

Untersuchungen über Modellbeziehungen bei Bodenbearbeitungswerkzeugen (1. Mitteilung)

Durch Untersuchungen an verkleinerten Modellen konnte in einigen Bereichen der Technik der erforderliche Versuchsaufwand erheblich vermindert werden oder wurden, wie z. B. im Wasserbau, Versuche in größerem Umfang überhaupt erst ermöglicht.

Die Beziehungen zwischen den Kennwerten des Originals und des geometrisch ähnlichen Modells — die Modellgesetze — konnten dabei aus den bekannten physikalischen Beziehungen der untersuchten Medien abgeleitet werden. In neuerer Zeit wurde die Ableitung der entsprechenden Modellgesetze durch die Dimensionsanalyse auf Grund des BUCKINGHAMschen π -Theorems wesentlich vereinfacht [1] [2].

Auch diese in der Anwendung einfache Methode erfordert aber die genaue Kenntnis der an dem zu untersuchenden Vorgang beteiligten Größen. Hierin dürfte der Grund zu suchen sein, daß im Gegensatz zu den Medien Luft, Wasser, Öl u. a. Untersuchungen über die Modellgesetze im Boden so gut wie gar nicht vorliegen. Erst in neuerer Zeit finden sich hauptsächlich in amerikanischer Literatur [3] [4] [5] [6] [7] Hinweise auf Arbeiten in dieser Richtung. Besonders in der — durch militärische Belange beeinflussten — Fahrmechanik auf unbefestigten Fahrbahnen liegen bereits umfangreichere Untersuchungen über Modellbeziehungen vor. Aus diesen, vornehmlich bei Rollwiderstandsmessungen gesammelten Erfahrungen läßt sich ableiten, daß auch bei landtechnischen Forschungsaufgaben mit dem Medium Boden die Kenntnis und Nutzung der entsprechenden Modellgesetze zu einer Verminderung des materiellen und personellen Aufwandes führen dürften. Die folgenden Untersuchungen erstrecken sich auf die Kräftebeziehungen an Modell-Bodenbearbeitungswerkzeugen.

1. Modellbeziehungen für Bodenbearbeitungswerkzeuge

Zur Aufstellung der Modellbeziehungen für die an Bodenbearbeitungswerkzeugen wirkenden Kräfte soll vorerst eine Auswahl der Kennwerte benutzt werden, die von den verschiedensten Autoren als einflußreich auf die Kräfteverhältnisse an diesen Werkzeugen angeführt werden. Entsprechend den Bedingungen des π -Theorems werden daher folgende Größen eingeführt:

Objekteigenschaften:

Charakteristische Abmessungen des geometrisch ähnlichen Körpers	l
Reibungskoeffizient zwischen Material und Boden	μ
Adhäsion zwischen Material und Boden	a

Bodeneigenschaften:

Bodendichte	φ
Koeffizient der inneren Reibung	Φ
Kohäsion	c
mittlerer Korndurchmesser	r

Systemeigenschaften:

Erdbeschleunigung	g
Arbeitsgeschwindigkeit	ν
Arbeitstiefe	t

Unabhängige:

Arbeitswiderstand	P
-------------------	---

Für das technische Maßsystem — Kraft (K), Länge (L), Zeit (T) — lautet damit die Dimensionsmatrix:

	l	μ	a	φ	Φ	c	r	g	ν	t	P
K	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1
L	1	0	-2	-4	0	-2	1	1	1	1	0
T	0	0	0	2	0	0	0	-2	-1	0	0

* Institut für Mechanisierung der Landwirtschaft Potsdam-Bornim der DAL zu Berlin

Mit den Hauptvariablen l, φ , g ergeben sich die $n - r = 11 - 3 = 8$ π -Ausdrücke wie folgt:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \varphi_1(l, \varphi, g, P) \\ &= l^{x_1} \cdot \varphi^{y_1} \cdot g^{z_1} \cdot P \\ &= [L]^{x_1} \cdot [K \cdot L^{-4} \cdot T^2]^{y_1} \cdot [L \cdot T^{-2}]^{z_1} \cdot P \\ &= K^{y_1+1} \cdot L^{x_1-4y_1+z_1} \cdot T^{2y_1-2z_1} \end{aligned}$$

