis zur Oberfläche durch. Der Widerstand nahm ähnlich wie bei den geneigten Ebenen mit der Schnitttiefe zu und war zwischen 1 und 9 cm Schnitttiefe höher als bei schiefen Ebenen mit einem Schnittwinkel $\delta = 20^\circ$ und einer Hubhöhe von 5 cm.

In **Bild 16** wurde der Versuch unternommen, die Kräfte graphisch zu bestimmen, die beim Schneiden

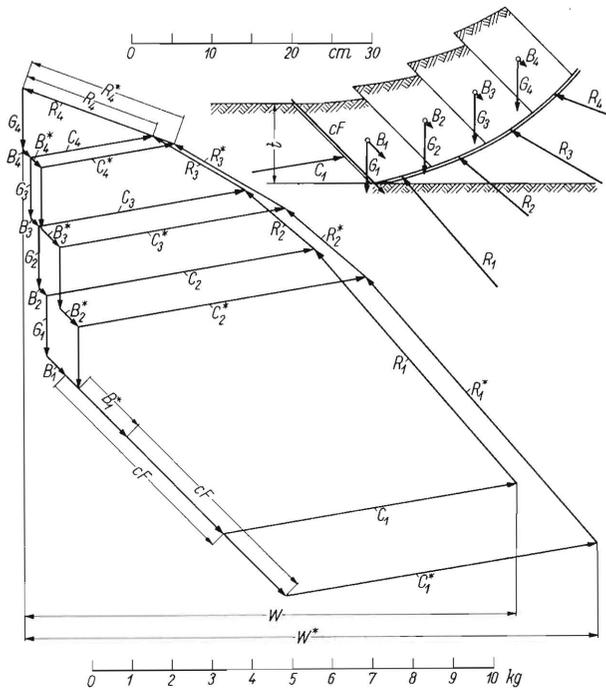


Bild 16. Graphische Bestimmung der Bodenreaktionskräfte beim Schneiden des Bodens mit einer gewölbten Fläche bei zwei verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten.

Beschleunigungskraft B_1^* für $v = 1,5 \text{ m/s}$
 „ „ B_2^* für $v = 2,5 \text{ m/s}$

des Bodens mit einer gewölbten Fläche entstehen. Während bei der geneigten Ebene die Relativbewegung des Bodens in der Scherebene zur Ruhe kommt, sobald sich eine neue Scherebene an der Werkzeugschneide ausgebildet hat, bleibt bei der gewölbten Fläche eine Relativbewegung der Gleitkörper gegeneinander während ihres ganzen Weges auf der gewölbten Fläche erhalten. Sie haben Reibungskräfte in den Scherebenen zur Folge. In Bild 16 sind die Gewichte G der einzelnen Gleitkörper, die Beschleunigungskräfte B , die resultierenden Normal- und Reibungskräfte auf die gewölbte Fläche R und in den Scherebenen C , sowie die Kräfte cF zur Überwindung der Kohäsion eingetragen und in einem Kräftediagramm zusammengefaßt. Die Widerstände W wurden für die Geschwindigkeit $v = 1,5 \text{ m/s}$ und $2,5 \text{ m/s}$ berechnet. Man kann hieraus auch wieder den Einfluß der Geschwindigkeit auf das Anwachsen der Schnittkräfte bestimmen.

Das Aufbrechen und Wenden des Bodens durch das Streichblech

Während man den Vorgang auf einer geneigten Ebene oder auf einer senkrecht zur Fahrtrichtung gewölbten Fläche als zweidimensional ansehen kann, ist er beim Streichblech dreidimensional. Die



Bild 17. Lage der primären Scherebenen beim Pflügen nach Nichols [4].

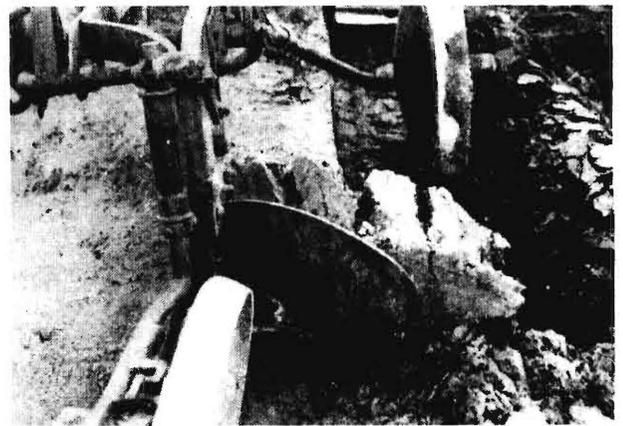


Bild 18. Risse entlang der primären Scherebenen beim Pflügen [4].



Bild 19 und 20. Ausbildung der primären Scherebenen beim Pflügen (Lichtbild: Altemüller).

Untersuchung der Vorgänge auf der geneigten Ebene hatte gezeigt, daß der Boden im wesentlichen durch Schubbeanspruchungen bei Ausbildung von Scherflächen aufgebrochen wird. Ähnlich ist es beim Streichblech. *Nichols* [4] beobachtete in der Bodenrinne, die durch ein Glasfenster seitlich abgeschlossen war, daß sich an der Landseitenkante des Pfluges Gleitebenen bilden, die ähnlich verlaufen, wie wir es auch bei schiefen Ebenen im Sande festgestellt hatten. Bei Feldversuchen stellte er weiterhin fest, daß sich diese Scherebenen von der Scharspitze unter einem Winkel von 45° zur Fahrtrichtung nach vorn zur Furche fortsetzen. **Bild 17 und 18** von *Nichols*, sowie **Bild 19 und 20** von *Altemüller*¹⁾ geben eine Vorstellung von diesen primären Scherebenen. In **Bild 21** ist dieser Vorgang schematisch dargestellt. Wie aus **Bild 17** hervorgeht, behalten die primären Scherebenen ihre relative Lage während des ganzen Weges über das Streichblech bei. Die Scherkörper werden zunächst einmal vom Streichblech in einer solchen Weise angehoben, daß sie auf ihrer früheren Furchenwand in der Furche senkrecht stehen. Im weiteren Verlauf wird der obere Teil der Scholle vorwärts und nach rechts gegen die vorhergehende Furche angelegt.

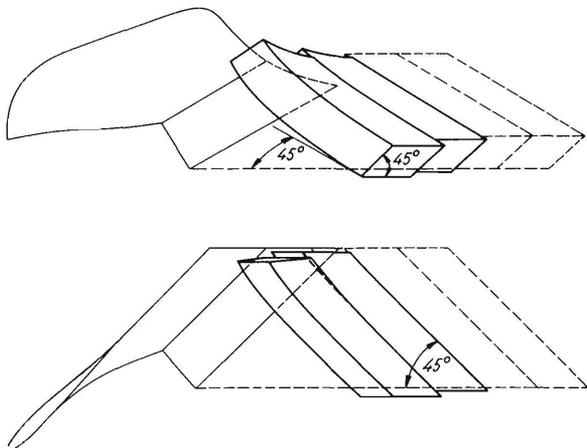


Bild 21. Schematische Darstellung der primären Scherebenen beim Pflügen.

