

# Zusammenhang zwischen Kontaktfläche und Pneuinnendruck

Michael GYSI, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, (FAT), CH-8356 Tänikon  
 Fred GRUNDER, Schweizerische Fachhochschule für Landwirtschaft (FHL), CH-3052 Zollikofen  
 Auskünfte: Michael Gysi, e-mail: michael.gysi@fat.admin.ch, Fax: +41 52 365 11 90, Tel. +41 52 368 31 31

**Die Kontaktfläche Pneu/Untergrund wurde bei sechs verschiedenen Reifen in Abhängigkeit des Reifeninnendruckes bestimmt. Bei allen Reifen liess sich eine Zunahme der Kontaktfläche bei abnehmendem Pneuinnendruck feststellen. Bei welchem Pneuinnendruck die Kontaktfläche am meisten zunimmt, ist sehr unterschiedlich. Mit Hilfe einer multiplen Regression wurde eine neue Gleichung errechnet, um die Kontaktfläche aufgrund der Pneuweite, des Pseudurchmessers und des Pneuinnendruckes zu berechnen.**

In der Landwirtschaft werden zunehmend schwere Erntemaschinen eingesetzt. Dies kann bei ungünstigen, feuchten Bodenverhältnissen zu Verdichtungen in Ober- und Unterboden führen (Semmel 1993), was langfristig den Ertrag negativ beeinflussen kann. Das Ausmass von Verdichtungen wird durch verschiedene Bodenparameter zum Befahrungszeitpunkt, die Radlast, den Kontaktflächendruck und die Überrollhäufigkeit bestimmt. Welcher Faktor dabei die wichtigste Rolle spielt, ist umstritten. Eine einfache und billige Methode, um den Kontaktflächendruck zu senken, besteht darin, den Pneuinnendruck zu reduzieren und damit die Kontaktfläche Pneu/Boden zu vergrössern (Saunier 1995).

## Ziel der Arbeit

Mit Hilfe einer multiplen Regression soll eine neue Formel für die Kontaktfläche in Abhängigkeit von Pneuweite, -durchmesser und -innendruck errechnet und mit einer bereits bestehenden Formel verglichen werden. Dazu wählten wir sechs Radialreifen aus. Die Methode der Kontaktflächenmessung musste verfeinert und angepasst werden. Im Sandbeet erhoben wir die Bodendrucke mit Bollingsonden (Bolling 1987).

## Wahl des Messverfahrens

Um Kontaktflächen zu messen, sind heute verschiedene Verfahren bekannt:

- Abdruck in Kunststoff (Stemex)
- Abdruck in Gips
- Abdruck in Ackerboden
- Abdruck in Sand

Das gewählte Verfahren soll der Befahrung von Feldeböden möglichst nahe kom-

men, standardisiert und wiederholbar sein. Sand ist äusserst homogen, leicht bearbeitbar, unelastisch und billig. Er kann mehrmals befahren werden und Fahrspuren lassen sich ohne grösseren Aufwand beseitigen.

Um den Abdruck beziehungsweise die Kontaktfläche von der umliegenden Sandoberfläche abzugrenzen, wählten wir Kalk als Kontrastmittel. Der weisse Kalk wurde rund um den Reifen mit einer Sprühpistole auf den Sand aufgetragen. Auf dem dunklen Sand ergab dies einen optischen Kontrast. Die Kontaktfläche lässt sich mit einer Digitalkamera festhalten. Um die Varianz beziehungsweise die Standardabweichung abschätzen zu können, wiederholten wir jede Messung dreimal. Pro Reifen wurden im Normalfall fünf verschiedene Reifeninnendrucke eingestellt und davon die Kontaktfläche bestimmt. Die Auswahl der Reifeninnendrucke ergab sich aus der Radlast, dem maximalen Reifeninnendruck und der

Tragfähigkeitsgrenze des Pneus. Die Radlast wurde von einer Druckstufe zur anderen nicht verändert. Da die Reifen an verschiedenen Fahrzeugen montiert sind, variiert die Radlast von Reifen zu Reifen stark.

## Wahl der Reifen

In der Landwirtschaft kommen heute zunehmend Radialreifen zum Einsatz. Aus diesem Grund wurden ausschliesslich Radialreifen untersucht. Die Dimensionen der untersuchten Reifen sind aus Tabelle 1 ersichtlich.