Aus $y_1 + 1 = 0$; $x_1 - 4y_1 + z_1 = 0$; $2y_1 - 2z_1 = 0$
folgt $x_1 = -3$; $y_1 = -1$; $z_1 = -1$ und damit wird

$$\pi_1 = \frac{P}{\beta^3 \cdot \varphi \cdot g} \tag{1}$$

$$\pi_2 = \varphi_2(l, \varphi, g, \nu) = \frac{\nu^2}{l \cdot g} \tag{2}$$

$$\pi_3 = \varphi_3(l, \varphi, g, t) = \frac{t}{l} \tag{3}$$

$$\pi_4 = \varphi_4(l, \varphi, g, r) = \frac{r}{l} \tag{4}$$

$$\pi_5 = \varphi_5(l, \varphi, g, c) = \frac{c}{l \cdot \varphi \cdot g} \tag{5}$$

$$\pi_6 = \varphi_6(l, \varphi, g, a) = \frac{a}{l \cdot \varphi \cdot g} \tag{6}$$

$$\pi_7 = \varphi_7(l, \varphi, g, \Phi) = \Phi \tag{7}$$

$$\pi_8 = \varphi_8(l, \varphi, g, \mu) = \mu \tag{8}$$

Daher müßten bei dem gewählten Ansatz folgende dimensionslosen Ausdrücke für Original und Modell konstant gehalten werden:

$$\frac{P}{\beta^3 \cdot \varphi \cdot g}, \frac{\nu^2}{l \cdot g}, \frac{t}{l}, \frac{r}{l}, \frac{c}{l \cdot \varphi \cdot g}, \frac{a}{l \cdot \varphi \cdot g}, \Phi, \mu \tag{9}$$

Wird das Original mit dem Index o und das Modell mit dem Index m gekennzeichnet und der Modellmaßstab durch

$$\lambda = \frac{l_o}{l_m} \tag{10}$$

bestimmt, so ergeben sich folgende Forderungen an die Modellausführung:

$$\frac{P_o}{P_m} = \lambda^3 \frac{\varphi_o \cdot g_o}{\varphi_m \cdot g_m} \tag{11.1}$$

$$\frac{\nu_o^2}{\nu_m^2} = \lambda^2 \left(\frac{g_o}{g_m} \right)^2 \tag{11.2}$$

$$\frac{t_o}{t_m} = \lambda \tag{11.3}$$

$$\frac{r_o}{r_m} = \lambda \tag{11.4}$$

$$\frac{c_o}{c_m} = \lambda \frac{\varphi_o \cdot g_o}{\varphi_m \cdot g_m} \tag{11.5}$$

$$\frac{a_o}{a_m} = \lambda \frac{\varphi_o \cdot g_o}{\varphi_m \cdot g_m} \tag{11.6}$$

$$\Phi_o = \Phi_m \tag{11.7}$$

$$\mu_o = \mu_m \tag{11.8}$$

Im normalen Versuchsbetrieb ist die Erdbeschleunigung für Modell und Original gleich ($g_o/g_m = 1$). Bei der Herrichtung des Bodens für den Modellversuch dürften die Forderungen (11.5) und (11.6) die größten Schwierigkeiten bereiten, da die Nachahmung eines bestimmten Original-Bodenzustandes die Herrichtung eines Modellbodens gleicher Dichte φ und innerer Reibung Φ , aber mit um den Modellmaßstab verringert Kohäsion c und Adhäsion a erfordert. Es erscheint hier zweckmäßiger, aus den Eigenschaften des Modellbodens die Vorhersagen für die (anderen) Eigenschaften eines Originalbodens zu machen, als eine Rekonstruktion eines bestimmten Originalbodens im Modell zu versuchen.

2. Modellversuche in Reibungsböden

Für einen Boden mit geringster Kohäsion ($c \rightarrow 0$), wie z. B. trockener, feinkörniger Sand, dürften die Forderungen (11.5) und auch (11.6) zu vernachlässigen sein.