Welche Bodenbewegung durch das Streichblech veranlaßt wird, geht aus Versuchen hervor, die wir schon vor einigen Jahren gemacht haben. Zu diesem Zweck wurden²⁾ in den Bodenbalken vor dem Pflügen Löcher gebohrt, und jedes Loch wieder mit vier Proben verschieden gefärbter Erde angefüllt (**Bild 22**). Nach dem Pflügen wurden die gefärbten Bodenteilchen freigelegt und ihre Lage ausgemessen. In **Bild 23** sind die Ergebnisse noch einmal schematisch dargestellt. Aus ihnen geht hervor, daß der Boden nicht nur zur Seite transportiert wird und dabei eine Drehung von etwas über 135° erfährt, sondern daß er auch in Fahrtrichtung mitgenommen wird,

und zwar so, daß die Bodenteile eines ursprünglich senkrecht zur Fahrtrichtung stehenden Querschnittes des Bodenbalkens nach dem Pflügen in einem Winkel von etwa 45° zur Fahrtrichtung liegen. Dabei vergrößert sich der ursprüngliche Querschnitt des Bodenbalkens um nicht weniger als etwa 80%. Das gepflügte Gesamtbodenvolumen erhöht sich um etwa 30%. Das entspricht einer Erhöhung des Porenvolumens von beispielsweise 41% auf 58%.

Außer den primären Scherebenen bilden sich noch sekundäre Scherebenen aus, die etwa parallel zur Scharschneide verlaufen. Der Vorgang ist also recht kompliziert, wie es ja häufig bei räumlichen Bewegungen der Fall ist. **Bild 24** von *Nichols* zeigt primäre und sekundäre Scherebenen im Bodenbalken, wenn man den Pflugkörper angehalten und dann ein Stück zurückgezogen hatte.

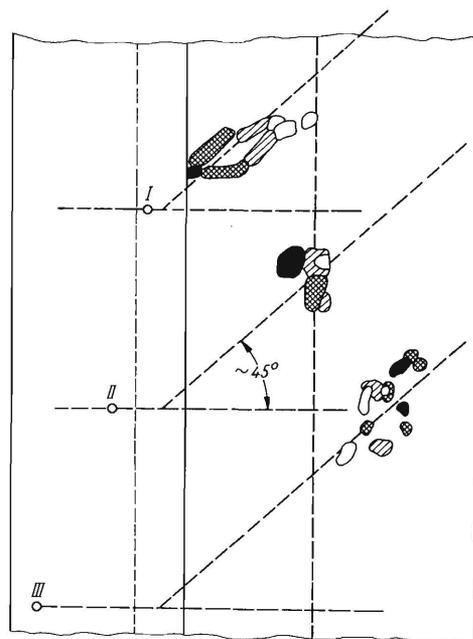
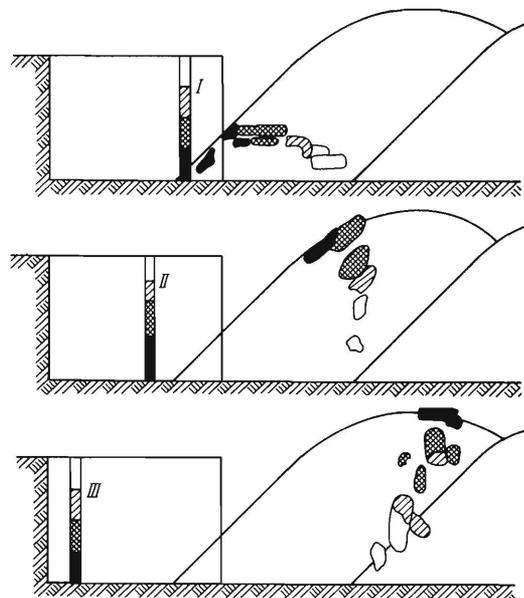


Bild 22. Bodenbewegung beim Pflügen.

1) Institut für Bodenbearbeitung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

2) Auf Anregung von Prof. *Kloth*.

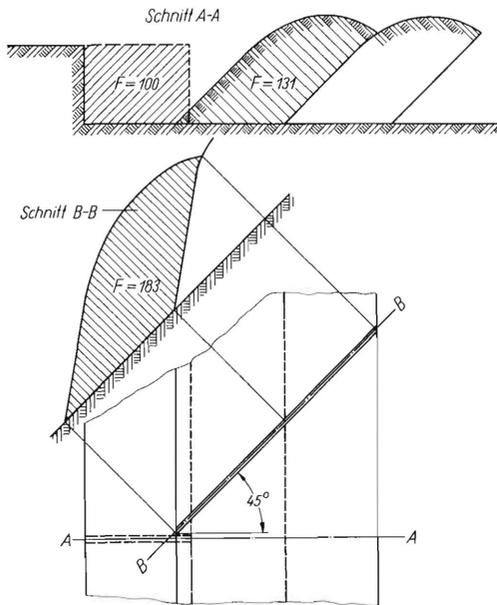


Bild 23. Veränderung des Furchenquerschnittes durch das Pflügen (schematisch).

Man muß nun unterscheiden zwischen dem Vorgang auf dem Streichblech und dem Vorgang beim Ablegen des Bodenbalkens vom Streichblech. Auf dem Streichblech bilden sich die Scherebenen aus, und damit wird der Boden aufgebrochen und zertrümmert. Seine Dichte und sein Volumen behält er aber auf dem Streichblech im wesentlichen noch bei. Die eigentliche Auflockerung, also die Vergrößerung des Porenvolumens, erfolgt erst, wenn der Bodenbalken das Streichblech verläßt. Dieser Vorgang ist schematisch in **Bild 25** dargestellt. Die Vektoren in die-

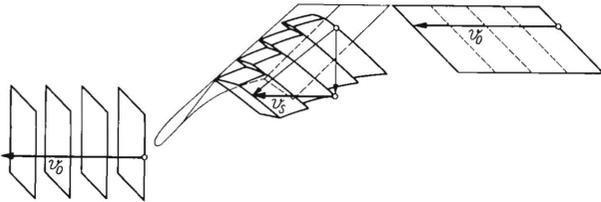


Bild 25. Auseinanderzerren des „Bodenbalkens“ nach dem Verlassen des Streichbleches (schematisch).

sem Bild geben die Geschwindigkeit des Bodens wieder, wie sie sich einem Beschauer darbieten, der mit dem Pflug mitfährt. Man kann sich auch vorstellen, daß das Streichblech feststeht und der Erdboden sich bewegt. Dann haben die Bodenteilchen vor dem Streichblech und hinter dem Streichblech die Geschwindigkeit v_0 . Auf dem Streichblech werden die Bodenteilchen zur Seite hin beschleunigt, so daß sie dort die Geschwindigkeit v haben. Die Geschwindigkeitskomponente in Fahrtrichtung v_s ist auf dem Streichblech erheblich geringer als vor dem Streichblech. Beim Verlassen des Streichbleches muß der Bodenbalken wieder die Geschwindigkeit des Erdbodens v_0 annehmen und wird dabei auseinander gerzert, d.h. der eigentliche Lockerungsvorgang findet beim Ablegen des Bodens vor dem Streichblech



Bild 24. Primäre und sekundäre Scherebenen vor einem (etwas zurückgezogenen) Schar [4].

statt. Durch die kinetische Energie der bewegten Bodenmasse erfolgt beim Abwerfen auch noch eine zusätzliche Zertrümmerung des Bodenbalkens, die umso größer ist, je größer die Geschwindigkeit des Pfluges ist.

