

Der Einfluß der Furchentiefe, Furchenbreite und Geschwindigkeit auf den Pflugwiderstand

Institut für Landtechnik der Universität Pisa

In einer Reihe früherer Arbeiten [1] hat sich der Verfasser mit dem Einfluß der Furchentiefe, Furchenbreite und Fahrgeschwindigkeit auf den Zugwiderstand eines Pfluges beschäftigt. Im Folgenden soll eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeiten mitgeteilt werden.

Der Pflugwiderstand hängt bekanntlich von der Bodenart und dem Bodenzustand, der Furchentiefe und Furchenbreite, der Arbeitsgeschwindigkeit und der Verbindung des Pfluges mit dem Schlepper ab. Da sich besonders die Faktoren, die sich auf den Boden beziehen, in sehr weiten Grenzen verändern können, bereitet es große Schwierigkeiten, die vom Boden auf den Pflugkörper ausgeübten Kräfte richtig zu bewerten. Die Ergebnisse von Zugkraftmessungen können nur dann als zuverlässig gelten, wenn sie aus Durchschnittswerten von vielen und systematisch angelegten Versuchsreihen ermittelt worden sind. Üblicherweise wird der Pflugwiderstand auf den Furchenquerschnitt bezogen und als spezifischer Pflugwiderstand in kg/dm^2 ausgedrückt. Während die verschiedenen Forscher ziemlich übereinstimmende Ergebnisse über den Einfluß der physikalischen und mechanischen Bodeneigenschaften auf den spezifischen Pflugwiderstand gefunden haben, ergaben die Untersuchungen über den Einfluß der Furchenbreite und Furchentiefe sowie der Arbeitsgeschwindigkeit auf den Pflugwiderstand oft verschiedene und manchmal geradezu widersprechende Ergebnisse.

Um nun zuverlässige Durchschnittsdaten zu gewinnen, auf die man sich bei Arbeiten von normaler Pflugtiefe bis zum Tiefumbruch beziehen kann, wurden von uns zahlreiche Zugkraftmessungen durchgeführt. Die im Folgenden mitgeteilten Ergebnisse sind Durchschnittswerte, die in zahlreichen Versuchen unter gleichen Bedingungen auf verschiedenen Böden und mit annähernd gleichen Geräten gewonnen wurden. Dabei gestatten die gefundenen Gesetzmäßigkeiten, auch wenn sie sich auf besondere Bodenzustände beziehen, den Einfluß der einzelnen Faktoren auf den Pflugwiderstand in einem Variationsbereich abzuschätzen, der viel ausgedehnter ist als der von anderen Forschern in der Vergangenheit untersuchte.

Dieses umfangreiche Versuchsprogramm wurde in den Sommermonaten 1952 bis 1954 durchgeführt. Es sollte nach Vereinbarungen zwischen Professor N e r l i, Direktor des Instituts Meccanica Agraria der Universität Pisa und der Direktion dell'Ente Maremma für die Agrar-Reform, die dynamische Schlagkraft und die Wirtschaftlichkeit einer mechanisierten Bodenbearbeitung mit Hilfe der ausgezeichneten Schlepper- und Geräte-Ausstattung des Instituts beweisen. Dadurch ergab sich eine gute Gelegenheit, auch zahlreiche spezielle Pflug- und Umbruchversuche auszuführen, um den Einfluß der verschiedenen Faktoren auf den spezifischen Pflugwiderstand zu studieren [2]. Die Versuche wurden auf verschiedenen Bodentypen im ebenen Gelände durchgeführt, die sich alle in der Umgebung des Mechanisierungszentrums der Marsiliana in der Azienda di Colonizzazione von Orbetello befinden. Sie haben sich zum Teil auf Ton oder pliozänem Sand gebildet, zum Teil gehen sie auf quartäre Bildungen zurück. Die Böden sind vorwiegend angeschwemmt, und man kann darunter die drei klassischen Typen, leichten, mittleren und schweren Boden, finden.

Es wurden zahlreiche Ein- und Mehrfurchenpflüge mit Gewichten von 300 bis 4000 kg verwendet. Sie wurden von einheimischen Rad- und Raupenschleppern gezogen, die erforderlichenfalls auch hintereinander gespannt waren.