Bei den Traktoren Bühler und Case sind relativ breite und tragfähige Reifen aufgezogen, deshalb erhöhten wir die Radlast mit Hilfe eines Betongewichtes.

An den Traktoren Hürlimann und Fiat erfolgten keine Gewichtveränderungen, da diese mit Pflegereifen ausgerüstet sind und somit im Praxiseinsatz auch keine grossen Radlasten zu tragen haben.

Der Mähdrescher wurde mit zwei verschiedenen Bereifungen untersucht (800/65 R 32, 24,5 R 32). Das Eigengewicht des Mähdreschers blieb unverändert. Um annähernd reale Werte zu erreichen, fanden die Messungen mit vorgehängtem Schneidewerk statt.

**Tab. 1. Übersicht über die Reifen, die verwendeten Fahrzeuge, die Radlasten und die analysierten Druckstufen**

| Verwendetes Fahrzeug               | Reifenhersteller und Reifendimension | Radlast kg | Druckstufen bar            | Charakterisierung des Reifens                         |
|------------------------------------|--------------------------------------|------------|----------------------------|---|
| Bühler 6135 Allrad                 | Kléber Super 50 16,9 R 38            | 3000       | 1,0/1,2/1,4<br>1,6/1,8     | Ackerreifen für schwere Traktoren                     |
| Hürlimann 488T Allrad              | Continental AC 90 C 11.2 R 42        | 950        | 1,0/1,2/1,4<br>1,6/1,8     | Pflegereifen, auch als Doppelrad einsetzbar           |
| Fiat 50-66 Allrad                  | Kléber Super 3 9,5 R 36              | 675        | 1,0/1,2/1,4<br>1,6/1,8     | Pflegereifen, auch als Doppelrad einsetzbar           |
| Case Maxxum 5140 Allrad            | Kléber Super 9 18,4 R 38             | 2620       | 0,8/1,0/1,2<br>1,4/1,6/1,8 | Ackerreifen für schwere Ackerarbeiten                 |
| Mähdrescher John Deere Hill Master | Good Year 800/65 R 32                | 6020       | 1,1/1,3/1,5<br>1,7/1,9     | Niederquerschnitt Breitreifen für Grosserntemaschinen |
| Mähdrescher John Deere Hill Master | Good Year 24,5 R 32                  | 6020       | 1,1/1,3/1,5<br>1,7/1,9     | Reifen für Grosserntemaschinen oder Traktoren         |

## Sandbeet und Bollingsonden

Die Messungen fanden in einem Sandbeet statt. Die Konstruktion des Sandbeetes ist aus Abbildung 1 ersichtlich. In den Kasten füllten wir 5 cm Sand ein, dann wurden die acht Bollingsonden eingelegt und mit 10 cm Sand überschüttet. Die Bollingsonden geben Aufschluss über die Druckverteilung im Boden unter einem Reifen. Eine Bollingsonde besteht aus einem Silikon-schlauch, einem Kunststoffrohr, einem Manometer und einer Spritze, um den Vordruck einzustellen. Der im Boden eingesetzte Silikon-schlauch überträgt den Bodendruck durch das wassergefüllte Kunststoffrohr auf das Manometer (Abb. 2). Vor Messbeginn muss der Silikon-schlauch mit einer Vorspannung versehen werden, um den Kontakt mit dem Boden zu garantieren.

Um eine gleichbleibende Feuchtigkeit des Sandes zu garantieren, lockerten wir den Sand vor der Befahrung auf, besprühten ihn mit Wasser und verdichteten ihn leicht vor.

## Markieren der Kontaktfläche

Die Kontaktfläche des Reifens auf dem Sand markierten wir mit Kalk. Durch das Aufbringen des Kalkes mit Hilfe einer Sprüh-pistole dringt der Kalk auch in kleine Ritzen und Hohlräume ein und markiert somit die wirklich unbelastete Fläche. Die markierte Kontaktfläche wurde mit einer Digitalkamera fotografiert und mit Hilfe bildanalytischer Methoden bestimmt (siehe Titelbild).