Für Sandböden verwendet man im allgemeinen verhältnismäßig breite und steil angestellte Streichbleche. Infolge der geringen Kohäsion der Sandböden muß der Bodenbalken angehoben werden, solange er noch durch den Boden vor dem Pflug gestützt wird. Andernfalls bricht die Furchenwand ein, und das Ergebnis ist eine ungenügende Wendung. Steife, bindige Böden erfordern dagegen wegen ihres großen Scherwiderstandes eine flachere Streichblechform und einen flacheren Schnittwinkel δ . Bei zu steiler Form bilden sich nur die primären Scherebenen aus, und der Boden wird in großen Blöcken zur Seite geworfen. Es bilden sich aber nicht die für die Krümelung auch erforderlichen sekundären Scherebenen.

Einfluß der Geschwindigkeit auf Pflugwiderstand und Körperform

In **Bild 26** sind die Ergebnisse von Zugkraftmessungen an Pflügen verschiedener Autoren in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit wiedergegeben. Der zur Beschleunigung des Bodens erforderliche Arbeitsanteil und die von den Beschleunigungskräften zusätzlich hervorgerufene Reibung steigen mit dem Quadrat der Geschwindigkeit an. Nun ist dieser Beschleunigungsanteil ziemlich unabhängig von den Bodeneigenschaften, also vor allen Dingen von seiner Kohäsion; er hängt von dem Gewicht der zu beschleunigenden Bodenmenge ab. Der Beschleunigungsanteil ist also der Berechnung besonders leicht zugänglich. In das Diagramm sind außerdem die berechneten Widerstände als Folge der Beschleunigung eingetragen; es zeigt sich, daß zumindest die Abhängigkeit der Pflugwiderstände von der Geschwindigkeit rechnerisch leicht erfaßbar ist. In Zukunft ist mit etwas höheren Arbeitsgeschwindigkeiten infolge der erhöhten Fahrgeschwin-

digkeit des Schleppers zu rechnen. Die Streichblechformen müssen dieser Tatsache angepaßt werden. Dabei muß man bestrebt sein, den Anteil der Beschleunigungsarbeit zu verringern, indem man den Winkel zwischen oberer Streichblechkante und Fahrtrichtung und den Schnittwinkel δ verkleinert. Auch bei Sandböden wird man vermutlich von der steilen Form etwas abgehen, da die größeren Trägheitskräfte des Bodens bei schnellerem Pflügen ein Einbrechen der Furchenwand verhindern.

Bei unseren Untersuchungen mit der schiefen Ebene im Boden hatte sich schon gezeigt, wie hoch der Reibungsanteil an der Gesamtarbeit ist. Beim Streichblech ist der Anteil der Reibungsverluste noch etwas höher. Man wird sich also Gedanken machen, wie man die Reibungsverluste verringern kann. Soweit es sich um die Reibung an Sohle und Anlage handelt, müßte es möglich sein, durch ein starr mit dem letzten Körper verbundenes Furchenrad Sohle und Anlage zu ersetzen, wobei die Schwierigkeiten hinsichtlich der Stabilität und Tiefenhaltung lösbar sein werden. Vermutlich wird die Entwicklung sowieso zu Anbau- und Aufsattelpflügen mit automatisch gesteuerter und vom Kraftheber betätigter Tiefenhaltung führen. Was die Reibung zwischen Streichblech und Boden betrifft, so ist augenblicklich noch keine Lösung zu ihrer Verringerung zu erkennen; denn die klassische Einfachheit des Streichbleches darf nicht durch eine komplizierte, störanfällige und kostspielige Konstruktion eines sich mitbewegenden Bandes ersetzt werden. Ob es gelingt, Kunststoffauflagen für das Streichblech zu entwickeln, die wie *Teflon* und *Fluon*³⁾ einen ungewöhnlich niedrigen Reibungsbeiwert haben, daneben aber auch genügend verschleißfest sind, um den Beanspruchungen auf dem Streichblech gewachsen zu sein, läßt sich noch nicht voraussagen.

Ackerböden mit extremen Bearbeitungseigenschaften

Der Erfolg einer Pflugarbeit hängt, abgesehen von der Bodenart, vor allem von dem Feuchtigkeitsgehalt des Bodens während des Pflügens ab. Um keine falschen Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen in der Bodenrinne gegenüber den Ackerböden zu ziehen, muß man auch Ackerböden mit extremen Bearbeitungseigenschaften untersuchen. Sie sollen im Folgenden nach *Nichols* und *Reed* [4] klassifiziert werden.

Danach sind normale Ackerbodenbedingungen gegeben, wenn der Boden sich abgesetzt und damit sich eine natürliche innere Festigkeit eingestellt hat und wenn er außerdem einen für die Bodenbearbeitung optimalen Wassergehalt besitzt. Stoppeln, Unkraut und ein mäßiger Betrag an Steinen oder Kies soll in die normalen Bedingungen eingeschlossen sein.

3) *Fluon* = Polytetrafluoraethylen, hergestellt von *Imperial Chemical Industries Ltd.* (England).

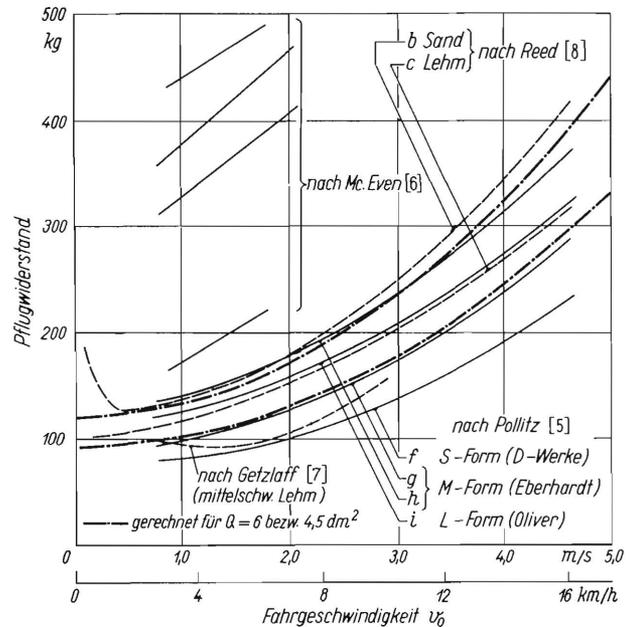


Bild 26. Einfluss der Arbeitsgeschwindigkeit auf den Pflugwiderstand.