Ebenso sollte bei dem Größenverhältnis zwischen Werkzeug und Korngröße eine Vernachlässigung der Forderung (11.4) statthaft erscheinen.

Damit ergeben sich für einen kohäsionslosen Boden mit gleicher Dichte und innerer Reibung im Original und Modellfall ($\varphi_o = \varphi_m$, $\Phi_o = \Phi_m$) folgende Modellbeziehungen:

$$\frac{P_o}{P_m} = \lambda^3 \quad (12.1)$$

$$\frac{v_o}{v_m} = \lambda^{\frac{1}{2}} \quad (12.2)$$

$$\frac{l_o}{l_m} = \lambda \quad (12.3)$$

$$\mu_o = \mu_m \quad (12.4)$$

Die hier abgeleiteten Modellbeziehungen (12.1 und 12.2) für kohäsionslosen Boden entsprechen Froudes Modellgesetz, das im Schiffsbau für Vorgänge mit Trägheits- und Schwerkraften, z. B. bei Wellenbilduntersuchungen benutzt wird. Die Gleichung (2) ist mit der Froudeschen Zahl identisch.

Es war durch Versuche zu überprüfen, ob bei der Aufstellung der Modellbeziehungen solche Kennwerte gewählt wurden, die die Kräftebeziehungen bei reinem Reibungsboden widerspiegeln.

2.1. Versuchseinrichtung

Für die Versuche wurde eine kleine, 4 m lange und 0,5 m breite Bodenrinne benutzt, die mit getrocknetem feinkörnigem Quarzsand gefüllt war (Bild 1). Die Werkzeuge wurden in speziellen Werkzeughaltern befestigt, die die auftretenden Kräfte auf Biegebalken übertragen. Als Aufnehmer dienten Dehnungsmeßstreifen; die Registrierung erfolgte über einen Schleifenoszillographen. Nach jeder Meßfahrt wurde der Boden gelockert bzw. gemischt und mit einem schienengeführten Planierschild eingeebnet.

2.2. Versuche mit einfachen geometrischen Körpern

Die ersten Versuche wurden mit zwei unterschiedlichen, einfachen geometrischen Körpern, einem Kegel (W2) und einem kreuzförmigen Körper aus Rundmaterial (W3) durchgeführt und für beide Werkzeuge vier verschiedene Größenvarianten im Bereich 1:1 bis 1:3 eingesetzt (Bild 2).

Mittelwerte der durchgeführten 6 Versuche je Arbeitsgeschwindigkeit sind in Bild 3 und 4 als Meßpunkte dargestellt.

Die Verrechnung der Ergebnisse zeigte, daß die Meßwerte besser der der Gorjatschkinschen Gleichung entsprechenden Beziehung

$$P = k + e \cdot v^2 \quad (13)$$

wobei k geschwindigkeitsunabhängige Konstante und e Koeffizient des Geschwindigkeitseinflusses sind,

genügte als einer linearen Regression über der Geschwindigkeit. Die für alle Einzelwerte der einzelnen Größenvarianten errechneten Kurven sind ebenfalls in Bild 3 und 4 dargestellt.

Bezeichnet man wiederum die Werte des „Originals“ in (13) mit dem Index o und die des Modells mit dem Index m , so ergibt sich durch Einführung der Beziehung von (12.1) und (12.2)

$$\begin{aligned} P_o &= k_o + e_o \cdot v_o^2 \\ &= \lambda^3 (k_m + e_m \cdot v_m^2) \\ &= \lambda^3 (k_m + e_m \cdot v_o^2 / \lambda) \\ &= \lambda^3 \cdot k_m + \lambda^2 \cdot e_m \cdot v_o^2 \end{aligned} \quad (14.1)$$

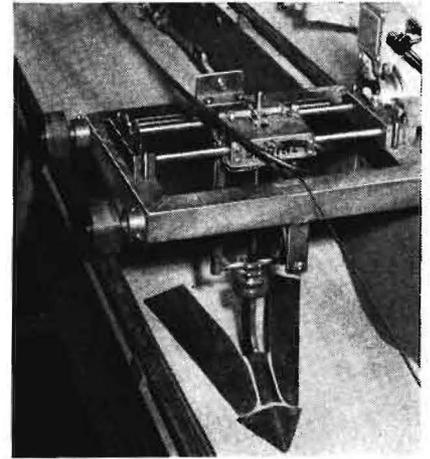


Bild 1. Modellbodenrinne des Instituts für Mechanisierung der Landwirtschaft Potsdam-Bornim. Im Meßwagen Biegebalkenmeßeinrichtung für Häufelkörper

