

Das Verhalten von Ackerschlepperreifen auf nachgiebigem Boden

Von **G. Sitkei**, Budapest

Mitteilung aus dem Institut für Landmaschinen der Technischen Hochschule München

Das Verhalten von Schlepperreifen auf nachgiebigem Boden, insbesondere hinsichtlich Rollwiderstand und Zugkraftübertragung, wird entscheidend von der vom Reifen verursachten Boden deformation beeinflusst. In der vorliegenden Arbeit werden Meßvorrichtungen und -methoden für die experimentelle Untersuchung der Reifeneindrückung und der Druckverteilung in der Berührungsfäche zwischen Reifen und Boden beschrieben und einige Ergebnisse mitgeteilt. Ferner werden für die Reifeneindrückung und Größe der Berührungsfäche auf nachgiebigem Boden aufgrund von dimensionsanalytischen Überlegungen dimensionslose Beziehungen abgeleitet. Schließlich werden Beziehungen zwischen dem Druck in der Berührungsfäche und der Einsinktiefe, zwischen der Größe der Berührungsfäche und der Tragfähigkeit der Reifen und zwischen dem Kraftschlußbeiwert und dem Reifendurchmesser aufgestellt.

1 Einleitung

Der landwirtschaftliche Schlepper bewegt sich hauptsächlich auf nachgiebigem Ackerboden, auf dem die Reifen erheblich einsinken können; Von dieser Einsinkung hängt die Größe der Berührungsfäche zwischen Reifen und Boden, die Reifeneindrückung, der Rollwiderstand und schließlich auch die Zugfähigkeit des Schleppers ab.

Die ständige Erhöhung der Nennleistung und des Eigengewichtes der in der Landwirtschaft eingesetzten Schlepper führt zwangsläufig zu einer entsprechenden Vergrößerung der Reifen. Für die Reifenauswahl muß man außer der Tragfähigkeit die Zusammenhänge zwischen den sonstigen Größen, wie Reifeneindrückung, Spurtiefe, Größe der Berührungsfäche, Belastung usw. sowie deren Einfluß auf die Zugfähigkeit des Schleppers kennen.

In dieser Arbeit wurde versucht, aufgrund von Ähnlichkeitsbetrachtungen allgemeingültige Zusammenhänge zu finden und die in den Gleichungen vorkommenden Konstanten experimentell zu bestimmen¹⁾.

2 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden in einer Bodenrinne des Instituts für Landmaschinen der Technischen Hochschule München durchgeführt. In **Bild 1** ist die Meßeinrichtung mit dem Versuchsreifen wiedergegeben. Das Rad wurde an einem Schwenkrahmen am Meßwagen der Bodenrinne montiert und mit Gewichten belastet. Zur Registrierung der Reifeneindrückung wurde ein Spezialgeber mit Längs- und Kreispotentiometer benutzt; im Schlauch ist ein Ventilgehäuse eingebaut, in dem ein Halter mit einem Abdichtungskopf sitzt. An dem Halter ist ein Längspotentiometer fest montiert und ein anderer drehbar gelagert. Die Längspotentiometer haben einen Meßweg von 75 mm mit unendlichem Auflösungsvermögen.

Zur Messung der Druckverteilung unter dem Rad in der Bodenrinne wurde eine kleine Dose mit 20 mm Durchmesser und 3 mm Dicke entwickelt, **Bild 2 und 3**. Der aktive Dehnungsmeßstreifen ist auf der dünnen Membran, der Kompensationsmeßstreifen auf der dicken Grundplatte aufgeklebt. Drei solche Dosen waren in der Oberfläche des Reifens in Querrichtung eingesetzt.

¹⁾ Die vorliegenden Untersuchungen wurden mit dankenswerter Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchgeführt.

Dr.-Ing. habil. György Sitkei ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Ungarischen Akademie der Wissenschaften und am Lehrstuhl für Landmaschinentechnik der Technischen Universität Budapest tätig. Er hat die vorliegenden Untersuchungen als Gastwissenschaftler am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Söhne) der Technischen Hochschule München durchgeführt.

Die Winkelstellung des Rades wurde mit Hilfe einer Segmentscheibe mit 10-Gradeinteilung durch elektrische Impulse registriert.