Von diesen normalen Bedingungen können die Böden in folgender Weise abweichen:

1. Wenn ursprünglich nasse, bindige oder tonige Böden ungeschützt der Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, kann sich eine harte, betonartige Oberfläche bilden, die bei der Pflugarbeit in unregelmäßige, große, harte Blöcke aufbricht. In diesem Falle gibt es keine allgemein gültige Form der Bodenzerkleinerung bei der Bearbeitung, da die Lage der Brüche und der Grad der Zerkrümelung von der wechselnden Härte dieser Oberflächenschicht abhängt und der Boden in den zufälligen Zonen geringerer Kohäsion aufbricht.
2. Bei einem Rasenboden werden die eigentlichen Bodeneigenschaften durch den Einfluß der Wurzeln überdeckt. Wiesenboden wird also nicht so abgeschert und aufgebrochen wie Ackerboden, da die Wurzeln die Schollen zusammenhalten. Weil aber ein gut durchwurzelter Boden im allgemeinen in einem guten Garezustand ist, kann sich bei der Bodenbearbeitung trotzdem ein guter Krümelungszustand des gepflügten Bodens ergeben.
3. Bei manchen Böden, besonders Lößböden, bildet sich durch den Einfluß des Regens und das folgende Austrocknen eine verkrustete Oberfläche, während der Boden unmittelbar darunter verhältnismäßig locker ist. Auch in diesem Falle bricht die Oberfläche nicht regelmäßig auf, da in der Oberflächenschicht eine größere Bodenkohäsion vorhanden ist.
4. Frisch gepflügte Böden geben im allgemeinen keine gute Pflugfurchen. Der Boden muß sich erst abgesetzt, eine gewisse Festigkeit und einen Widerstand gegen Druck erlangt haben, bevor der Pflug wieder einwandfrei arbeiten kann.

5. "Schiebeböden" verhalten sich ähnlich wie lockere, frisch gepflügte Böden. Diese Böden haben eine zu geringe Kohäsion und halten daher keine Druckbeanspruchung aus. Sie fließen nicht gleichmäßig über das Streichblech ab, sondern die Furchenwand wird eingedrückt, infolgedessen wird der Boden zur Seite geschoben, ehe eine regelrechte Wendung erfolgt. Dies gilt besonders bei geringer Pfluggeschwindigkeit.

Druckverteilung und Bodenverformung unter Belastungen

Neben den Problemen der Bodenbearbeitung war einleitend die Ermittlung der Druckverteilung und Bodenverformung unter Belastungen, z.B. unter Schlepper- und Landmaschinenreifen, als eine Aufgabe der landtechnischen Bodenmechanik genannt worden.

Die Druckverteilung oder besser, das Spannungsfeld im Boden unter Lasten, z.B. unter Schlepperreifen, kann durch Messung und Rechnung bestimmt werden. Beide Methoden sind mit Fehlern behaftet. Die Messung deswegen, weil die Einbringung der hydraulischen oder elektrischen Meßdosen mit einer Störung der Bodenstruktur verbunden ist und weil die Meßdose entweder weicher oder härter als der umgebende Boden ist, wodurch eine weitere Fälschung der Meßwerte hervorgerufen wird. Die Rechnung deswegen, weil man auf gewisse Annahmen angewiesen ist. Trotz dieser Einschränkung in der Ge-

nauigkeit kann man mit beiden Methoden ein einigermaßen hinreichendes Bild des Spannungsfeldes im Boden gewinnen. In früheren Arbeiten [11, 12] wurde bereits über Druckspannungsmessung und Berechnung des Spannungsfeldes berichtet.

Die Bodenverformung unter Belastung hängt von der Bodenart ab, die im wesentlichen durch die Textur des Bodens, also seine Korngrößenverteilung, gekennzeichnet ist, und dem Bodenzustand, der sich aus dem Porenanteil, dem Wassergehalt und der Lagerungsart ergibt. Die Lagerungsart gibt an, ob sich der Boden z.B. in einer krümeligen oder plattigen Struktur befindet. Wenn man von dem bereits im ersten Teil behandelten Abscheren des Bodens als Folge von Schubspannungen nach der Überwindung der Kohäsion und der inneren Reibung absieht, muß man zwischen folgenden Verformungsarten des Bodens als Folge äußerer Kräfte unterscheiden:

- der elastischen Bodenverformung,
- der Verdichtung des Ackerbodens, d.h. einer Verringerung des Porenvolumens,
- der Bodenverformung durch plastisches Fließen,
- der viskosen Verformung bei nassen, tonigen Böden im breiigen Zustand.

Die Unterscheidung wird dadurch erschwert, daß die ersten drei Verformungsarten meist gleichzeitig auftreten und sich überlagern.

a) Die elastische Bodenverformung

Eine rein elastische Verformung, bei der der Boden nach der Entlastung wieder in seine Ausgangslage zurückkehrt, ist nur bei dicht gelagertem, hartem und trockenem Boden zu beobachten. Bei normalem Ackerboden findet man eine rein elastische Bodenverformung – ohne bleibende Verdichtung – nur bei verhältnismäßig kleinen Lasten und Drücken, die umso größer sein können, je trockener und dichter der Boden ist. Die Elastizität des Bodens hängt auch vom Gehalt an organischen Stoffen ab und ist bei garem, humosem Boden größer als bei "totem" Boden.

Belastet man einen feinsandigen Lehmboden, der locker in einen Zylinder eingefüllt und dann mit $12,6 \text{ kg/cm}^2$ auf $40,5\%$ Porenanteil vorverdichtet wurde, nacheinander zehnmal mit $6,3 \text{ kg/cm}^2$, so ergibt sich eine Abhängigkeit der Verformung von der Belastung nach Bild 27. Dabei tritt bei der ersten Belastung neben der elastischen noch eine beträchtliche, bleibende Verformung, also eine Verdichtung, auf, und erst bei der zehnten Belastung zeigt sich im wesentlichen nur noch eine elastische Verformung. Die Verformung steigt nicht proportional der Last wie beim Hooke'schen Gesetz an. Dies können wir auch bei einem Druckversuch an Stahlkugeln, die in einem Zylinder dicht gelagert sind, oder bei der Belastung einer einzelnen Stahlkugel feststellen. Daß der Boden nicht dem Hooke'schen Gesetz

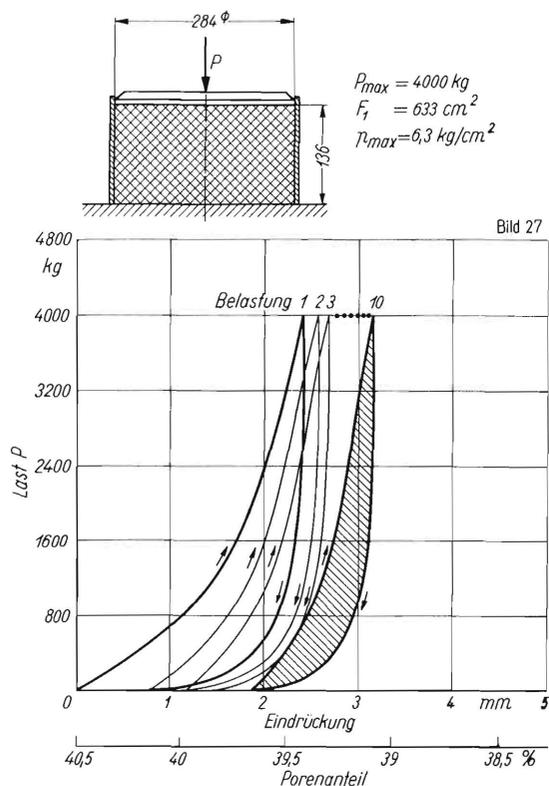


Bild 27. Vorwiegend elastische Bodenverformung eines vorverdichteten Lehmbodens bei wiederholter Belastung in einem Zylinder.