Die Zugkräfte wurden auf 40 m langen Strecken gemessen, die vorzugsweise so ausgesucht waren, daß man gegebenenfalls Bodenunterschiede beobachten konnte. Es wurden ferner die Kräfte bei der Hin- und Rückfahrt gemessen, um, wenn erforderlich, den Einfluß eines Gefälles längs der Furche auszuschalten.

Wir wollen nun die Versuchsergebnisse betrachten, ohne näher auf die Versuchsdurchführung und die Versuchseinrichtungen einzugehen.

Versuchsergebnisse

Um den Einfluß der Furchentiefe auf den mittleren Pflugwiderstand zu bestimmen, wurden die Ergebnisse von mehr als 300 Zugkraftdiagrammen verwertet. Daraus ergab sich der Verlauf beziehungsweise die Gesetzmäßigkeit des Gesamt- und des entsprechenden spezifischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Furchentiefe für Ein-, Zwei- und Dreifurchenpflug auf drei verschiedenen Bodentypen. Die Furchentiefe variierte von 20 cm bis zu Maximalwerten von 65 cm bei Dreifurchenpflügen, 70 cm bei Zwei-, und 100 cm bei Einfurchenpflügen. Die Furchenbreiten lagen innerhalb der praktisch üblichen Grenzen; die Durchschnittsgeschwindigkeit betrug 65 cm/s.

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen den spezifischen Pflugwiderstand für Ein- und Zweifurchenpflüge. Daraus geht hervor, daß sowohl der Gesamt- als auch der spezifische Widerstand bis zu einer Tiefe von 30 beziehungsweise 45 und 50 cm linear mit der Furchentiefe ansteigt. Bei größerer Furchentiefe steigen die spezifischen Zugkräfte noch erheblich

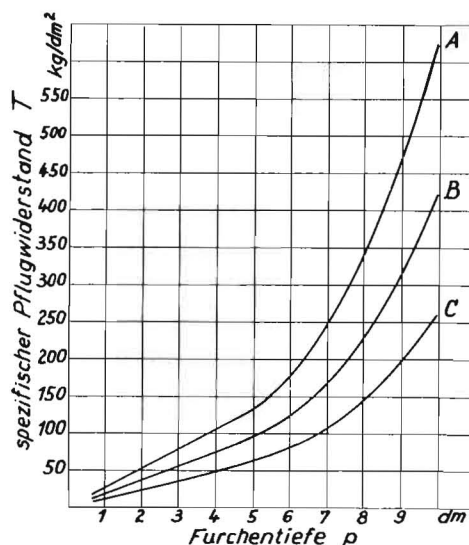


Abb. 1: Spezifischer Zugwiderstand T eines Einfurchenpfluges in Abhängigkeit von der Furchentiefe auf verschiedenen Böden
A: schwerer Boden, B: mittlerer Boden, C: leichter Boden

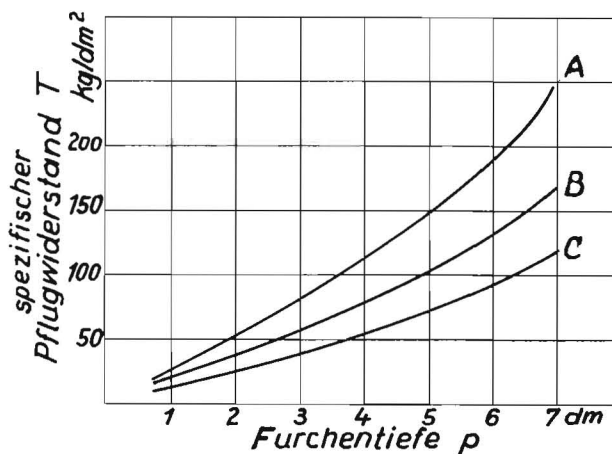


Abb. 2: Spezifischer Zugwiderstand eines Zweifurchenpfluges in Abhängigkeit von der Furchentiefe auf verschiedenen Böden
A: schwerer Boden, B: mittlerer Boden, C: leichter Boden

mehr an. Dies rührt vor allen Dingen daher, daß man es bei größerer Furchentiefe mit bisher unberührten Bodenschichten zu tun hat. Dabei wächst die erforderliche Arbeit zur Überwindung des Schnittwiderstandes, zum Verformen und Aufbrechen und zum Bewegen des Bodens progressiv mit zunehmender Tiefe an. Außerdem wird das Verhältnis der Furchentiefe zur Furchenbreite immer größer und beeinflußt bei gleichbleibenden anderen Bedingungen den spezifischen Pflugwiderstand.