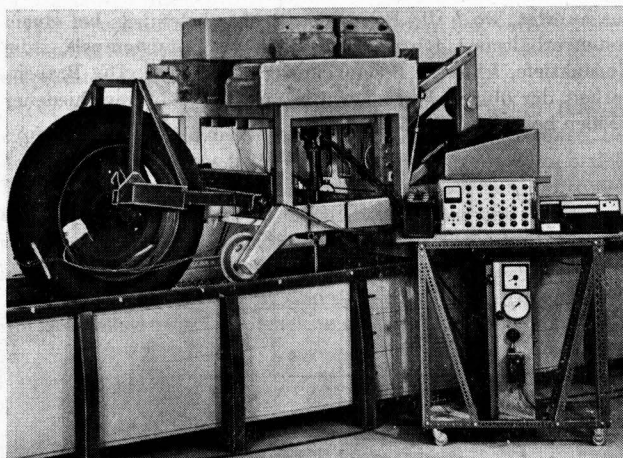


Bild 1. Die Gesamtansicht des Meßwagens der Bodenrinne mit dem untersuchten Rad.

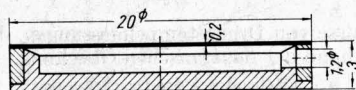


Bild 2. Kleine in der Oberfläche des Reifens eingebaute Druckmeßdosen für die Messung des Druckes in der Berührungsfäche zwischen Reifen und Boden.

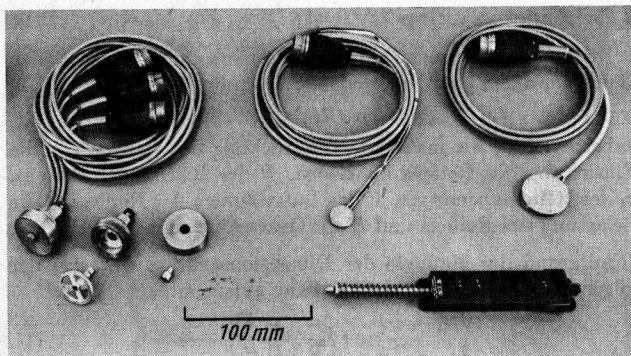


Bild 3. Lichtbild von den verwendeten Druck- und Weggebern.

Die Druckstempelversuche zur Kennzeichnung der Boden-tragfähigkeit wurden mit einem hydraulischen Druckstempelgerät mit Rund- und Rechteckstempel durchgeführt, **Bild 4**.

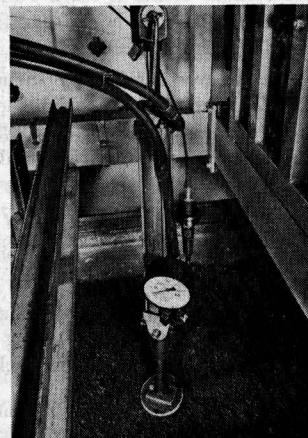


Bild 4. Hydraulisches Druckstempelmeßgerät zur Kennzeichnung des Bodenzustandes.

Zur Registrierung des Druckes diente eine Hottinger Druckmeßdose, während der Weg mit einem 10-Wendel-Potentiometer in Brückenschaltung registriert wurde. Zur gleichzeitigen Registrierung der einzelnen Vorgänge diente ein Oszillograph mit UV-Schreiber.

Der in der Bodenrinne befindliche Boden ist ein sandig toniger Lehm mit 15 bis 16% Feuchtegehalt. Der Boden war mit einer Fräse in der ganzen Tiefe bearbeitet und mit einem Rüttler verschiedenartig verdichtet worden. Zur Kennzeichnung des Bodenzustandes wurden Druckstempeldiagramme aufgenommen und nach der Saakjanschen Formel [1]:

$$p = k \left(\frac{z}{b} \right)^n$$

ausgewertet, wo b die Breite des Rechteckstempels bei einem Seitenverhältnis 1:4 bzw. den Radius des Rundstempels, z die Einsinktiefe, k und n Bodenkennwerte bedeuten. Die Brauchbarkeit der obigen Formel wurde mit Stempeln verschiedener Größen bestätigt, **Bild 5**.