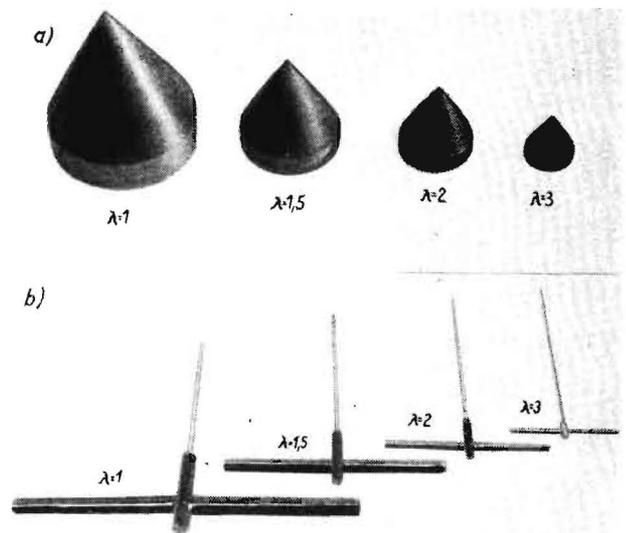


Bild 2. Versuchswerkzeuge. a) Kegel (W2), b) Kreuz (W3)

und in allgemeiner Form

$$P_o = \lambda^{n_k} \cdot k_m + \lambda^{n_e} \cdot e_m \cdot v_o^2 \quad (14.2)$$

Wenn die Versuche mit allen Größenvarianten mit gleichen Geschwindigkeiten durchgeführt werden, kann in einfacher Weise der bei den Versuchen auftretende Exponent n_k bzw. n_e durch die Auswertung der Versuchswerte nach der Gleichung

$$n_k = \frac{\lg \frac{k_o}{k_m}}{\lg \lambda} \quad \text{bzw.} \quad n_e = \frac{\lg \frac{e_o}{e_m}}{\lg \lambda} \quad (15)$$

ermittelt werden (Bild 5). Die anhand der Versuchswerte ermittelten Exponenten n_k und n_e sind in Tafel 1 dargestellt.¹

¹ In dieser Auswertung wurde die zweitgrößte Variante als „Original“ ($\lambda = 1$) angesetzt, um sowohl einen gewissen Verkleinerungs- als auch Vergrößerungsbereich zu beurteilen. Ferner wurde so die Auswirkung evtl. Meßfehler durch Überlastung der Meßeinrichtung bei der Reihe W 3 $\lambda = 1$ gering gehalten.