Von besonderer Bedeutung erwies sich auch eine Schichtenbildung im Boden, besonders wenn man von schweren Böden zu leichten Böden übergeht. Bei letzteren ergaben sich Schichten im Untergrund, die erheblich widerstandsfähiger sind als es die Oberflächenstruktur erwarten läßt. Die gleichen Erfahrungen konnten auch an verschiedenen Bodentypen in der Pisaer Ebene gewonnen werden. Darüber wurde bereits in einer früheren Arbeit [3] berichtet, in der die Zunahme der Bodendichte und des Eindringungs- und Druckwiderstandes des Bodens mit der Tiefe untersucht worden war. Dazu wurden Bodenschichten verschiedener Tiefe bis zu einem Meter mit Hilfe der Bernstein-Polikeit-Sonde, die mit einem geraden Spätchen versehen war, und mit Bodendrucksonden nach von Meyenburg, mit einem Durchmesser der Kegelspitzen von 29,4, 50 und 100 mm untersucht. Die dabei gemessenen Werte des Versuchsbodens werden einmal von der Durchwurzelung der Ackerkrume und der Kruste, die sich durch Niederschläge und darauffolgendes Auströcknen an der Oberfläche gebildet hat, beeinflußt; besonders aber wirken sich bei den verschiedenen Tiefen der jeweiligen Böden die Pflugsohlenverdichtungen als Folge wiederholter früherer Bodenbearbeitungen aus.

Von Einfluß ist auch das Gewicht der verwendeten Geräte (der spezifische Zugwiderstand erhöht sich mit dem Gewicht des Pfluges). Mit größerer Furchentiefe müssen verständlicherweise immer größere und schwerere Geräte verwendet werden. Schließlich wirkt sich auch die Zahl der Pflugkörper aus. Es ergab sich ein fühlbarer Unterschied zwischen Ein- und Zweifurchenpflug wie zwischen Zwei- und Dreifurchenpflug. Der größere Zugwiderstand des Mehrfurchenpfluges gegenüber dem Einfurchenpflug ist, wenn alle anderen Bedingungen gleich bleiben, auf diese Gewichtszunahme und auf die größere Zahl von vertikalen Schnittflächen im Boden und die damit verbundene Mehrarbeit zum Zerkleinern und Wenden der Furche zurückzuführen. Zugunsten des Mehrfurchenpfluges spricht allerdings der Umstand, daß bei einer größeren Anzahl Pflugkörper das von einem Körper bearbeitete Volumen im allgemeinen kleiner ist.

In gleicher Weise wurde in späteren Versuchen der Verlauf des gesamten und spezifischen Pflugwiderstandes bei leichten, mittleren und schweren Böden in Abhängigkeit von der Furchenbreite bestimmt. Dabei wurde die Furchenbreite beim Einfurchenpflug von 20 bis 85 cm bei einem Tiefgang zwischen 30 und 60 cm variiert; beim Zweifurchenpflug wurde die Arbeitsbreite von 40 bis 120 cm und beim Dreifurchenpflug von 80 bis 160 cm verändert, wobei die Furchentiefe 30, 40 und 50 cm betrug.

Von den insgesamt erhaltenen 18 Schaubildern ist in Abbildung 3 nur jenes wiedergegeben, welches den spezifischen

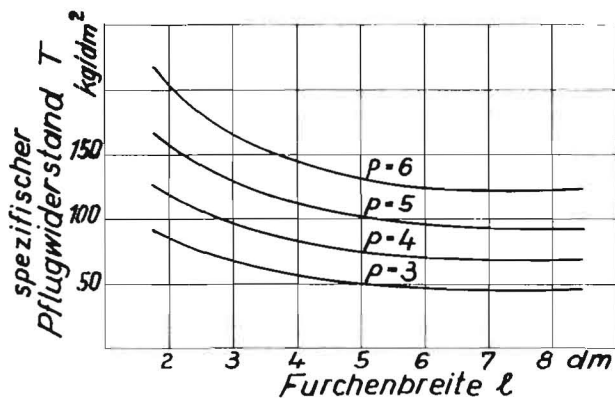


Abb. 3: Spezifischer Zugwiderstand eines Einfurchenpfluges in Abhängigkeit von der Furchenbreite bei verschiedener Furchentiefe p auf mittlerem Boden