## Einfederung und Ausbuchtung der Reifen

Nebst der Kontaktfläche und dem Bollingsondendruck erhoben wir die Einfederung des Reifens. Die Einfederung ist die vertikale Distanz zwischen Felgenhorn und Boden. Die Einfederung gibt Aufschluss über die Flexibilität des Reifens bei abnehmendem Pneuinnendruck.

## Kontaktfläche und Einfederung

Bei allen Reifen hat die Kontaktfläche bei abnehmendem Pneuinnendruck zugenommen. Allerdings war die Grösse der Zunahme gesamthaft und in den einzelnen Druckstufen sehr unterschiedlich. So hat

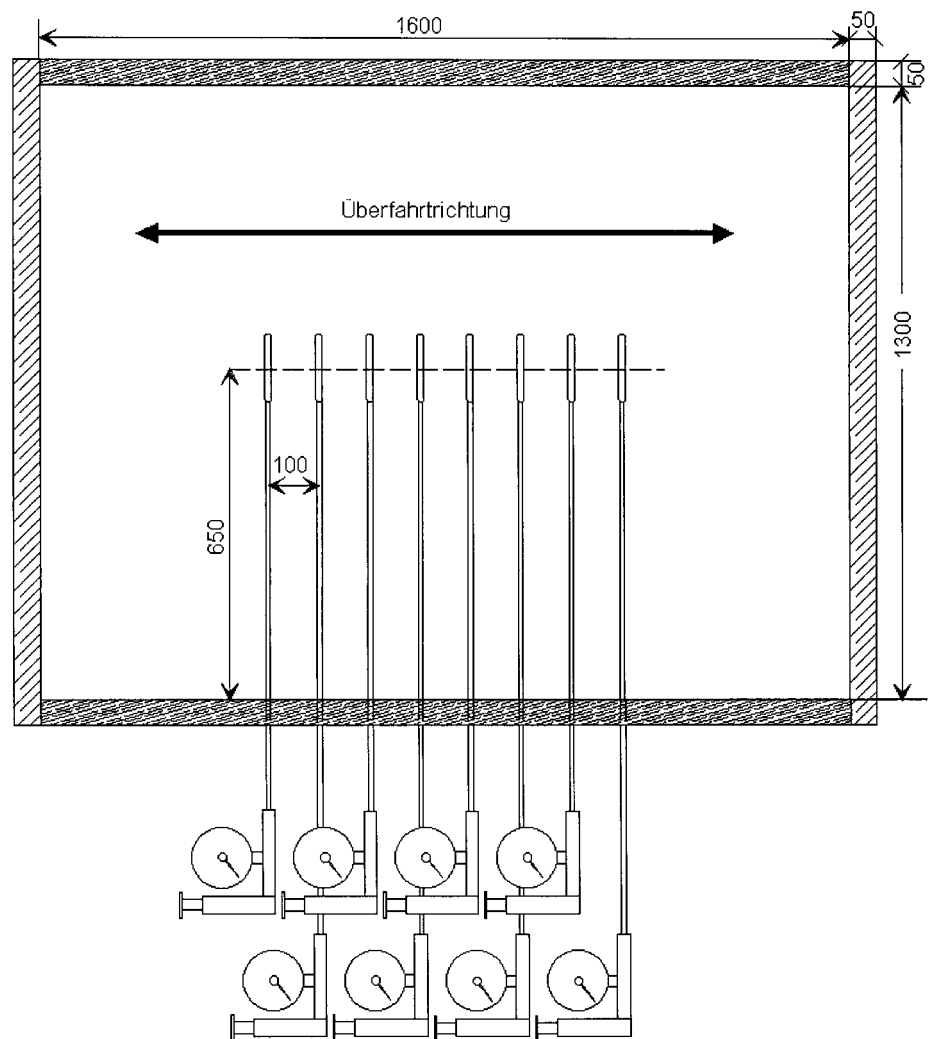


Abb. 1. Schematische Darstellung des Sandkastens mit Bollingsonden. Masse in mm.