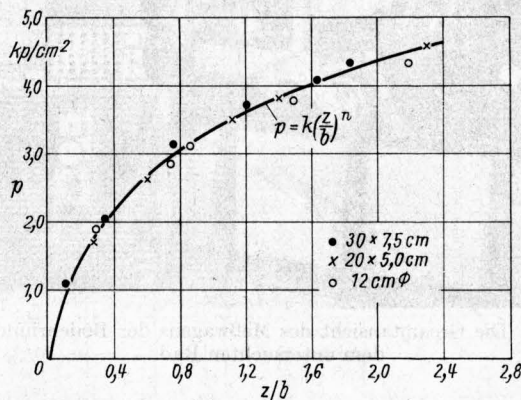


Bild 5. Ergebnisse von Druckstempelungen, dargestellt anhand der Saakjanschen Gleichung.

- p Flächendruck des Druckstempels
- z Einsinktiefe
- b Breite des Rechteckstempels bzw. Radius des Rundstempels
- k, n Bodenkenngrößen

3 Reifendeformation

Die maximale Eindrückung des Reifens auf weichem Boden hängt vor allem von den folgenden Einflußgrößen ab:

$$f_{\max} = f(z, R, p_i, V, Q, H),$$

dabei ist: f_{\max} die maximale Eindrückung des Reifens²⁾, z die Einsinkung des Reifens im Boden, R der Radius des Reifens, p_i der Reifeninnendruck, V das Luftvolumen des Reifens, Q die Belastung des Reifens und H die Querschnittshöhe des Reifens.

Aufgrund der Methode der Dimensionsanalyse läßt sich der folgende funktionelle Zusammenhang aufschreiben:

$$\frac{f_{\max}}{H} = f \left(\frac{z}{R}, \frac{p_i V}{Q H} \right) \quad (1)$$

Die Ergebnisse der Messungen zeigten, daß die Eindrückung des Reifens ziemlich stark von der Einsinkung in den Boden abhängt, **Bild 6**. Je höher die Einsinkung ist, um so kleiner wird die Reifeneindrückung.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse nach Gl. (1) ist in **Bild 7** gezeigt. Da die Eindrückung des Reifens bei $z/R = 0$ nicht Null ist, soll der Einfluß der Einsinkung in der Form $(1 + z/R)^{m_2}$ berücksichtigt werden, d. h.

$$\frac{f_{\max}}{H} = C \left(\frac{p_i V}{Q H} \right)^{m_1} \left(1 + \frac{z}{R} \right)^{m_2} \quad (2)$$

wobei $C = 0,71$ bzw. $0,84$ (ohne Stollen), $m_1 = -0,8$ und $m_2 = -6,7$ ist.

Gl. (2) stellt einen allgemeingültigen Zusammenhang für die Bestimmung der Eindrückung von Ackerschlepperreifen bei beliebiger Belastung, Innendruck und Einsinkung dar.

²⁾ Die maximale Eindrückung f_{\max} muß nicht wie die Reifeneinfederung f auf starrer Fahrbahn senkrecht unter der Achse sein.

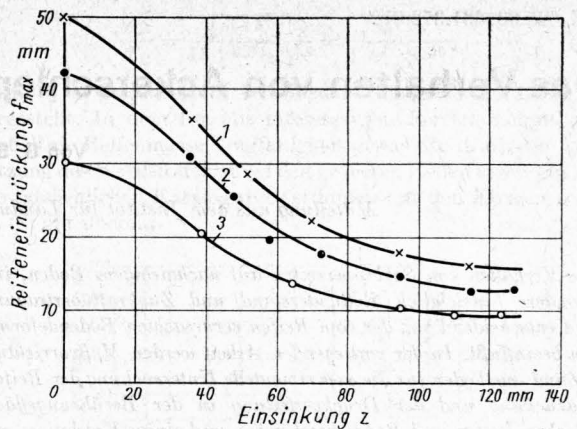


Bild 6. Reifeneindrückung in Abhängigkeit von der Einsinktiefe.

- Kurve 1: $Q = 850$ kp; $p_i = 0,8$ atü
- Kurve 2: $Q = 650$ kp; $p_i = 0,8$ atü
- Kurve 3: $Q = 650$ kp; $p_i = 1,2$ atü

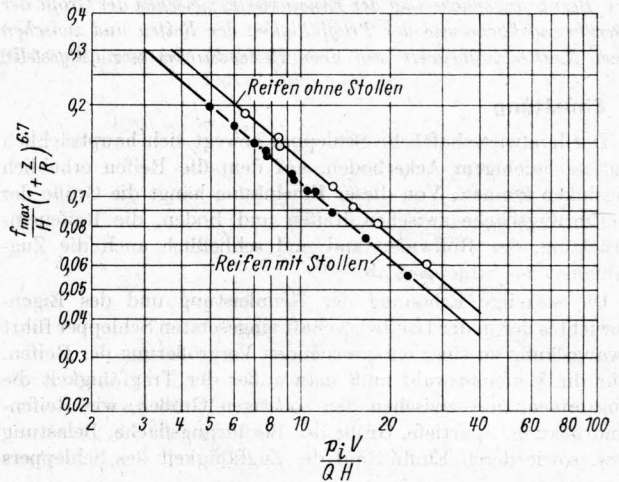


Bild 7. Dimensionslose Darstellung der Reifeneindrückung f_{\max} .