Zugwiderstand eines Einfurchenpfluges auf mittlerem Boden bei verschiedener Furchentiefe in Abhängigkeit von der Furchenbreite darstellt. Alle diese Schaubilder bestätigen in erster Linie, daß der spezifische Pflugwiderstand mit zunehmender Furchentiefe anwächst. Während der Gesamtwiderstand bei der schmalsten Furche etwa proportional mit der Furchentiefe ansteigt, gilt dieses Gesetz um so weniger, je breiter die Furchen werden. Das ist besonders dann der Fall, wenn man vom leichten zum festen Boden übergeht, und wenn man Pflüge mit einer größeren Anzahl Körper verwendet. Unter den verschiedenen mehr oder weniger genau zu bestimmenden Einflüssen, von denen dieses Verhalten abhängen kann, überwiegt gewiß die Tatsache, daß bei einer bestimmten Furchentiefe bei Anwachsen der Furchenbreite die für das Aufbrechen derselben erforderliche Arbeit mehr als linear anwachsen muß. Wie man mit einfachen geometrischen Betrachtungen beweisen kann, muß aber auch die erforderliche Arbeit zum Anheben und Wenden der Furche mit zunehmender Breite mehr als linear ansteigen. Offenbar muß das auch die Gesetzmäßigkeit beeinflussen, nach der der spezifische Pflugwiderstand bei einer Verbreiterung der Furche zuerst stark, dann weniger stark, bis zu einem Kleinstwert abnimmt, um dann von neuem kaum merklich wieder anzusteigen. Alle hier mitgeteilten Meßergebnisse beziehen sich auf eine mittlere Vorschubgeschwindigkeit von 0,65 m/s. Interessant und nützlich ist auch eine Untersuchung über den Einfluß der Geschwindigkeit auf den Zugwiderstand. Die dazu erforderlichen Versuche wurden im allgemeinen unter analogen Bedingungen durchgeführt wie die der ersten und zweiten Phase des Versuchsprogramms.

Dabei wurden beim Einfurchenpflug bei den drei Bodentypen Furchentiefen von 30, 40, 50 und 60 cm und dementsprechende Furchenbreiten von 42, 50, 60 und 65 cm eingehalten. Beim Zwei- und Dreifurchenpflug wurden Furchentiefen von 30, 40 und 50 cm untersucht. Beim Zweifurchenpflug betrug die Arbeitsbreite 75, 85 und 100 cm, beim Dreifurchenpflug 95, 135 und 150 cm.

Von den 18 Diagrammen, die den gesamten und spezifischen Pflugwiderstand in Abhängigkeit von der Arbeitsgeschwindigkeit darstellen, ist in Abbildung 4, 5 und 6 jeweils nur der spezifische Widerstand beim Einfurchenpflug auf leichtem, mittlerem und schwerem Boden dargestellt.

Aus den auf diese Weise erhaltenen Kurven geht hervor, daß der Gesamtwiderstand und auch der spezifische Widerstand mit zunehmender Arbeitsgeschwindigkeit ansteigt. Dies wird hervorgerufen durch höhere Beschleunigungskräfte und einen größeren Seitentransport des Erdbalkens mit zunehmender Geschwindigkeit. Bei normaler Bodentiefe und leichtem Boden sowie in dem unteren Geschwindigkeitsbereich steigt der Pflugwiderstand etwa linear mit zunehmender Geschwindigkeit an. Geht man aber zu größerer Furchentiefe und zu schwereren Böden und zu einem höheren Geschwindigkeitsbereich über, so nehmen die Kurven, die den gesamten und spezifischen Widerstand darstellen, einen typischen Exponentialverlauf an. Bei Zwei- oder Dreifurchenpflügen ist zwar der gesamte Widerstand durch die höhere Zahl der Pflugkörper größer, jedoch scheint die Zunahme des spezifischen Widerstandes mit der Pfluggeschwindigkeit im allgemeinen weniger stark ausgeprägt zu sein als beim Einfurchenpflug. Besonders bei ziemlich hohen Geschwindigkeiten scheint der spezifische Pflugwiderstand manchmal beim Zweifurchenpflug relativ geringer zu sein als beim Einfurchenpflug und beim Dreifurchenpflug geringer als beim Zweifurchenpflug.