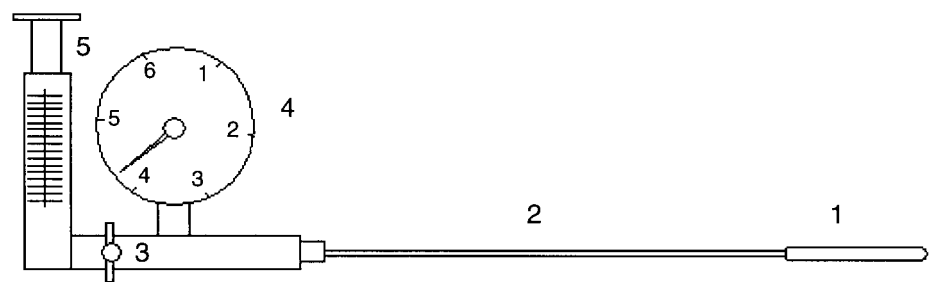


Abb. 2. Schematische Darstellung einer Bollingsonde: 1 Silikon-schlauch, 2 Kunststoffrohr, 3 Absperrhahn, 4 Manometer, 5 Vorspannspritze.

sich beim 16,9 R 38 die Kontaktfläche nur gerade um 20 % erhöht, während beim 800/65 R 32 die Kontaktfläche um 65 % zugenommen hat. Die grösste Zunahme der Kontaktfläche findet beim Pneu mit der Dimension 16.9 R 38 bei der Absenkung des Pneuinnendruckes von 1,6 auf 1,4 bar statt. Beim Pneu der Dimension 800/65 R 32 nimmt die Kontaktfläche zwischen 1,9 und 1,7 bar am meisten zu (Abb. 3 und Abb. 4). Eine Zusammenfassung der Resultate ist in Tabelle 2 und 3 gegeben. Eine generelle Aussage über die Zunahme der Kontaktfläche und damit

einer Abnahme des Kontaktflächendruckes unter dem Pneu ist nicht möglich. Weder Radlast noch Durchmesser oder Breite des Pneus scheinen die Grösse der prozentualen Zunahme der Kontaktfläche zu beeinflussen. Auch verzeichnen die einzelnen Pneus die maximale Zunahme in der Kontaktfläche bei unterschiedlichen Druckstufen. So nimmt die Kontaktfläche des Mährescherpneus 800/65 R 32 bei der Druckabsenkung von 1,9 auf 1,7 bar um 30 % zu, währenddem der Traktorpneu 18,4 R 38 seine grösste Zunahme (16 %) der Kontaktfläche bei der Druck-

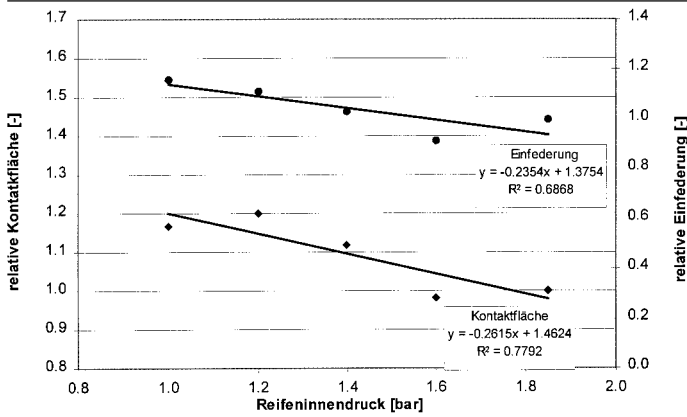


Abb. 3. Zunahmen der Kontaktflächen und Einfederung in Prozent der Kontaktfläche beziehungsweise Einfederung bei höchstem Pneuinnendruck des Pneus mit der Dimension 16.9 R 38.

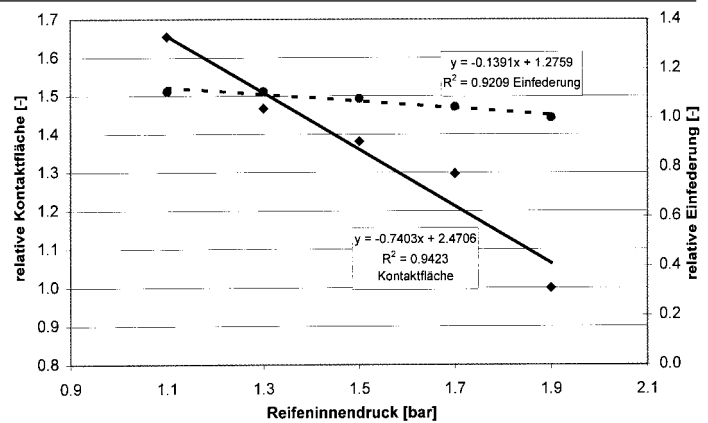


Abb. 4. Zunahmen der Kontaktflächen und Einfederung in Prozent der Kontaktfläche beziehungsweise Einfederung bei höchstem Pneuinnendruck des Pneus mit der Dimension 800/65 R 32.