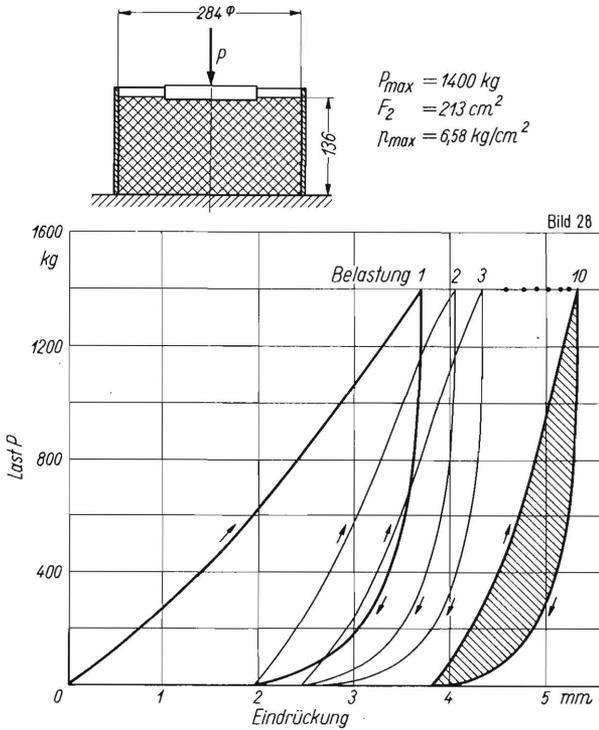


Bild 28. Vorwiegend elastische Bodenverformung eines vorverdichteten Lehm Bodens bei wiederholter Belastung.

Bei den ersten Belastungen findet neben der Verdichtung unter dem Stempel noch ein plastisches Fließen statt.

folgt, ist also keine Eigenschaft der Bodensubstanz, sondern durch die Art der Lagerung in Einzelkörper und -krümel bedingt.

Zwischen der Belastungs- und Entlastungskurve besteht eine beträchtliche Hysterese, d.h., auch wenn der Boden in seine Ausgangslage zurückkehrt, wird durch innere Reibung und Reibung an der Zylinderwand Arbeit verbraucht.

Wenn der Belastungsstempel nur etwa ein Drittel des Zylinderquerschnitts ausfüllt, so verformt sich der Boden so, wie es in **Bild 28** dargestellt ist. Bei ungefähr gleichem Druck ist hier die Verformung

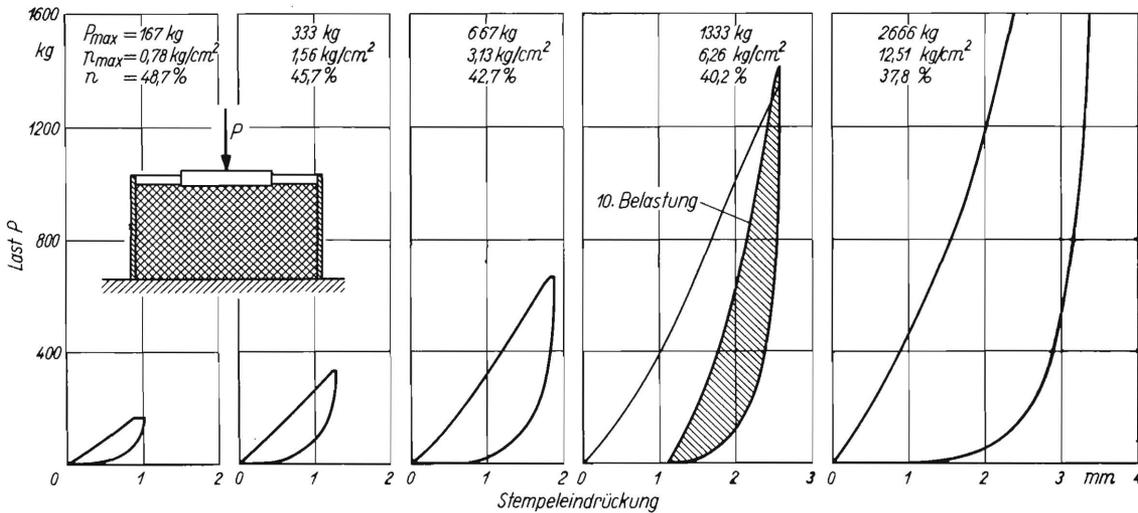


Bild 29. Vorwiegend elastische Bodenverformung bei Belastung in Abhängigkeit von der aufgebrauchten Last.

größer als beim vorigen Versuch; denn der Boden kann jetzt unter dem Stempel zur Seite ausweichen. Bei den ersten Belastungen wird der Boden unter dem Stempel nicht nur elastisch verformt und verdichtet, sondern er fließt auch plastisch.

Obwohl hier kaum eine Reibung an der Zylinderwand auftritt, ist die Hysteresisschleife breiter als in **Bild 27**. Die inneren Reibungsverluste sind hier also größer als bei der Belastung des vollen Zylinderquerschnitts.

In **Bild 29** ist die Verformung unter dem kleinen Stempel bei verschiedenen Lasten und unterschiedlicher Vorverdichtung dargestellt. Der Druck war bei der Vorverdichtung immer doppelt so hoch wie bei der Versuchsbelastung. Dabei stellt man fest, daß die Kurven der elastischen Verformung – abgesehen von dem Unterschied durch die zunehmende Belastung – sich ziemlich ähnlich sind. In die vierte Kurve ist der Verlauf, der sich bei zehnmal wiederholter Belastung ergeben würde, eingezeichnet, um den rein elastischen Anteil abzugrenzen.

b) Die Bodenverdichtung

Über die Gesetze der Bodenverdichtung wurde in früheren Veröffentlichungen ausführlich berichtet [10, 11]. Daher soll hier nur folgendes wiederholt werden:

1. Mit zunehmender Dichte, also kleiner werdendem Porenanteil, steigt der zur Verdichtung erforderliche Druck stark an. Der Porenanteil nimmt etwa proportional dem Logarithmus des aufgebrauchten Druckes ab, d.h. bei Verdoppelung des Druckes, z.B. von 1 auf 2 kg/cm² oder von 10 kg/cm² auf 20 kg/cm², verringert sich der Porenanteil um denselben Betrag.
2. Mit steigendem Wassergehalt sinken die zur Verdichtung erforderlichen Drücke stark ab.
3. Längere Zeit abgesetzter Boden verhält sich ähnlich wie ein künstlich auf den gleichen Porenanteil verdichteter Boden. Bei höher werden-

dem Druck gehen die Verdichtungskurven eines lockeren und die eines abgesetzten Bodens ineinander über.

Bei kurzzeitiger Belastung läßt sich ein nasser Boden nur so weit verdichten, bis das Wasser den gesamten, noch verbleibenden Porenraum ausfüllt; dagegen wird das Wasser bei langanhaltender Belastung herausgepreßt. Die Verdichtungskurven der Böden verschiedener Feuchtigkeit laufen dabei alle in eine Grenzkurve eines ursprünglich sehr nassen Bodens ein, bei dem das Wasser das gesamte Porenvolumen ausfüllt (Bild 30).

c) Das plastische Fließen des Bodens

Das plastische Fließen, eine weitere Verformungsart des Bodens, läßt sich leider nicht so einfach experimentell nachweisen und gesetzmäßig erfassen wie die elastische Verformung und die Verdichtung, da diese sich dem plastischen Fließen überlagern.