Gesetzmäßigkeiten

Um die gewonnenen Ergebnisse für den gesamten und spezifischen Pflugwiderstand mit guter Annäherung in der Praxis anwenden zu können, sei es für den Bereich der untersuchten Furchentiefe, sei es für einen darüber hinausgehenden Bereich der Tiefe und der Arbeitsgeschwindigkeit, wird die folgende Gesetzmäßigkeit aufgestellt, die sich aus einer Zusammenfassung dieser Arbeit ergibt. Danach erscheint es möglich, die folgende Exponentialgleichung für den spezifischen Pflugwiderstand T in kg/dm^2 in Abhängigkeit von der Arbeitstiefe p in dm aufzustellen:

$$T = ap + bp^m \quad (1).$$

Darin bedeuten: a , b und m Konstanten, die von der Bodenbeschaffenheit und von den Eigenschaften des Gerätes abhängen. Der Exponent m ist immer größer als 2.

Die Gleichung, die den spezifischen Pflugwiderstand T in Abhängigkeit von der Furchenbreite l in dm wiedergibt, hat die Form

$$T = \frac{A_1}{l} + B_1 l^{m_1} \quad (2),$$

wobei m_1 immer kleiner als 1 ist.

Der Einfluß der Arbeitsgeschwindigkeit auf den spezifischen Pflugwiderstand läßt sich schließlich durch folgende Gleichung darstellen:

$$T = A_1 + \theta_1 V^k \quad (3)$$

wobei V die Geschwindigkeit in m/s bedeutet und der Exponent k größer als 1 ist.

Auch für den Gesamtwiderstand in Abhängigkeit von den untersuchten Variablen wurden ähnliche Gleichungen gefunden.

Die Größe der Durchschnittswerte der verschiedenen Koeffizienten und Exponenten der einzelnen Ausdrücke und ihre mögliche Deutung vom physikalischen, technologischen und dynamischen Standpunkt aus ist in den Tabellen und Überlegungen der oben erwähnten Arbeit [1] wiedergegeben. Es sei noch hervorgehoben, daß im allgemeinen der erste Ausdruck der rechten Seite der Gleichungen (1) und (2) als eine spezifische Funktion der untersuchten Furchentiefe beziehungsweise -breite betrachtet werden kann, während der zweite Ausdruck als Korrektions- und Formfaktor anzusehen ist, der auf die besonderen und verschiedenartigen Umstände eingeht, die eine bestimmte Pflugarbeit beeinflussen können.

Schrifttum:

[1] Caparrini, P.: Primo contributo allo studio della sforzo di trazione dell'aratro (Influenza della profondità di lavoro). L'Agricoltura Italiana, April 1955, Pisa. Tipografia Tornar

Caparrini, P.: Secondo contributo allo studio della sforzo di trazione dell'aratro (Influenza della larghezza della fetta). L'Agricoltura Italiana, Mai 1955, Pisa. Tipografia Tornar

Caparrini, P.: Terzo contributo allo studio dello sforzo di trazione dell'aratro (Influenza della velocità di lavoro). L'Agricoltura Italiana, Juni 1955, Pisa. Tipografia Tornar

[2] Nerli, N.: Dinamica ed economia della lavorazione meccanica del terreno. Annali dell'Accademia di Agricoltura di Torino, Jg. 96. Turin 1955

Nerli, N.: Sperimentazione e costo della meccanizzazione agricola. Atti del Convegno Nazionale della Sperimentazione Agraria, Roma, Dezember 1956. Congita

[3] Caparrini, P.: Contributo allo studio delle proprietà dinamiche del terreno. Genio Rurale, März 1956. Edizioni Agricole, Bologna

Résumé:

Prof. Dr.-Ing. Pietro Caparrini: „Der Einfluß der Furchentiefe, Furchenbreite und Geschwindigkeit auf den Pflugwiderstand.“

Nach einer kurzen Zusammenfassung der wichtigsten Faktoren, von denen die Zugkraft eines Pfluges abhängt, werden die in ausgedehnten Versuchsreihen gewonnenen Ergebnisse diskutiert. Die Versuchsreihen hatten den Zweck, den Einfluß der Furchentiefe, Furchenbreite und auch der Geschwindigkeit auf die Zugkraft des Pfluges zu untersuchen, wobei insbesondere die Furchentiefe bis auf einen Meter ausgedehnt wurde.