4 Größe der Berührungsfläche zwischen Reifen und nachgiebigem Boden

Die Berührungsfläche zwischen Reifen und Boden ist ein wichtiger Parameter zur Kennzeichnung der Zugfähigkeit. Je größer und länger die Berührungsfläche ist, um so größer ist die übertragbare Umfangskraft.

Verwendete Formelgrößen

b	cm	Breite des Rechteckstempels bzw. Radius des Rundstempels des hydraulischen Druckstempelgeräts
B	cm	Reifenbreite
$D = 2 R$	cm	Reifendurchmesser
F	cm ²	Berührungsfläche zwischen Reifen und Boden
f	cm	Eindrückung des Reifens in der Berührungsfläche
f_{\max}	cm	maximale Eindrückung des Reifens auf nachgiebigem Boden
H	cm	Querschnittshöhe des unverformten Reifens
j	cm	horizontale Bodendeformation
k, n	—	Bodenkenngrößen
$m_{1,2}$	—	Exponenten der Gl. (2)
p	kp/cm ²	Flächendruck zwischen Reifen und Boden
$p_m = \frac{F}{Q}$	kp/cm ²	mittlerer Flächendruck zwischen Reifen und Boden
p_i	kp/cm ²	Reifeninnendruck
Q	kp	Belastung des Reifens
R	cm	Radius des Reifens
V	dm ³	Luftvolumen des Reifens
z	cm	Einsinkung des Reifens (bzw. des Druckstempels) in den Boden
ρ	—	Rollwiderstandsbeiwert der Reifen
σ	kp/cm ²	Normalspannung in der Berührungsfläche
τ	kp/cm ²	Tangentialspannung in der Berührungsfläche

Für die Bestimmung der Berührungsfläche F kann — ähnlich wie Gl. (1) — ein dimensionsloser Zusammenhang aufgestellt werden:

$$\frac{F}{DB} = f\left(\frac{p_1 V}{QH}, \frac{z}{D}\right) \quad (3),$$

wobei D der Reifendurchmesser und B die Reifenbreite bedeuten.

Aufgrund der Meßergebnisse ist Gl. (3) für verschiedene relative Einsinkungen z/D in **Bild 8** dargestellt. Wie man sieht, hat die relative Einsinkung des Reifens einen großen Einfluß auf die relative Berührungsfläche. Der Einfluß des Innendruckes und der Belastung durch die Zahl $p_1 V/QH$ nimmt mit der Erhöhung der Einsinkung bedeutend ab. Wenn also die relative

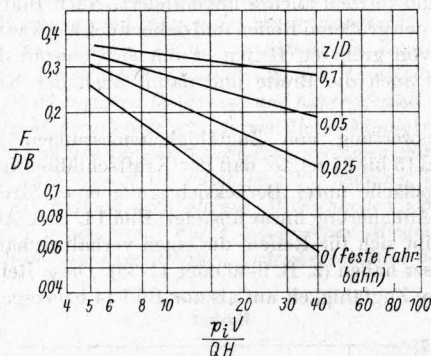


Bild 8. Dimensionslose Darstellung der Größe der Berührungsfläche F von Reifen (ohne Stollen) bei verschiedener relativer Einsinkung z/D .