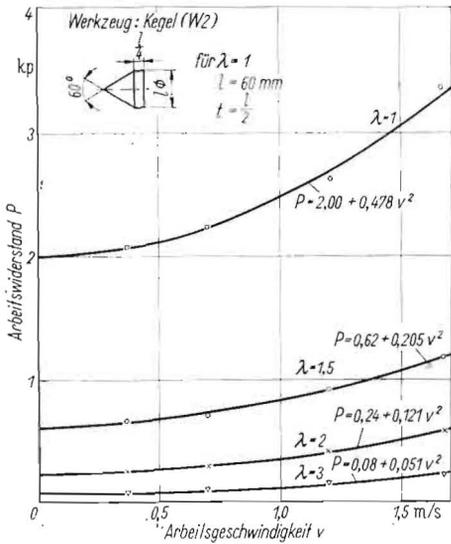
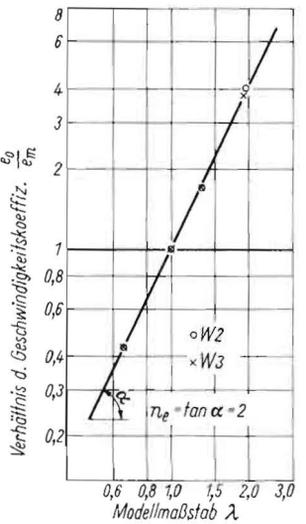
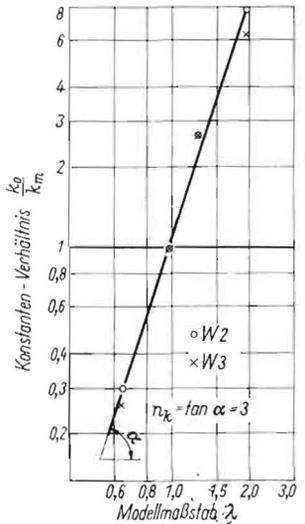
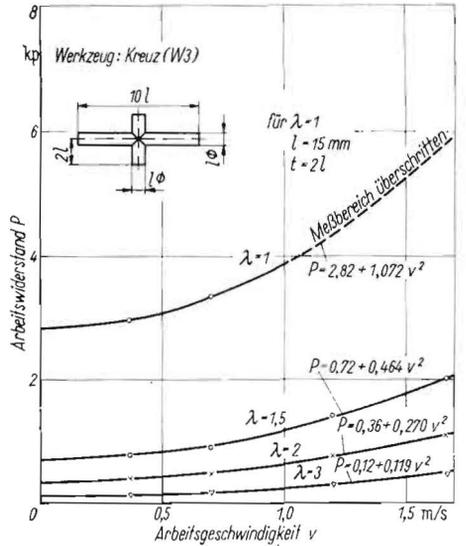


Bild 3
Abhängigkeit des Arbeitswiderstands von der Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Modellmaßstäbe λ des Kegel-Werkzeuges (W 2) ...

Bild 4
... und des Kreuz-Werkzeuges (W 3)

Bild 5
Abhängigkeit des Konstantenverhältnisses k_0/k_m und des Verhältnisses der Geschwindigkeitskoeffizienten c_0/c_m vom Modellmaßstab

Bild 6
Auf $\lambda = 1$ umgerechnete Arbeitswiderstände des Kegelwerkzeuges (W 2) für die Modellmaßstäbe $\lambda = 1,5$ bis 3 und gemessener Arbeitswiderstand des gleichen Werkzeuges für $\lambda = 1$



5

Exponent	Werkzeug W 2	Werkzeug W 3
n_k	3,00	2,96
n_e	1,99	2,01

Tafel I. Nach Versuchswerten errechnete Exponenten n_k und n_e

Die Versuche bestätigen die Gültigkeit der für reine Reibungsböden aufgestellten Modellbeziehungen. In Bild 6 sind die nach (12.1) auf $\lambda = 1$ umgerechneten Versuchswerte der einzelnen Größenvarianten des Werkzeuges W2 (Kegel) dargestellt. Die umgerechneten Modellwerte weichen nicht mehr als $\pm 9\%$ von den Meßwerten des Originals ab.

2.3. Versuche mit landtechnischen Werkzeugen

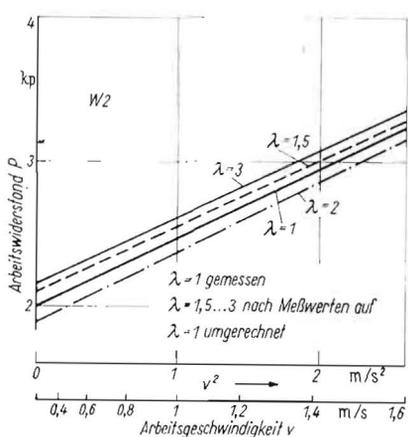
Auf Grund der mit einfachen geometrischen Körpern erzielten Ergebnisse wurden die Modellbeziehungen in Reibungsböden weiter an normalen landtechnischen Werkzeugen kontrolliert. Hierzu diente ein Häufelkörper für Kartoffelkultur neueren Typs in 1,5facher und 2facher Verkleinerung² (Bild 7). Für den Körper in 2facher Verkleinerung wurde der Zugkraftbedarf für 4 Geschwindigkeiten gemessen und die Zugkraft-Geschwindigkeitsfunktion berechnet. Auf Grund dieser Beziehung wurde für einen im Verhältnis $\lambda = 1/1,33$ geometrisch ähnlichen Häufelkörper die Zugkraft-Geschwindigkeits-Funktion mit $n_k = 3$ und $n_e = 2$ vorherbestimmt. Kontrollmessungen mit dem Körper in 1,5facher Verkleinerung ergaben eine gute Übereinstimmung der vorherbestimmten und der gemessenen Werte (Bild 8).

