

# Der günstigste Luftdruck in Landmaschinenreifen

Von E. M. GUTJAR, Moskau<sup>1)</sup>

DK 62.001.5:678.155:63

Zugwiderstand, Bodendruck, Reifengröße, Schleppergewichte, das sind Fragen, die seit einiger Zeit von Wissenschaftlern und Konstrukteuren intensiv behandelt werden. Dabei ist das Bestreben erkennbar, die schädlichen Wirkungen des Bodendrucks durch Verminderung des Schleppergewichts zu neutralisieren, ohne das Leistungsvermögen der Schlepper abzuschwächen.

Wir weisen hierzu auf die Beiträge von Dipl.-Ing. Lugner: „Welche Schleppergewichte sind notwendig?“ in Heft 11 bzw. Heft 12 (1954) und Dipl.-Landw. M. Domsch: „Die Forderung des Ackerbodens an Schleppergewichte und Schlepperreifen“ in Heft 12 (1954) unserer Zeitschrift. Die nachfolgende Studie bitten wir als Ergänzung dieser Aufsätze aufzufassen.

Die Redaktion

Nach experimentellen und theoretischen Untersuchungen des WISChOM<sup>2)</sup> kann der Zugwiderstand einer Landmaschine mit gummibereiften Rädern durch folgende Formel dargestellt werden (1):

$$T = C_1 Q \sqrt[3]{\frac{p}{qD}} + C_2 \sqrt[3]{\frac{Q^4}{pD^2}} \quad (1)$$

Der erste Summand bestimmt die Größe der Kraft zur Verformung des Bodens durch den Reifen, der zweite die Kraft zur Verformung des Reifens.

Hierbei ist:

- $Q$  die vertikale Raddbelastung in kg;
- $D$  der Raddurchmesser in cm;
- $q$  die spezifische Bodenfestigkeit (der Koeffizient der räumlichen Verformung), in kg/cm<sup>3</sup> und
- $p$  der Reifendruck in kg/cm<sup>2</sup>.

Die konstanten Koeffizienten  $C_1$  und  $C_2$  hängen im wesentlichen von der Konstruktion und vom Material der Reifen ab. Ihre Durchschnittswerte betragen nach Angaben der WISChOM:

$$C_1 = 0,425 \quad \text{und} \quad C_2 = 0,065.$$

Beim Transport einer Landmaschine auf festem Boden (bei großem Wert  $q$ ) kann das erste Glied der Gleichung (1) vernachlässigt und die Zugkraft nach dem zweiten Glied berechnet werden. Es ist klar, daß man in diesem Falle den Reifendruck zur Verringerung der Zugkraft möglichst hoch wählt.

Wenn die Maschine über weichen Boden fährt (bei kleinem Wert  $q$ ), kann das zweite Glied der Gleichung (1) vernachlässigt und die Zugkraft nach dem ersten Glied berechnet werden. Dann ist es empfehlenswert, den Luftdruck möglichst niedrig zu halten.

Wie soll nun der Luftdruck beim Fahren auf mittelfestem Boden sein?

Durch Versuche kann diese Frage leicht beantwortet werden; der Zweck dieses Artikels ist jedoch, eine theoretische Methode zur Bestimmung des günstigsten Reifendrucks  $p$  anzugeben. Die Form der Gleichung (1) zeigt, daß bei  $p = 0$  der Zugwiderstand  $T$  unendlich groß wird; bei  $p = \infty$  ist der Widerstand  $T$  ebenfalls unendlich groß. Hieraus folgt, daß es einen Zwischenwert  $p_{opt}$  geben muß, bei dem die Kraft  $T$  einen Mindestwert erlangt, der dann auch der günstigste Reifendruck ist. Die Abhängigkeit des Zugwiderstandes vom Reifendruck ist im beigegebenen Diagramm dargestellt.