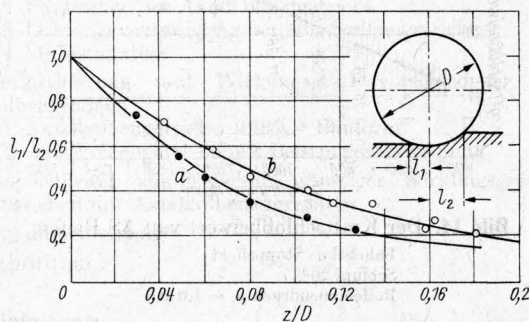


Bild 9. Änderung des vor und hinter der Radachse liegenden Anteils der Berührungsfläche zwischen Reifen und Boden in Abhängigkeit von der relativen Einsinkung z/D .

$$p_1 = 0,9 \text{ atü}$$

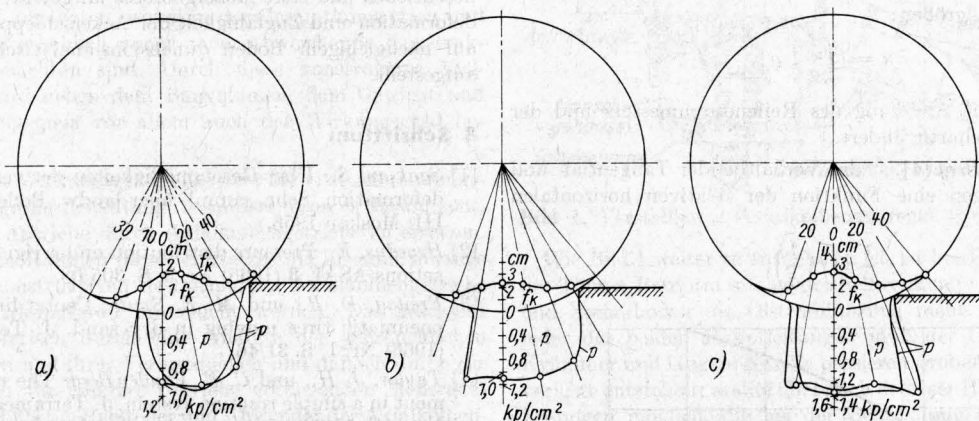


Bild 10. Druckverteilung p unter einem Reifen (AS 11-28) und Eindrückung f des Reifens auf sandig tonigem Lehm.

Bodenzustand	Radbelastung Q kp	Reifen- innendruck p_1 atü	Relative Einsinkung z/D
a lockerer Boden	650	1,2	0,08
b verdichteter Boden	850	0,8	0,058
c stark verdichteter Boden	650	0,8	0,03

Einsinkung z/D groß ist, verursacht die Verringerung des Innendruckes keine wesentliche Änderung in der Größe der Berührungsfläche.

Mit der Einsinkung des Reifens ändert sich auch das Verhältnis des vor und hinter der Achse liegenden Anteils der Berührungsfläche. Die Auswertung der Meßergebnisse ist in **Bild 9** dargestellt, wobei l_1/l_2 in Abhängigkeit von der relativen Einsinkung z/D aufgetragen ist (Kurve a). Die Auswertung der Versuchsergebnisse von *Hegedus* [2] und *Freitag* [3] für Sandboden zeigt einen ähnlichen Verlauf (Kurve b), die Werte liegen jedoch etwas höher.

5 Druckverteilung unter dem Reifen

Die Druckverteilungsmessungen wurden bei verschiedenen Bodendichten durchgeführt und dabei auch Druckstempel-diagramme aufgenommen.

Der typische Verlauf des Flächendrucks p ist in **Bild 10** zugleich mit der Eindrückung f_k des Reifens eingezeichnet. Bei dem in der Bodenrinne befindlichen sandig tonigen Lehm, in dem keine größeren horizontalen Bodendeformationen auftreten, ist die Druckverteilung ziemlich gleichmäßig und zeigt kein ausgeprägtes Maximum, insbesondere, wenn die Tragfähigkeit größer und die Einsinkung kleiner war.

Aus der Reifeneinsinkung und dem zugehörigen Druck wurde die Beziehung zwischen Druck und Einsinkung für den Reifen

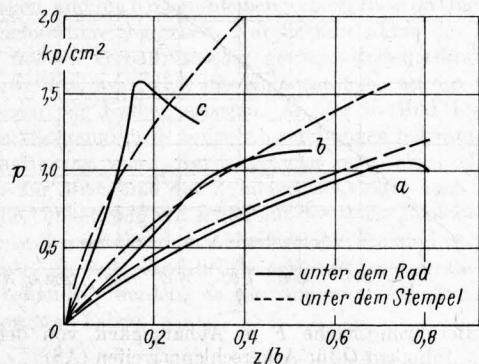


Bild 11. Flächendruck p in der Berührungsfläche des Reifens und des Druckstempels in Abhängigkeit von der (relativen) Einsinkung.