absenkung von 1,0 auf 0,8 bar hat. Ob dieser Pneuinnendruck in der Praxis realisiert werden kann, hängt vor allem von der Tragfähigkeit bei diesem Pneuinnendruck und damit von der Radlast ab. Erstaunlich ist vor allem, dass die maximale Zunahme der Einfederung nicht bei derselben Druckstufe erfolgt wie die maximale Zunahme der Kontaktfläche. Das heisst, dass aus der Zunahme der Einfederung nicht auf die Zunahme der Kontaktfläche geschlossen werden kann.

## Bodendruck

Der in 10 cm Tiefe des Sandbeetes gemessene Bodendruck nimmt im Allgemeinen mit abnehmendem Pneuinnendruck ab. Allerdings spielt die Stollenlage eine zentrale Rolle und kann den Effekt des Pneuinnendruckes überdecken (Abb. 5). Unter der Mitte des Pneus, bei Sonde 4 oder 5 tritt im Normalfall die Druckspitze auf. Beim Reifen der Dimension 18.4 R 38 zeigt sich die Druckspitze bei der zweiten Sonde. Die ist durch die Stollenlage bedingt. Der Mittelwert über alle acht Sonden jedoch zeigt eine Abnahme mit abnehmendem Pneuinnendruck (Abb. 6). Dass sich die Zunahme der Kontaktfläche auch auf den Druck auswirkt, der auf den Boden auftritt, konnte somit gezeigt werden.

## Voraussage der Kontaktfläche

Mit Hilfe einer Regression wurde eine Formel berechnet, um die Kontaktfläche aufgrund von Pneubreite, Pnuedurchmesser und Pneuinnendruck vorauszusagen. In der folgenden Formel steht KF [cm<sup>2</sup>] für Kontaktfläche, BR [cm] für die Pneubreite, DU [cm] für den Pnuedurchmesser und p [bar] für Druck.

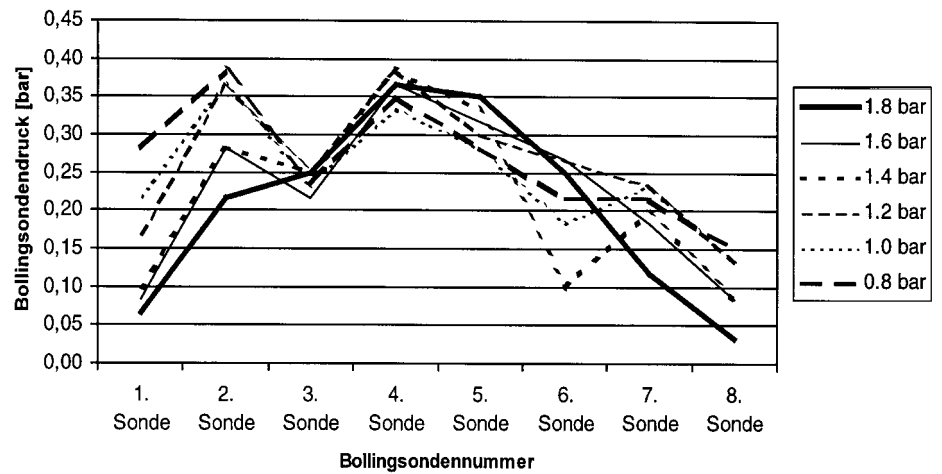


Abb. 5. Bodendruck, gemessen mit Bollingsonden in 10 cm Tiefe, bei sechs unterschiedlichen Pneuinnendruckten. Verwendet wurde der Pneu der Dimension 18.4 R 38 bei einer Radlast von 2620 kg.