Auf Grund einer sorgfältigen Auswertung der in den Versuchen gewonnenen Meßergebnisse war es möglich, die Gesetzmäßigkeit, in der die Zugkraft von den erwähnten technologischen und dynamischen Größen abhängt, für den Ein-, Zwei- und Dreifurchenpflug auf leichtem, mittlerem und schwerem Boden in Kurven darzustellen.

Weiterhin wurden die erhaltenen Kurven durch analytische Gleichungen dargestellt. Mit Hilfe dieser Gleichungen können die Ergebnisse benutzt werden, um die Zugkräfte eines Pfluges mit guter Annäherung in einem ziemlich weiten Anwendungsbereich der verschiedenen Faktoren in der Praxis vorauszubestimmen.

Prof. Dr.-Ing. P. Caparrini: „On the factors affecting the draft of plow“.

After a brief summary on the most important factors concerning the plow draft, the results come out from an experimental investigation, elaborated with the purpose of studying properly the influence on the plow draft of the depth and width of furrow as of working speed, are examined. On the basis of an accurate elaboration of a very large number of data carried out by the experimentation, diagrams are plotted concerning the direct connection and dependence of the plow draft with the above mentioned dynamical and technological parameters. Diagrams are plotted regarding the single and multiple-bottom plow as well as light, medium and heavy soil. Analytical relations, interpreting the shape of the same diagrams, are expressed to be useful for practical computations on the basis of the experience gained by the results obtained by the present work. A quite good approximation may be reached by using such analytical results, within a large range of the main considered factors.

Prof. Dr.-Ing. P. Caparrini: «Sur les facteurs influençant la traction de la charrue.»

Après de brefs renvois sur les facteurs les plus importants desquels dépend la traction de la charrue, on examine les résultats obtenus par une recherche expérimentale bien approfondie, faite dans le but d'étudier l'influence de la profondeur et de la largeur de travail ainsi que de la vitesse de déplacement sur la traction de la charrue même.

D'après une élaboration rationnelle de très nombreuses données recueillies pendant l'expérience, on a pu tracer les courbes qui lient directement, par le monosoc, le bisoc et le trisoc, en trois différentes espèces de terrain, (léger, à empatement moyen, compact), la résistance à la traction de la charrue aux grandeurs technologiques et dynamiques considérées.

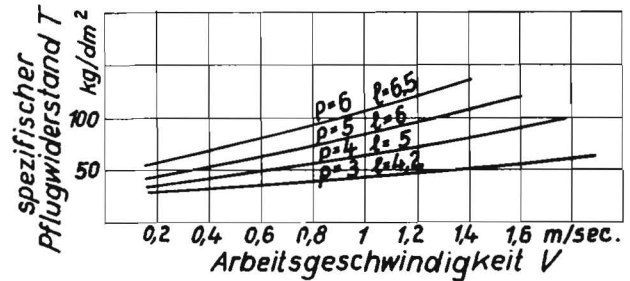


Abb. 4: Spezifischer Zugwiderstand eines Einfurchenpfluges in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bei verschiedenen Furchentiefen p und Furchenbreiten l auf leichtem Boden

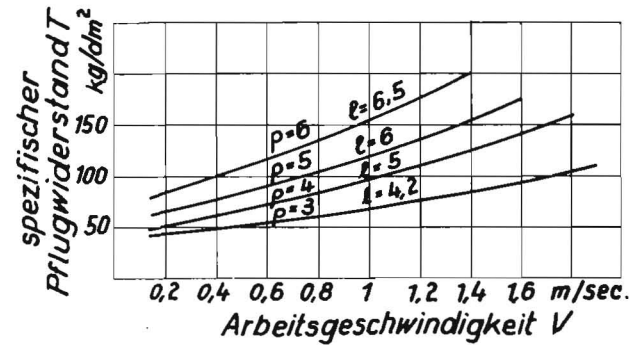


Abb. 5: Spezifischer Zugwiderstand eines Einfurchenpfluges in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bei verschiedenen Furchentiefen p und Furchenbreiten l auf mittlerem Boden