- a lockerer Boden
- b verdichteter Boden
- c stark verdichteter Boden

ermittelt und zugleich mit dem Druckstempeldiagramm in **Bild 11** dargestellt. Um die beiden Druck-Einsinkung-Kurven vergleichen zu können, wurde als Abszisse z/b gewählt, wobei b bei Stempeln den Radius oder die Breite des Rechteckstempels mit einem Seitenverhältnis von 4:1 und bei Reifen die halbe Spurbreite bedeutet.

Die Druck-Einsinkung-Kurve des Reifens verläuft im allgemeinen unterhalb der Druckstempel-Kurve. Bei verdichtetem Bodenzustand gibt es eine Zone (etwa um 20 Grad), wo der Druck etwas größer ist, als es aus der Druckstempel-Kurve

folgt. Diese Erscheinung kann so erklärt werden, daß der Boden erst in horizontaler Richtung zusätzlich verdichtet wird, wodurch sich seine Tragfähigkeit etwas erhöht. Dann sinkt diese Tragfähigkeit unter Wirkung von horizontalen Kräften. Bei genügend lockerem Boden wird diese Erscheinung nicht beobachtet.

6 Zugfähigkeit der Reifen

Der wichtigste Parameter der Reifen ist die Zugfähigkeit. Die Zugfähigkeit eines Reifens bei der Nennbelastung und bei einem bestimmten Schlupf hängt von Reifendurchmesser und -breite ab. Bei mehr oder weniger ähnlichen Reifen können die Variablen Durchmesser und Breite durch die Berührungsfläche ersetzt werden.

Bild 12 zeigt den Zusammenhang zwischen Berührungsfläche und Tragfähigkeit für Ackerschlepperreifen (AS) auf Stoppelfeld bei $z/D = 0,025$ ($F/D \cdot B = 0,235$). Die einzelnen Punkte liegen entlang einer Kurve, ausgenommen einige Reifen mit größerem Durchmesser, z. B. AS 11-38, die bei der gegebenen Tragfähigkeit etwas größere Berührungsfläche haben.

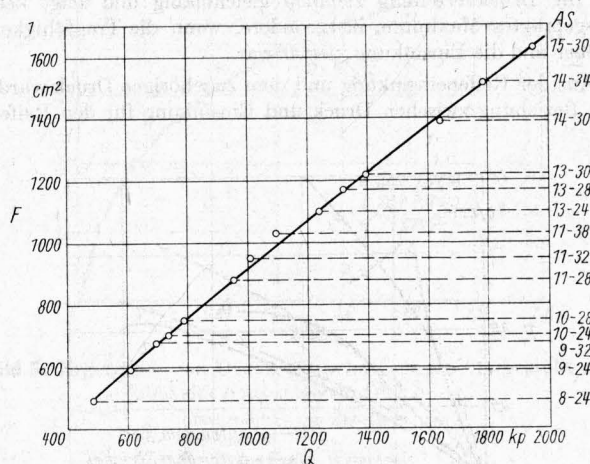


Bild 12. Berührungsfläche F in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit Q für Ackerschlepperreifen (AS).

$$p_1 = 1,0 \text{ atü}; z/D = 0,025$$

Der mittlere Druck in der Berührungsfläche (definiert als $p_m = Q/F$) für die einzelnen Reifen nimmt in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit etwas zu, wie es aus **Bild 13** ersichtlich ist.

Der Kraftschlußbeiwert eines Reifens ist die Funktion der folgenden Einflußgrößen:

$$\kappa = f\left(\frac{\tau}{\sigma}, \varrho\right),$$

wobei sich κ mit Änderung des Reifendurchmessers und der Breite nicht gleichartig ändert.