Tab. 2. Gesamte Zunahme der Kontaktfläche (KF), Druckstufe, bei welcher die Kontaktfläche am meisten zugenommen hat (maximale Zunahme) und durchschnittliche Zunahme der Kontaktfläche bei abnehmendem Pneuinnendruck

| Reifen      | Radlast<br>kg | Gesamte Zunahme der KF<br>% | Maximale Zunahme der KF<br>bar | Ø Steigung von KF/Druck<br>cm <sup>2</sup> /bar |
|-------------|---------------|-----------------------------|--------------------------------|---|
| 16,9 R 38   | 3000          | 15                          | 1,6 fi 1,4 (+16 %)             | 0,2615  |
| 11,2 R 42   | 950           | 42                          | 1,6 fi 1,4 (+30 %)             | 0,6073  |
| 9,5 R 36    | 675           | 22                          | 1,4 fi 1,2 (+14 %)             | 0,6958  |
| 18,4 R 38   | 2620          | 52                          | 1,0 fi 0,8 (+16 %)             | 0,5233  |
| 800/65 R 32 | 6020          | 65                          | 1,9 fi 1,7 (+30 %)             | 0,7403  |
| 24,5 R 32   | 6020          | 41                          | 1,3 fi 1,1 (+14 %)             | 0,4926  |

Tab. 3. Gesamte Zunahme der Einfederung, Druckstufe, bei welcher die Einfederung am meisten zugenommen hat (maximale Zunahme) und durchschnittliche Zunahme der Einfederung bei abnehmendem Pneuinnendruck

| Reifen      | Radlast<br>kg | Gesamte Zunahme der Einfederung<br>% | Maximale Zunahme der Einfederung<br>bar | Ø Steigung der Eintauchung/Druck<br>cm/bar |
|-------------|---------------|--------------------------------------|---|--|
| 16,9 R 38   | 3000          | 16                                   | 1,6 ⚡ 1,4                               | 0,2354                                     |
| 11,2 R 42   | 950           | 6                                    | linear                                  | 0,0757                                     |
| 9,5 R 36    | 675           | 8                                    | linear                                  | 0,0842                                     |
| 18,4 R 38   | 2620          | 24                                   | 1,8 ⚡ 1,6                               | 0,2149                                     |
| 800/65 R 32 | 6020          | 11                                   | linear                                  | 0,1391                                     |
| 24,5 R 32   | 6020          | 18                                   | 1,9 ⚡ 1,7                               | 0,2180                                     |

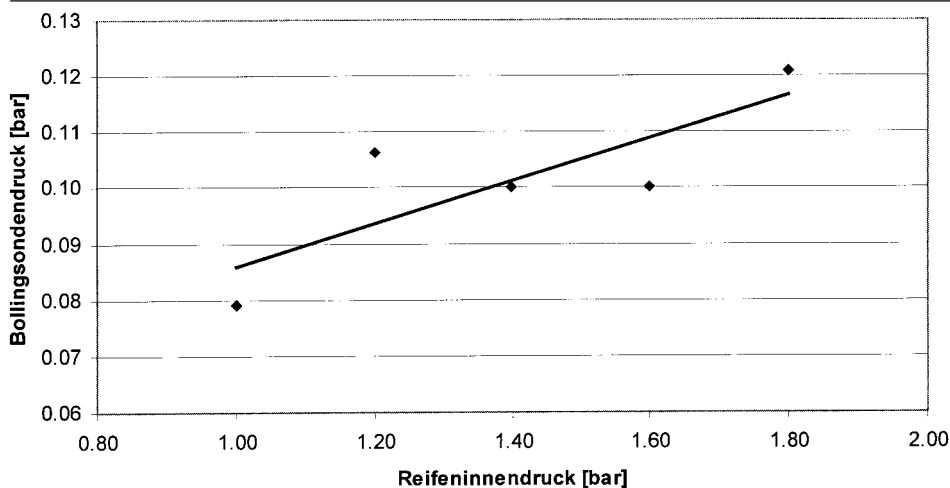


Abb. 6. Mittelwerte des Bodendruckes in Abhängigkeit des Pneuinnendruckes. Dimension: 9.5 R 36, Radlast: 675 kg.