Zuerst werde daher ein idealisierter Boden betrachtet. Der gesamte Porenraum eines Tonbodens mit einem Porenanteil von 40% sei mit Wasser gefüllt; das entspricht einem Wassergehalt von etwa 25 Gew.%. Der Boden sei völlig unelastisch. Belastet man ihn durch einen Stempel kurzzeitig mit zunehmender Kraft, so zeigt er zunächst eine gewisse Fließfestigkeit, d.h. er beginnt erst dann dem Stempel auszuweichen, also zu fließen, sobald diese Fließfestigkeit überschritten ist.

Die Fließfestigkeit eines Bodens hängt ganz entscheidend von dessen Feuchtigkeitsgehalt ab. Sie ist nach Versuchen, über die bereits berichtet wurde [11], für einen Lehm mit 10% Feuchtigkeitsgehalt etwa hundertmal höher als für einen mit 26% bis 28% Feuchtigkeitsgehalt.

Bei einem Boden mit normaler Ackerfeuchtigkeit – das ist der Feuchtigkeitsbereich, in dem sich der Boden noch gut pflügen läßt – ist das plastische Fließen noch verhältnismäßig gering. Es spielt aber schon eine Rolle im Bereich größter Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens und ist von entschei-

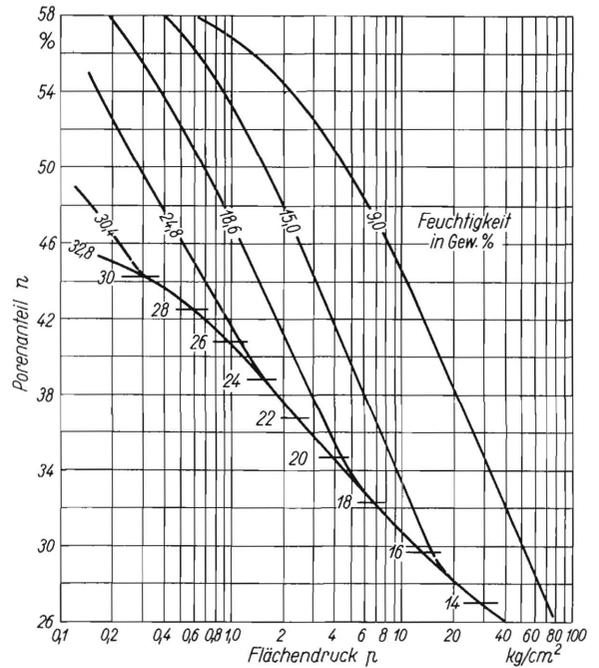


Bild 30. Zusammendrückbarkeit von Ton F mit Muschelkalk in Abhängigkeit vom Flächendruck bei langandauernder Belastung mit Herauspressen des überschüssigen Wassers.

dender Bedeutung bei sehr nassem Boden. Dieser läßt sich kurzzeitig nicht mehr verdichten, weil alle Poren mit Wasser gefüllt sind, fließt aber sehr leicht plastisch. Die Fließfestigkeit ist auch noch von der Belastungsdauer bzw. Verformungsgeschwindigkeit abhängig.

d) Die viskose Bodenverformung

Der Vollständigkeit halber wird noch eine weitere Verformungsart, die viskose Verformung, erwähnt. Sie ist für die Landtechnik ziemlich uninteressant und wird deshalb nur kurz gestreift.

Ein sehr nasser Tonboden in breiigem Zustand, der keine Fließfestigkeit mehr besitzt und dessen Poren keine Luft mehr enthalten, werde durch einen Stempel belastet. Der Widerstand, den der Boden der Verformung durch Schubspannungen dem ein-

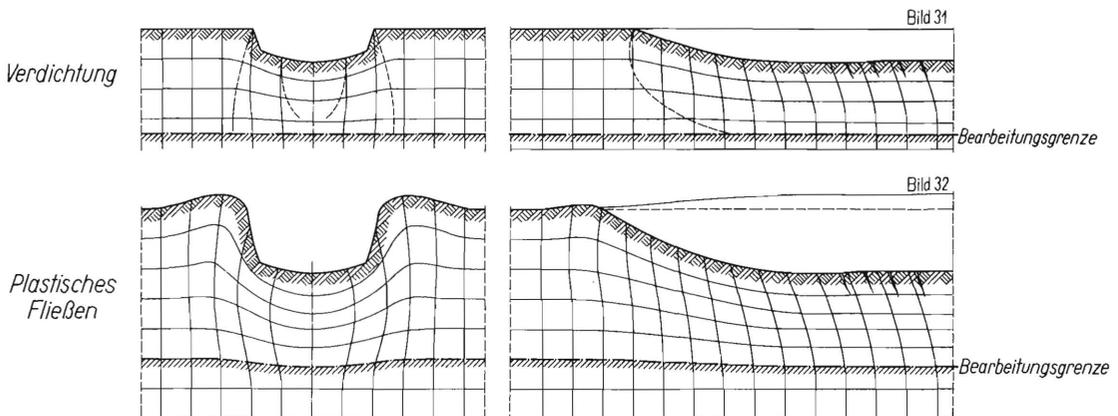


Bild 31 und 32. Verdichtung und plastisches Fließen des Bodens unter einem gezogenen Reifen.

Bild 31. vorwiegend Verdichtung. Bild 32. vorwiegend plastisches Fließen des Bodens.

dringenden Stempel entgegengesetzt, ist dann nur noch von der Verformungsgeschwindigkeit abhängig.

Zusammengesetzte Verformung unter einem Reifen

In Bild 31 und 32 wird die Bodendeformation unter einem gezogenen Reifen dargestellt, die durch das gleichzeitige Wirken der elastischen Verformung, der Verdichtung und des plastischen Fließens auftritt. Beim Boden in Bild 31 ist die Verdichtung vorherrschend; es handelt sich also um einen verhältnismäßig lockeren Boden mit normalem, nicht zu hohem Feuchtigkeitsgehalt. Der Boden fließt nur geringfügig, zeigt jedoch eine beträchtliche Verdichtung, wie sich aus der Verringerung der Höhe des vorher quadratischen Netzquerschnitts ergibt. Dagegen steht bei dem Boden in Bild 32 das plastische Fließen im Vordergrund. Hier liegt ein ziemlich dicht gelagerter, aber nasser Boden vor, dessen Porenvolumen fast restlos mit Wasser ausgefüllt ist; daher ist eine Verkleinerung des Volumens kaum noch möglich. Der Boden weicht nach oben und zur Seite hin aus. Nach dem Überrollen geht die gesamte Verformung wieder geringfügig elastisch zurück.