Die Meßergebnisse gestatten die Folgerung, daß der Häufelkörper in Originalgröße bei größter Arbeitstiefe auf trockenen Reibungsböden einen Zugkraftbedarf um 30 kp bei 4 km/h Arbeitsgeschwindigkeit und einen Zugkraftbedarf um 50 kp bei 10 km/h Arbeitsgeschwindigkeit aufweisen wird.

3. Zusammenfassende Folgerungen

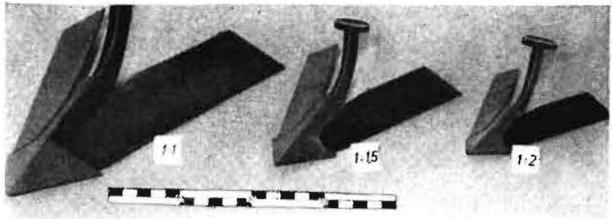
Es wurde dargestellt, daß die Methode der Dimensionsanalyse auch für Aufstellung von Modellbeziehungen für die an Bodenbearbeitungswerkzeugen wirkenden Kräfte anwendbar ist. Die volle Nutzung dieses Verfahrens wird durch ungenügende Kenntnisse über die die Kräfte an Bodenbearbeitungswerkzeugen beeinflussenden Kennwerte behindert. Für einen trockenen Reibungsboden konnte nachgewiesen werden, daß hier Modellbeziehungen bestehen, die mit dem Froude'schen Modellgesetz identisch sind. Für einen Kartoffelhäufel wurden damit mit gutem Erfolg auf Grund von Messungen am verkleinerten Modell Vorhersagen für die

² Der Originalkörper überschreitet die für die Meßrichtung zulässigen Grenzwerte



6

Bild 7. Häufelkörper für Kartoffeln im Maßstab 1:1 bis 1:2



größeren Ausführungen gemacht, so daß die gefundenen Beziehungen für trockene Reibungsböden anwendbar erscheinen.

Weitere — noch nicht abgeschlossene — Meßreihen zeigen, daß aber auf feuchten Reibungsböden die aufgestellten Beziehungen nicht mehr in vollem Umfang korrekt die Kräftebeziehungen zwischen Modell und Original darstellen. Die bisherigen Ergebnisse lassen jedoch bereits die Folgerung zu, daß die aufgestellten Beziehungen auch für diese Böden zur Ermittlung von Maximalwerten verwendbar sind.

Literatur

- [1] KNAPP, F. H.: Ausfluß, Überfall und Durchfluß im Wasserbau. Braun, Karlsruhe, S. 32 bis 50
- [2] WALLOT, J.: Größengleichungen, Einheiten und Dimensionen. Barth, Leipzig, 1957, S. 139 bis 192
- [3] NUTTAL, C. J./R. P. Mc. GOVAN: Scale models of vehicles in soils, and snow. Paper Nr. 42, in: Proc. 1st int. Conf. Soilvehicle Mech., Turin 1961
- [4] BEKKER, M. G.: Theory of Landlocomotion. Ann Arbor, Michigan 1956, S. 464 bis 474
- [5] COBB, D. E. u. a.: Scale model evaluation of earthmoving tools. Paper Nr. 27, in: Proc. 1st int. Conf. Soil-vehicle Mech., Turin 1961