Die Bedingung für den geringsten Zugwiderstand ist

$$\frac{\partial T}{\partial p} = C_1 \frac{Q}{\sqrt[3]{qD}} \cdot \frac{1}{3} p^{-\frac{2}{3}} + C_2 \sqrt[3]{\frac{Q^4}{D^2}} \cdot \left(-\frac{1}{3} p^{-\frac{4}{3}}\right) = 0 \quad (2)$$

oder

$$C_1^3 \frac{Q^3}{qD} p^{-2} = C_2^3 \frac{Q^4}{D^2} = p^{-4} \quad (3)$$

Hieraus folgt:

$$p_{opt} = \sqrt[3]{\frac{C_1^3}{C_2^3}} \cdot \frac{Q}{D} q \quad (4)$$

Gleichung (4) zeigt, daß der Reifendruck bei Vergrößerung der Belastung erhöht und bei Vergrößerung des Raddurchmessers verringert werden soll. Festeren Böden soll auch ein stärkerer Druck entsprechen.

Bei  $Q = 500$  kg,  $D = 50$  cm und  $q = 10$  kg/cm<sup>3</sup> (was nach dem „Handbuch der sozialistischen Landwirtschaft für Ingenieure und Mechaniker“, Teil I, Selchosgis 1937, dem Durchschnittswert der spezifischen Bodenfestigkeit eines Roggenfeldes entspricht) (2) erhalten wir:

$$p_{opt} = \sqrt[3]{\frac{0,065^3}{0,425^3}} \cdot \frac{500}{50} \cdot 10 \approx 0,60 \text{ kg/cm}^2. \quad (5)$$

Bei einer Belastung von  $Q = 1500$  kg erhalten wir für das gleiche Rad und den gleichen Boden  $p_{opt} \approx 1$  kg/cm<sup>2</sup>. Die ermittelten Werte der günstigsten Reifendrücke kommen den in der Praxis angewandten nahe.

Wenn wir den Ausdruck für den günstigsten Druck (4) in die Gleichung (1) einsetzen, erhalten wir den Ausdruck für die geringste Zugkraft:

$$\begin{aligned} T_{min} &= C_1 Q \sqrt[3]{\frac{C_2^{3/2}}{C_1} \cdot \frac{Q^{1/2} q^{1/2}}{D^{1/2} q D}} + \\ &+ C_2 \sqrt[3]{\frac{Q^4}{\frac{C_2^{3/2}}{C_1} \cdot \frac{Q^{1/2} q^{1/2}}{D^{1/2}} \cdot D^2}} \\ &= C_1 \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^{1/2} Q \sqrt[3]{\frac{Q^{1/2}}{D^{1/2} q^{1/2}}} + \\ &+ C_2 \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{3/2} Q \sqrt[3]{\frac{Q^{1/2}}{D^{3/2} q^{1/2}}} \end{aligned} \quad (6)$$

oder

$$T_{min} = 2 \sqrt[6]{C_1 C_2} \cdot Q \sqrt[6]{\frac{Q}{D^3 q}} \quad (7)$$

Wie zu erwarten war, wächst der geringste Zugwiderstand mit der Belastung und mit der Verkleinerung des Raddurchmessers. Einem größeren Koeffizienten der Bodenfestigkeit entspricht ein geringerer Zugwiderstand.

Bei den gleichen Werten  $Q = 500$  kg,  $D = 50$  cm,  $q = 10$  kg/cm<sup>3</sup> und dem entsprechenden günstigsten Reifendruck  $p_{opt} = 0,60$  kg/cm<sup>2</sup> ist der geringste Zugwiderstand:

$$T_{min} = 2 \sqrt[6]{0,425 \cdot 0,065} \cdot 500 \sqrt[6]{\frac{500}{50^3 \cdot 10}} = 45,1 \text{ kg}. \quad (8)$$

Wenn man den Reifendruck über den günstigsten Druck erhöht, z. B.  $p = 2$  kg/cm<sup>2</sup> nimmt, dann wird die erforderliche Zugkraft nach der Gleichung (1) bestimmt.