Eine zu große Bodenverdichtung kann das Pflanzenwachstum in zweifacher Weise beeinträchtigen. Erstens wird die Luft- und Wasserdurchlässigkeit und damit vor allem der Gasaustausch erheblich vermindert, da das Luftporenvolumen bis auf Null abnehmen kann. Zweitens setzt ein zu dichter Boden, zumal wenn er ausgetrocknet ist, dem Wurzelwachstum oder den Samentrieben einen sehr großen, mechanischen Widerstand entgegen. Ein plastisches Fließen bei sehr nassem Boden führt dagegen zu Wurzelzerreißen, Krümelstörungen und tiefen Acker Spuren, welche die später folgenden Arbeiten sehr erschweren.

Zusammenfassung

Die "Landtechnische Bodenmechanik" hat die Aufgabe, die Kenntnisse der mechanischen Gesetzmäßigkeiten des Ackerbodens – hauptsächlich im Hinblick auf dessen Wechselwirkung mit Schlepper und Landmaschine – durch Experimente und Messungen in der Bodenrinne und auf dem Acker sowie durch theoretische Überlegungen zu erweitern. Dazu gehört die Erforschung der mechanischen Einzelvorgänge bei der Bodenbearbeitung, besonders beim Pflügen. Hierbei ist das Abscheren des Bodens in Gleitflächen der primäre Vorgang. Das geht vor allem aus den Untersuchungen mit einfachen Schneidwerkzeugen in der Bodenrinne hervor. Der Schneidvorgang einer geneigten Ebene im Boden läßt sich rechnerisch erfassen. Dadurch ist es möglich, die insgesamt aufgewendete Arbeit in Teilarbeiten zu zerlegen. Diese sind die Hub-, Beschleunigungs- und Aufbrecharbeit, die von ihnen hervorgerufene Reibung zwischen Boden und Werkzeug und die innere Reibung des Bodens. Der Beschleunigungsan-

teil ist bei der Pflugarbeit verhältnismäßig einfach zu berechnen. Der Einfluß des Schnittwinkels der schiefen Ebene und des Reibungsbeiwertes Boden auf Stahl wurde näher untersucht; die gerechneten und gemessenen Ergebnisse wurden miteinander verglichen.

Außerdem wurde das Aufbrechen und Wenden des Bodens durch das Streichblech auf Grund der Beobachtung von *Nichols* und eigener Untersuchungen beschrieben, und der Einfluß der Geschwindigkeit auf Pflugwiderstand und Körperform erörtert.

Ferner wurde die Druckverteilung im Boden und die Bodenverformung unter Belastungen – unter Hinweis auf frühere Arbeiten – untersucht. Die Gesetzmäßigkeiten bei der elastischen Bodenverformung, der Bodenverdichtung, dem plastischen Fließen und der viskosen Verformung wurden dargestellt.

Berechnung des Schnittwiderstandes einer schiefen Ebene im Boden

Wenn der Boden über einer schiefen Ebene als Schneidwerkzeug in der in Bild 6 dargestellten Weise abgesichert wird, so ergeben die Gleichgewichtsbedingungen für den Bodenkörper folgende Kräfte in vertikaler Richtung

$$G - N_0 (\cos \delta - \mu_E \sin \delta) - N_1 (\cos \beta - \mu_S \sin \beta) + (c F_1 + B) \sin \beta = 0 \quad (1)$$

und in horizontaler Richtung

$$N_0 (\sin \delta + \mu_E \cos \delta) - N_1 (\sin \beta + \mu_S \cos \beta) - (c F_1 + B) \cos \beta = 0 \quad (2)$$

Der horizontale Schnittwiderstand der schiefen Ebene ist

$$W = N_0 (\sin \delta + \mu_E \cos \delta) + k b \quad (3)$$

Der Anteil $k b$ am Schnittwiderstand ist der reine Trennwiderstand des Bodens an der Scharschneide. Er spielt nur bei stark durchwurzeltem und steinigem Boden sowie bei stumpfen Schneiden eine Rolle und wird am einfachsten durch einen prozentualen Zuschlag zum übrigen Schnittwiderstand erfaßt, der durch Versuche zu ermitteln ist. Im folgenden wurde mit dem Widerstand der schiefen Ebene $W^* = W - k b$, d.h. ohne diesen Trennwiderstand gerechnet.

Die Normalkraft N_0 auf die schiefe Ebene ergibt sich aus (3) zu

$$N_0 = \frac{W^*}{\sin \delta + \mu_E \cos \delta} \quad (4)$$

Die Normalkraft N_1 auf die Scherebene errechnet sich aus (2) mit (3)

$$W^* - N_1 (\sin \beta + \mu_S \cos \beta) - (c F_1 + B) \cos \beta = 0$$

$$N_1 = \frac{W^* - (c F_1 + B) \cos \beta}{\sin \beta + \mu_S \cos \beta} \quad (5)$$

Setzt man die Ausdrücke (4) und (5) in (1) ein, so ergibt sich

$$G - W^* \frac{\cos \delta - \mu_E \sin \delta}{\sin \delta + \mu_E \cos \delta} - [W^* - (c F_1 - B) \cos \beta] \frac{\cos \beta - \mu_S \sin \beta}{\sin \beta + \mu_S \cos \beta} + (c F_1 + B) \sin \beta = 0 \quad (6)$$

dies wird entwickelt zu

$$W^* \underbrace{\left(\frac{\cos \delta - \mu_E \sin \delta}{\sin \delta + \mu_E \cos \delta} + \frac{\cos \beta - \mu_S \sin \beta}{\sin \beta + \mu_S \cos \beta} \right)}_{\zeta} = G + \frac{c F_1 + B}{\sin \beta + \mu_S \cos \beta} \quad (7)$$

damit ist

$$W^* = \frac{G}{\zeta} + \frac{c F_1 + B}{\zeta (\sin \beta + \mu_S \cos \beta)} \quad (8)$$

umgeformt lautet ζ (9)

$$\zeta = \frac{(1 - \mu_E \mu_S) \sin(\delta + \beta) + (\mu_E + \mu_S) \cos(\delta + \beta)}{(\sin \delta + \mu_E \cos \delta) (\sin \beta + \mu_S \cos \beta)}$$

Das Gewicht G der Bodenmenge des Gleitkörpers über der schiefen Ebene kann angenähert aus dem in Bild 33 gestrichelten Körper errechnet werden. Danach ergibt sich mit einem Raumgewicht γ und einer Werkzeugbreite b

$$G = \gamma b t^* (l_0 + \frac{l_1 + l_2}{2})$$

Mit

$$t^* = t \frac{\sin(\delta + \beta)}{\sin \beta} \quad l_1 = t \frac{\cos(\delta + \beta)}{\sin \beta}$$

$$l_2 = t^* \operatorname{tg} \delta = t \frac{\sin(\delta + \beta) \operatorname{tg} \delta}{\sin \beta}$$

erhält man

$$G = \gamma b t \frac{\sin(\delta + \beta)}{\sin \beta} \left[l_0 + t \frac{\cos(\delta + \beta) + \sin(\delta + \beta) \operatorname{tg} \delta}{2 \sin \beta} \right] \quad (10)$$

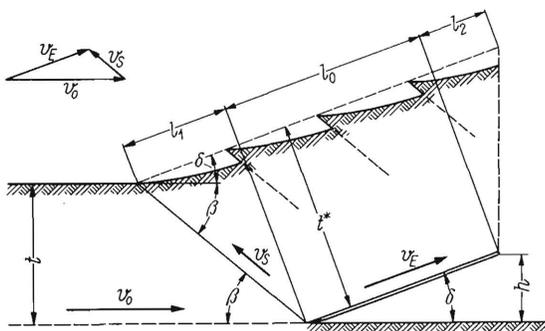


Bild 33. Grösse des Gleitkörpers beim Durchschneiden des Bodens mit einer geneigten Ebene.

$$G = \gamma b t \left[l_0 \frac{\sin(\delta + \beta)}{\sin \beta} + t \frac{\sin 2(\delta + \beta) + 2 \sin^2(\delta + \beta) \operatorname{tg} \delta}{4 \sin^2 \beta} \right] \quad (11)$$

Die Fläche der schiefen Ebene ist

$$F_0 = b l_0 = \frac{b h}{\sin \delta} \quad (12)$$

Die Scherfläche im Boden ist

$$F_1 = \frac{b t}{\sin \beta} \quad (13)$$

Die Kohäsion c hängt von der Bodenart, seiner Lagerungsdichte und Feuchtigkeit ab und kann durch Scherversuche ermittelt werden.