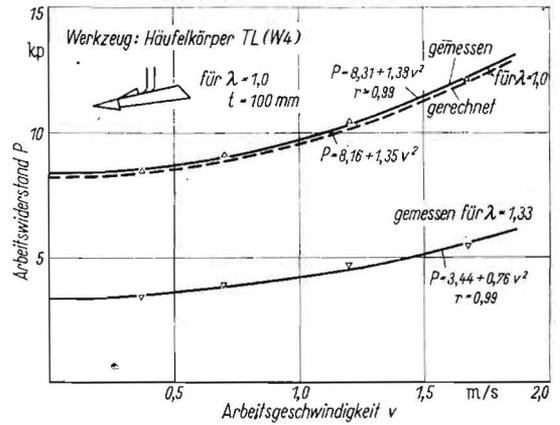


Bild 8. Abhängigkeit des Arbeitswiderstands von der Geschwindigkeit bei einem Häufelwerkzeug (W 4) (Meßwerte und umgerechnete Werte für $\lambda = 1,33$ und $\lambda = 1$)

- [6] HARRISON, W. L.: Analytical prediction of performance for full size and small scale model vehicles. Paper Nr. 43, in: Proc. 1st int. Conf. Soil-vehicle Mech., Turin 1961
- [7] BARNES, K. K. u. a.: Similitude in Studies of Tillage Implement Forces. Agricultural Engineering (1960) S. 32 bis 39, 42 A 6227

Prüfung von Traktoren auf Hanglagen in der CSSR

Ing. J. SATEK*

Die Mitarbeiter des Forschungsinstituts für Landmaschinen in Chodov bei Prag und der Hochschule für Landwirtschaft in České Budějovice prüften gemeinsam in diesem Jahr auf dem Staatsgut Frymburk im Bezirk Südböhmen Landmaschinen und Traktoren für Gebirgslagen. Im Mittelpunkt des Interesses stand die Prüfung eines Hangtraktors.

Dieser Traktor stellt im eigentlichen eine Variante des Zetor 3011 aus der Typenreihe Zetor dar. Wie dieser bringt er eine Leistung von 33 PS. Um eine größere Quer- und Längsstabilität zu erreichen, wurde sein Schwerpunkt niedriger gelegt, außerdem besitzt er eine größere Spurweite.

Er kann von 2 Ak in 4 bis 5 h im landwirtschaftlichen Betrieb selbst zu einem Hangtraktor umgebaut werden. Dabei werden die Portale der Hinterachse um 60° verdreht, verlängerte Vorderachsschenkel eingebaut, ein unteres Schutzblech montiert, der Kraftarm der hydraulischen Hebevorrichtung um zwei Gewindegänge gehoben und die Kotflügel entsprechend der tieferen Schwerpunktlage höher angebracht. Die Bodenfreiheit des Traktors beträgt nach dem Umbau 215 mm, die Stabilität wird so erhöht, daß der Traktor ohne Kippgefahr auf Hängen mit 18 bis 20° Neigung arbeiten kann. Die statische Stabilität beträgt 54° . Der Koeffizient der Kippsicherheit liegt also etwa bei 3.

Dieser für die Arbeit im hängigen Gelände umgebaute Traktor wurde in drei verschiedenen Ausführungen geprüft:

1. Zetor 3011 mit tiefem Schwerpunkt und Wasserfüllung in den Antriebsrädern, mit angebaute Rotationslockerer für Rekultivierungsarbeiten auf Bergwiesen (Bild 1).
2. Zetor 3011 mit tiefem Schwerpunkt, mit Gitterrädern. Ein seitlich angebaute Mähbalken wird hydraulisch betrieben. Die Gitterräder verringern den Bodendruck des Traktors wesentlich und gewährleisten eine zuverlässige Arbeit auf wenig tragfähigem Gelände (nasse Bergwiesen).
3. Zetor 3011 mit tiefgelagertem Schwerpunkt, zwillingsbereifte Antriebsräder mit Wasserfüllung (Bild 2); in Verbindung mit einem Handelsdüngerstreuer (Erzeugnis aus der VR Polen).

(Fortsetzung auf Seite 559)



Bild 1. Zetor 3011 mit niedrigem Schwerpunkt, mit angebaute Rotator

Bild 2. Zetor 3011 mit niedrigem Schwerpunkt, zwillingsbereifte, mit Wasserfüllung in den Hinterrädern



* Mechanisace zemedelstvi Prag