Bei sonst gleichen Fahrbedingungen erhalten wir folgenden Wert:

$$\begin{aligned} T &= 0,425 \cdot 500 \sqrt[3]{\frac{2}{10 \cdot 50}} + \\ &+ 0,065 \sqrt[3]{\frac{500^4}{2 \cdot 50^2}} = 37,7 + 15,1 = 52,8 \text{ kg}. \end{aligned} \quad (9)$$

Diese Berechnungen zeigen, daß der Zugwiderstand in diesem Fall, bei richtiger Wahl des Reifendrucks um

<sup>1)</sup> Сельхозмашина (Landmaschinen), Moskau (1953) Nr. 12, S. 14 bis 16; Übersetzer: Slácher, Bearbeiter: Dipl.-Ing. W. Balkin.

<sup>2)</sup> Wissenschaftliches Institut der UdSSR für Landmaschinen.

$$\frac{T - T_{\min}}{T} \cdot 100 = \frac{52,8 - 45,1}{52,8} \cdot 100 = 14,6\%, \quad (10)$$

d. h. ungefähr 15% gesenkt werden kann.

Den erhaltenen Wert  $T_{\min}$  wollen wir mit dem Zugwiderstand einer Maschine mit eisenbereiften Rädern vergleichen. Wir verwenden die Formel von Gorjatschkin-Grandvoine:

$$T_{\text{Fe}} = 0,86 \sqrt[3]{\frac{Q^4}{q b D^2}}, \quad (11)$$

und erhalten bei gleichen Werten für Belastung, Raddurchmesser und Bodendichte sowie einer Reifenbreite von  $b = \frac{D}{10}$

$$T_{\text{Fe}} = 0,86 \sqrt[3]{\frac{500^4}{10 \cdot \frac{50^3}{10}}} = 68,4 \text{ kg}. \quad (12)$$

Die Verwendung von Gummibereifung verringert den Zugwiderstand also um

$$\frac{68,4 - 45,1}{68,4} \cdot 100 = 34\%. \quad (13)$$

Dieser errechnete Wert kommt den Versuchswerten nahe. Die Verwendung von Gummibereifung ist hinsichtlich der Zugkraft jedoch nicht immer vorteilhaft. Die mathematische Bedingung dafür ergibt sich aus folgender Überlegung:

Wenn eisenbereifte Räder günstiger sind, ist

$$T_{\text{Fe}} < T_{\min}$$

oder unter Verwendung der Gleichungen (7) und (11)

$$0,86 Q \sqrt[3]{\frac{Q}{q b D^2}} < 2 \sqrt{C_1 C_2} Q \sqrt[6]{\frac{Q}{D^3 q}}. \quad (14)$$

Wir drücken die Breite des eisernen Reifens in Teilen des Raddurchmessers aus:

$$b = \xi D$$

und erhalten dann

$$0,43 \sqrt[3]{\frac{Q}{q \xi D^3}} < \sqrt{C_1 C_2} \cdot \sqrt[6]{\frac{Q}{L^3 q}}. \quad (15)$$

Lösen wir diese Ungleichung nach  $\xi$  auf, so erhalten wir beim Einsetzen von Mittelwerten für  $C_1$  und  $C_2$ :

$$\xi > 17,4 \sqrt[6]{\frac{Q}{q D^3}}. \quad (16)$$

Ob ein eisenbereiftes Rad vorzuziehen ist, hängt also von seiner Reifenbreite ab.

Aus der Gleichung (16) folgt, daß eisenbereifte Räder bei großer Reifenbreite, geringer Belastung, großer Bodenfestigkeit und großem Raddurchmesser vorteilhaft sind. So ergibt sich z. B. bei  $Q = 100 \text{ kg}$ ,  $q = 10 \text{ kg/cm}^3$  und  $D = 50 \text{ cm}$

$$\xi > 17,4 \sqrt[6]{\frac{100}{10 \cdot 50^3}} = 0,156, \quad (17)$$

d. h. von einer Radreifenbreite von

$$b = \xi D = 0,156 \cdot 500 = 78 \text{ mm}$$

ab sind in diesem Fall gummibereifte Räder hinsichtlich des Zugwiderstandes eisenbereiften Rädern nicht mehr vorzuziehen.