Die Beschleunigungskraft B errechnet sich aus dem Produkt der in der Zeiteinheit von der schiefen Ebene erfaßten Bodenmasse mal der erteilten Beschleunigung. Dabei ändert sich die Summe der Beschleunigungsarbeit nicht wesentlich, wenn man den periodischen Vorgang als einen kontinuierlichen betrachtet. Man erhält dann eine mittlere konstante Beschleunigungskraft

$$B = m \frac{dv}{d\tau}$$

Die in der Zeit τ zu beschleunigende Bodenmasse ist

$$m = \frac{\gamma}{g} b t v_0 \tau$$

Dieser Bodenmasse wird die Geschwindigkeit v_S erteilt. Die Beschleunigung ist

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{v_S}{\tau}$$

also

$$B = \frac{\gamma}{g} b t v_0 v_S$$

Nach Bild 33 ist $v_0 = v_E \cos \delta + v_S \cos \beta$

$$v_E \sin \delta = v_S \sin \beta$$

daraus wird abgeleitet

$$v_S = v_0 \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)} \quad (14)$$

Damit wird

$$B = \frac{\gamma}{g} b t v_0^2 \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)} \quad (15)$$

Analyse des Schnittwiderstandes

Der Schnittwiderstand nach (7) und (8) läßt sich nun aufgliedern in

1. einen Anteil für die reine Hubarbeit W_H und die von der Hubarbeit hervorgerufene Reibung auf der schiefen Ebene und die innere Reibung im Boden in der Scherfläche W_{RH}
2. einen Anteil zur Überwindung der Kohäsion W_C und der durch die Kohäsion hervorgerufenen Reibung W_{RC}

3. einen Anteil zur Beschleunigung W_B und der von den Beschleunigungskräften hervorgerufenen Reibung W_{RB} .

Der Widerstandsanteil der reinen Hubarbeit ist

$$W_H = \frac{G}{\frac{\cos \delta}{\sin \delta} + \frac{\cos \beta}{\sin \beta}} = \frac{G}{\operatorname{ctg} \delta + \operatorname{ctg} \beta} \quad (16)$$

Der Widerstandsanteil für die Hubarbeit und die von der Hubarbeit hervorgerufene Reibung ist

$$W_H + W_{RH} = \frac{G}{\frac{\cos \delta - \mu_E \sin \delta}{\sin \delta + \mu_E \cos \delta} + \frac{\cos \beta - \mu_S \sin \beta}{\sin \beta + \mu_S \cos \beta}}$$

$$W_H + W_{RH} = \frac{G}{\zeta} \quad (17)$$

Damit wird der Reibungsanteil infolge der Hubarbeit

$$W_{RH} = G \left(\frac{1}{\zeta} - \frac{1}{\operatorname{ctg} \delta + \operatorname{ctg} \beta} \right) \quad (18)$$

Der Widerstandsanteil zur Überwindung der Kohäsion ist

$$W_C = \frac{c F_1}{\sin \beta \left(\frac{\cos \delta}{\sin \delta} + \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \right)} = c F_1 \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)} \quad (19)$$

Der Anteil zur Überwindung der Kohäsion und der von der Kohäsion hervorgerufenen Reibung ist

$$W_C + W_{RC} = \frac{c F_1}{(\sin \beta + \mu_S \cos \beta) \zeta} \quad (20)$$

dann ist

$$W_{RC} = c F_1 \left[\frac{1}{(\sin \beta + \mu_S \cos \beta) \zeta} - \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)} \right] \quad (21)$$

Entsprechend wird der Anteil der Beschleunigung

$$W_B = B \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)} \quad (22)$$

und der von der Beschleunigung hervorgerufenen Reibung

$$W_{RB} = B \left[\frac{1}{(\sin \beta + \mu_S \cos \beta) \zeta} - \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)} \right] \quad (23)$$

Schrifttum

- [1] *Perels, Emil*: Handb. d. landwirtschaftlichen Maschinenwesens. 2. Aufl., I. Bd. S. 230. 1880.
- [2] *Föppl, A.*: Über die Mechanik des Pflügens. Landw. Jb. 22 (1893).
- [3] *Reed, I.F.*: Test of Tillage Tools. Agricult. Engng. Vol. 18, (1937) S. 111/115.
- [4] *Nichols, M.L. and I.F. Reed*: Soil Dynamics. VI. Physical Reactions of Soils to Moldboard surfaces. Agricult. Engng. Vol. 15, (1934) S. 187/190.
- [5] *Pollitz, Bruno*: Untersuchungen über den Einfluss der Arbeitsgeschwindigkeit auf den Zugkraftbedarf bei Bodenbearbeitungsgeräten, insbesondere beim Pflug. Diss. T.H. Berlin 1930.
- [6] *Mc. Ewen, E.*: The effect of speed on ploughing. Farm Mechanization. London Jan. 1951.
- [7] *Getzlaff, G.*: Einfluss der Pfluggeschwindigkeit auf die Kräfte. (Unveröffentl. Bericht).
- [8] *Kloth, W.*: Was kann die Technik zur Verbesserung der Bodenbearbeitung tun. Berichte über Landtechnik IV. Wolftratshausen 1948. S. 87/91.
- [9] *Söhne, W.*: Das mechanische Verhalten des Ackerbodens bei Belastungen, unter rollenden Rädern sowie bei der Bodenbearbeitung. In: Grundlg. d. Landtechn. Heft 1. Düsseldorf 1951. S. 87/94.
- [10] *Söhne, W.*: Die Verformbarkeit des Ackerbodens. In: Grundlg. d. Landtechn. Heft 3. Düsseldorf 1952. S. 51/59.
- [11] *Söhne, W.*: Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. In: Grundlg. d. Landtechn. Heft 5. Düsseldorf 1953. S. 49/63.
- [12] *Söhne, W.*: Kraftübertragung zwischen Schlepperreifen und Ackerboden. In: Grundlg. d. Landtechn. Heft 3. Düsseldorf 1952. S. 75/87.

Eingegangen am 18.8.1955

Institut für Landtechnische Grundlagenforschung
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode
Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Kloth

Anschrift des Verfassers: Dr. Ing. Walter Söhne, (20b) Braunschweig, Bundesallee 50