Nach *VandenBerg* [4] ist das Verhältnis der Tangential- und Normalspannungen eine Funktion der relativen horizontalen Deformation:

$$\frac{\tau}{\sigma} = f\left(\frac{j}{\sigma}\right),$$

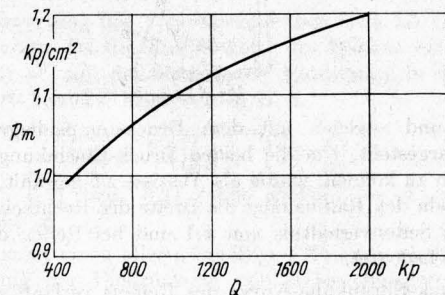


Bild 13. Der mittlere Druck p_m in der Berührungsfläche von AS-Reifen in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit.

$$p_1 = 1,0 \text{ atü}$$

während der Rollwiderstand ϱ in erster Annäherung von der relativen Einsinkung abhängt:

$$\varrho = f\left(\frac{z}{D}\right),$$

d. h.

$$\kappa = f\left[\frac{\tau}{\sigma}\left(\frac{j}{\sigma}\right), \varrho\left(\frac{z}{D}\right)\right].$$

Bei einer Vergrößerung des Reifendurchmessers nimmt die horizontale Bodendeformation j bei gleichbleibendem Schlupf zu, während die relative Einsinkung abnimmt. Demzufolge nimmt auch der Kraftschlußbeiwert eindeutig zu. Bei einer Vergrößerung der Reifenbreite und bei konstantem σ bleibt j/σ und z/D und folglich auch κ unverändert. Nach **Bild 13** nimmt aber σ bei den größeren Reifen und daher auch κ etwas zu. Bei Anwendung von größeren Reifen erhöht sich sowohl der Durchmesser als auch die Breite und damit auch der Kraftschlußbeiwert.

Die Auswertung von Zugfähigkeitsmessungen auf einem Stoppelfeld [5 bis 8] zeigte, daß der Kraftschlußbeiwert mit der Berührungsfläche unter Berücksichtigung eines Streubereiches mit guter Annäherung linear ansteigt, **Bild 14**. Eine Abweichung davon ergibt sich für Reifen, die einen verhältnismäßig großen Durchmesser haben (z. B. 9-40 oder 11-38). Diese Reifen weisen eine bessere Zugfähigkeit auf als aus **Bild 14** hervorgeht.

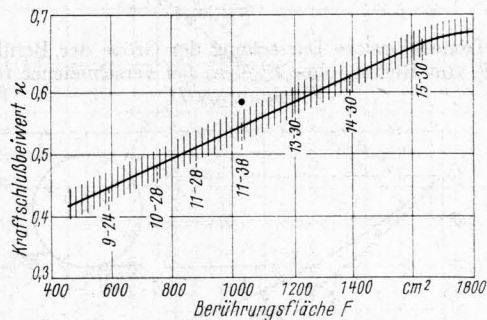


Bild 14. Der Kraftschlußbeiwert von AS-Reifen.

Fahrbahn: Stoppelfeld
Schlupf 20%
Reifeninnendruck $p_1 = 1,0$ atü

7 Zusammenfassung

Es werden Meßelemente zur Messung der Druckverteilung in der Berührungsfläche zwischen Reifen und nachgiebigem Boden beschrieben und erste Meßergebnisse mitgeteilt. Für die Reifendeformation und Zugfähigkeit der Ackerschlepperreifen werden auf nachgiebigem Boden dimensionsanalytische Beziehungen aufgestellt.

8 Schrifttum

- [1] *Saakjan, S.*: Über Gesetzmäßigkeiten der vertikalen Boden-deformation. Schr.-samml. über landw. Bodenmechanik Bd. III. Moskau 1956.
- [2] *Hegedus, E.*: Pressure distribution under rigid wheels. Transactions ASAE **8** (1965) Nr. 3, S. 305/08.
- [3] *Freitag, D. R., und M. E. Smith*: Center-line deflection of pneumatic tires moving in dry sand. J. Terramechanics **3** (1966) Nr. 1, S. 31/46.
- [4] *Taylor, J. H., und C. E. VandenBerg*: The role of displacement in a simple traction system. J. Terramechanics **3** (1966) Nr. 1, S. 47/62.
- [5] Die Zugfähigkeit von Radschleppern. Ber. NATI Nr. 130. Moskau 1961.
- [6] *Söhne, W.*: Das mechanische Verhalten des Ackerbodens bei Belastungen, unter rollenden Rädern sowie bei der Bodenbearbeitung. Grndl. Landtechn. Heft 1 (1951) S. 87/94.
- [7] *Söhne, W.*: Die Kraftübertragung zwischen Schlepperreifen und Ackerboden. Grndl. Landtechn. Heft 3 (1952) S. 75/87.
- [8] *Bock, G.*: Beobachtungen bei Feldversuchen über die Zugfähigkeit von Schleppern. Grndl. Landtechn. Heft 5 (1953) S. 42/48.