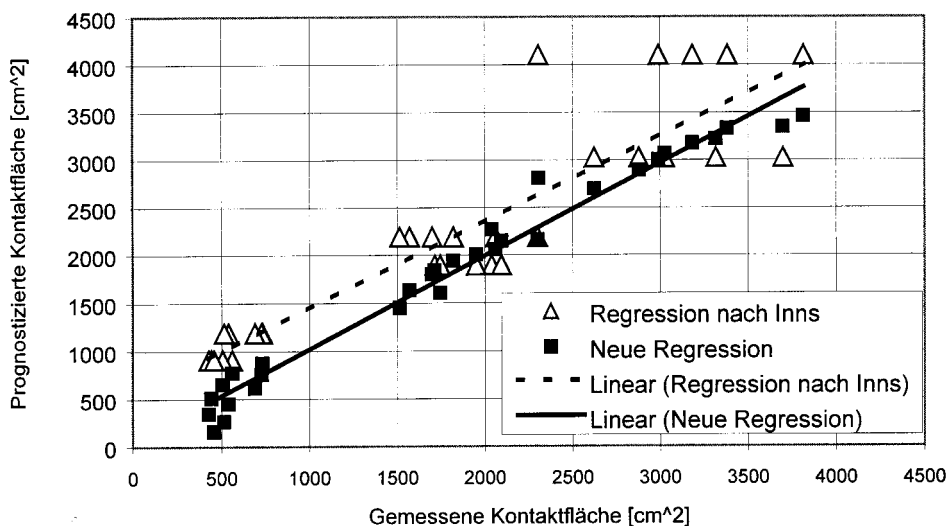


Abb. 7. Vergleich der gemessenen Kontaktflächen mit den nach der neuen Formel und der Formel von Inns und Kilgour (1978) errechneten Kontaktflächen.

$$KF = 50724,6 - 273,6 * p^2 + 708,6 * DU - 2,7 * DU^2 - 2,6 * BR^2 + 2,3 * DU * BR$$

Der Geltungsbereich dieser Regression umfasst die Spannweite der untersuchten Reifen, das heisst von 9,5 R 36 bis 800/65 R32. Die Kontaktfläche von Reifen, die breiter sind oder einen anderen Durchmesser haben, kann damit nicht ohne weiteres berechnet werden.

Inns und Kilgour (1978) errechneten für Diagonalreifen eine ähnliche, einfachere Formel:

$$KF = 0,27 * DU * RR$$

Es stellte sich die Frage, ob diese Formel auch für Radialreifen gilt. In Abbildung 7 sind die gemessenen gegen die errechneten Werte aufgetragen. Die beiden Geraden ergaben sich aus einer Regression der jeweiligen Punkte. Die Formel von Inns

und Kilgour (1978) ergibt vor allem bei grossen Reifen zu hohe Kontaktflächen. Im Allgemeinen liefert die Formel nach wie vor gute Resultate und sie ist vor allem in der Praxis einfach anzuwenden.

#### LITERATUR

■ Semmel H., Horn R., Steinkampf H., Schwanghart H. und Neukam M., 1993. Druckfortpflanzung im Boden. *Landtechnik* 48 1/2.

■ Inns F.M. und Kilgour J., 1978. *Agricultural tyres*. Dunlop, London.

■ Bolling I., 1987. Bodenverdichtung und Triebverhalten bei Reifen - neue Mess- und Rechentechniken. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG), Dissertation 1987.

■ Saunier P.A., Brassart F. und Oger P., 1995. Reifenaufstandsfläche in lockerem Boden. VDI Berichte. Nr 1211.

#### RÉSUMÉ

##### Surface de contact en fonction de la pression de gonflage

La surface de contact entre le pneu et le sol a été mesurée en fonction de la pression de gonflage. Six pneus différents ont été analysés. A chaque réduction de la pression de gonflage, une augmentation de la surface de contact a été observée. La pression de gonflage à laquelle l'augmentation de la surface de contact est la plus élevée varie fortement d'un pneu à l'autre. A l'aide d'une régression multiple, une nouvelle équation a été établie pour calculer la surface de contact sur la base de la largeur et du diamètre du pneu ainsi que de la pression de gonflage.

#### SUMMARY

##### Contact area as a function of tyre inflation pressure

The contact area of six different tyres was measured as a function of the tyre inflation pressure. In all tyres, a decrease of the tyre inflation pressure led to an increase in contact area. The tyre inflation pressure at which the contact area increases the most depends on the type of tyre used. A new equation was established in order to calculate the contact area on the basis of tyre size, tyre diameter and inflation pressure. This equation was calculated by means of multiple regression.

**KEY WORDS:** tyre inflation pressure, contact area, soil compaction