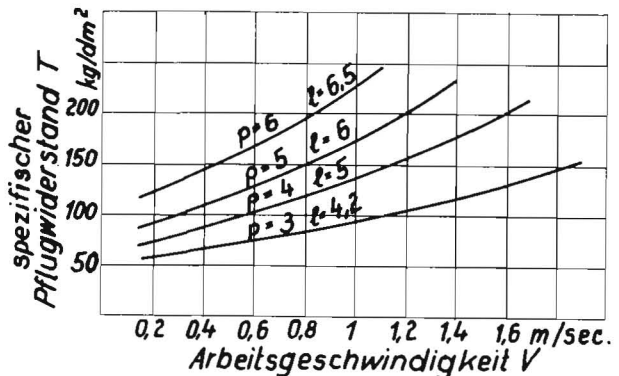


Abb. 6: Spezifischer Zugwiderstand eines Einfurchenpfluges in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit bei verschiedenen Furchentiefen p und Furchenbreiten l auf schwerem Boden

En outre, on a recherché des relations analytiques représentant des courbes obtenues dans le but de pouvoir aussi utiliser les résultats pour calculer, pratiquement, d'une manière approximative, assez exacte, la résistance à la traction de la charrue, entre les limites assez étendues de variation de différents facteurs.

Ing. Dr. P. Caparrini, catedrático: «Sobre los factores que influyen el esfuerzo de tracción del arado.»

Después unas breves palabras sobre los más importantes factores de que depende el esfuerzo de tracción del arado, vamos a examinar los éxitos conseguidos por una amplia investigación experimentos recogidos durante la experimentación, se han delineado las tablas, de la amplitud de la tajada y también de la velocidad al avance, sobre el esfuerzo de tracción de mismo arado.

Sobre la base de una racional elaboración de los muchísimos elementos recogidos durante la experimentación, se han delineado las curvas que atan directamente, para una reja, dos y tres, respectivamente, en tres diferentes tipos de terreno, (suelto, media amasadura, agarrado), el esfuerzo de tracción del arado a las grandezas tecnológicas y dinámicas, consideradas.

Han sido además rebuscadas relaciones analíticas representativas de las curvas obtenidas, para utilizar también los éxitos para calcular prácticamente, por aproximación, los valores del esfuerzo de tracción del arado, dentro de límites bastante amplios de variación de los diferentes factores.

Prof. Dr.-Ing. Th. Oehler, Karlsruhe:

Merkmale, Bedingungen und Grenzen der Leistungsfähigkeit von Drehstrahlregnern

II. Auswirkungen der Dimensionierung und Formgebung von Regner und Düse auf die Güte und Wurfweite des Wasserstrahls

Strahlgeschwindigkeit (v_s) und Strahlwurfweite (W)

Die Beziehung W/H (Wurfweite : Düsendruckhöhe) umfaßt den ganzen Komplex der Strömungs- und Störungsvorgänge zwischen dem Düsenvorraum und dem Aufschlagsort des Wasserstrahles. Sie hat sich als Kriterium der Wurfleistung von Strahlregnern bewährt, genügt jedoch nicht, um die für die Länge der Flugbahn maßgebenden Faktoren, den Wirkungsgrad der in der Düse sich vollziehenden hydraulischen Umformung von Druck in Strömungsgeschwindigkeit (Turbulenz, Drill) im einzelnen zu erkennen.

Es wurde deshalb im Heft 5/1957 der „Landtechnischen Forschung“ zunächst der Wirkungsgrad der hydraulischen Umformungen, also der Komplex der Vorgänge zwischen dem Düsenvorraum und der Stelle der stärksten Strahleinschnürung, für den der Luftwiderstand ohne Bedeutung ist, erfaßt. Der folgende Teil beschäftigt sich mit dem fertig entwickelten Strahl, dessen Verhalten im Luftraum (bei Windstille) von den unveränderlich anzunehmenden Faktoren Erdanziehung und Luftbeschaffenheit und den veränderlichen Faktoren, den Strahleigenschaften, bestimmt wird.

In Tabelle 5a sind die Werte W/v_s für den reibungslosen Wurf der W/v_s -Werten gegenübergestellt, die unter sehr günstigen hydraulischen Voraussetzungen in älteren Untersuchungen gewonnen wurden. Vergleiche der beiderseitigen Werte lassen die Beeinträchtigung der Wurfweite eines hochqualifizierten Strahles durch den Luftwiderstand erkennen.