#### Literatur

- [1] Omelianow, A. E.: Über die Verwendung von gummibereiften Rädern bei Landmaschinen. „Selchosmaschina“ (1948) Nr. 5.  
[2] Handbuch der sozialistischen Landwirtschaft für Ingenieure und Mechaniker, Teil I. Selchosgis (1937). AÜ 1871

## Messungen der Zugwiderstandskomponenten bei Landmaschinen und Geräten

Von I. K. KIRTBAJA, Moskau<sup>1)</sup>

DK 62.001.5:631.3

Die Widerstände, die bei der Bewegung von Landmaschinen und Geräten auftreten, setzen sich im allgemeinen Fall aus folgenden Komponenten zusammen:

1. Dem Rollwiderstand  $R_f$ , bestehend aus der Reibung in den Radlagern, der Reibung der Radreifen am Boden und der Formänderung des Bodens unter der Einwirkung der Belastung der Laufräder;
2. der Reibung  $R_F$  zwischen den Arbeitsflächen der Maschinen und dem zu bearbeitenden Stoff;
3. dem eigentlichen Formänderungswiderstand  $R_d$  des zu bearbeitenden Stoffes;
4. dem Widerstand  $R_\epsilon$ , der von den Trägheitskräften der Teilchen des bearbeiteten Stoffes ausgeübt wird;
5. dem Widerstand  $R_m$ , der durch die Reibung in den Getrieben der Maschinen entsteht.

Der Gesamtwiderstand, den die Landmaschinen und Geräte auf waagerechter Strecke ausüben, ist demnach

$$R_M = R_f + R_F + R_d + R_\epsilon + R_m. \quad (1)$$

Der Rollwiderstand  $R_f$  kann der Radbelastung gleichgesetzt werden. Wenn sich die Maschine mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegt, kommen aber außer den unter (1) genannten Einwirkungen noch Stöße von Bodenunebenheiten gegen die Räder, Schwankungen der Maschinenmassen und ungleichmäßige Bewegungen, die das Auftreten von Trägheitskräften zur Folge haben, hinzu. Dadurch entstehen neue, von der Geschwindigkeit abhängende Widerstände. Der Rollwiderstand von Landmaschinen wird daher in allgemeiner Form durch

folgende Gleichung ausgedrückt:

$$R_f = C_M \cos \alpha (f_b + f_v \cdot v^n). \quad (2)$$

Hierbei ist:

- $G_M \cos \alpha$  die von den Rädern senkrecht zur Bodenoberfläche ausgeübte Kraft;  
 $f_b$  und  $f_v$  vom Boden und von der Geschwindigkeit abhängende Koeffizienten;  
 $v$  die Fahrgeschwindigkeit der Maschine.

Für den Exponenten von  $v$  kann mit genügender Genauigkeit  $n = 2$  gesetzt werden.

Wenn unter dieser Voraussetzung für verschiedene Geschwindigkeiten von  $v_1$  und  $v_2$  bei Leerlauf experimentell die Zugwiderstände  $R_x$  ermittelt worden sind, kann der Wert des Koeffizienten  $f_v$  und nach ihm auch der Wert des Koeffizienten  $f_b$  bestimmt werden.

Die entsprechenden Abhängigkeiten haben folgende Form:

$$f_v = \frac{R_x v_2 - R_x v_1}{G_M (v_2^2 - v_1^2)} \quad (3)$$

und

$$f_b = \frac{R_x v_1 - G_M \cdot f_v \cdot v_1^2}{G_M} = \frac{R_x v_1}{G_M} - f_v v_1^2. \quad (4)$$

Hierbei sind

- $R_x v_1$  und  $R_x v_2$  die Zugwiderstände bei Leerlauf mit den entsprechenden Geschwindigkeiten.

Die Komponente  $R_f$  wurde nun in der Weise bestimmt, daß die Maschinen im Leerlauf über typische Feldoberflächen, ge-

<sup>1)</sup> Сельхозмашина (Landmaschinen), Moskau (1953) Nr. 11, S. 10 bis 14; Übersetzer: Dipl.-Ing. Balkin.