Tabelle 4: Strahlgeschwindigkeit und Strahlwurfweite

Düsen-Nennweite	8	12			24		
Düsen-Meßweite mm	8,1	11,9	12,3	11,9	23,98	24,10	24,05
Konuswinkel Grad	90	180	90	32	180	90	32
Strohlstärke mm	7,19	10,0	10,9	11,3	20,2	21,4	22,85
Strahlquerschn. mm ²	40,6	78,6	93,0	100	320	360	408

Druckstufe 20 m							
Wassersperde Q l/sec	0,8	1,45	1,75	1,95	5,6	6,6	7,95
Strahlgeschwindigkeit v_s m/sec	19,7	18,5	18,8	19,5	17,5	18,3	19,4
Wurfweite W m	17,5	21	23	24	26	28	30
W/v_s	0,89	1,13	1,22	1,23	1,49	1,53	1,55

Druckstufe 40 m							
Wassersperde Q l/sec	1,1	2,0	2,5	2,78	8,0	9,4	11,3
Strahlgeschwindigkeit v_s m/sec	27,1	25,5	26,95	27,8	25,0	26,2	27,7
Wurfweite W m	19,5	27,4	30,0	32,0	35,0	38,0	42,5
W/v_s	0,72	1,07	1,13	1,15	1,40	1,45	1,48

Druckstufe 60 m							
Wassersperde Q l/sec	1,3	2,45	3,00	3,45	10,0	11,30	13,70
Strahlgeschwindigkeit v_s m/sec	32,1	31,2	32,3	34,5	31,1	31,4	33,7
Wurfweite W m	21	32	35	37	40	43,5	49
W/v_s	0,65	1,02	1,08	1,09	1,28	1,38	1,45

Die Tabelle 5b enthält Vergleichswerte, die mit der neueren Versuchseinrichtung von nur 50 mm weitem Strahlrohr und mit Düsen von verschiedener Gestalt gewonnen wurden. Die Gegenüberstellung der beiden Zahlentafeln gibt ein Bild von dem Einfluß der stärkeren Turbulenz der noch als recht gut zu bezeichnenden Strahlen (Tabelle 5b) auf die Wurfweite im Vergleich mit besonders guten Strahlen (Tabelle 5a).

Als Unterlage für die Tabelle 5b möge die Tabelle 4 dienen. Nach der Gleichung (7 a) ist beim reibungslosen Wurf und einem Erhebungswinkel von 32° die Wurfweite

$$W = 1,8 \cdot h_s [m]$$

wobei h_s die Geschwindigkeitshöhe nach Gleichung (4 b) ist. Aus den Gleichungen (7 a) und (3 b) erhält man für die Beziehung der Wurfweite (W) zur Strahlgeschwindigkeit (v_s):

$$\bar{w} = \frac{W}{v_s} = \frac{1,8 h_s}{\sqrt{2 g h_s}} = 0,407 \sqrt{h_s}$$

Die Tabelle 5a enthält in der zweiten Spalte die Werte W/v_s für die Geschwindigkeitshöhen h_s von 10 bis 60 m. Sie

Tabelle 5a: Wurfverhältnisse

Düsen		7/0			12/49			24/49		
h_s m	W/v_s	v_s m/sec	W m	W/v_s	v_s m/sec	W m	W/v_s	v_s m/sec	W m	W/v_s
10	1,28	13,0	14,5	1,11	—	—	—	—	—	—
20	1,82	18,2	19,8	1,09	21,9	26,0	1,19	—	—	—
30	2,22	—	2,07	22,0	1,06	25,4	31,0	1,17	26,4	42,0
40	2,56	—	—	—	—	30,0	33,0	1,10	30,7	49,0
50	2,78	—	—	—	—	—	—	—	34,1	55,0
60	3,12	—	—	—	—	—	—	—	37,8	59,0

Die Düse 7 hat zylindrischen Auslauf

Tabelle 5b: Wurfverhältnis W/v_s nach den neueren Untersuchungen mit einem Strahlrohr von 50 mm LW

Düse	8/90		12/180		12/90		12/32	
Stufe atü	h m	W/v_s	h m	W/v_s	h m	W/v_s	h m	W/v_s
2	19,8	0,89	17,4	1,13	18,0	1,22	19,4	1,23
4	37,5	0,72	33,2	1,07	37,0	1,13	39,0	1,18
6	52,4	0,66	49,6	1,03	53,2	1,08	58,0	1,08

Düse	24/180		24/90		24/32	
Stufe atü	h m	W/v_s	h m	W/v_s	h m	W/v_s
2	15,7	1,49	17,0	1,53	19,2	1,55
4	31,9	1,40	35,0	1,49	38,1	1,53
6	49,4	1,28	50,0	1,38	58,0	1,45