

Ermittlung der Reifen-Kontaktfläche im Feld mittels Rechenmodell

Eine wichtige Voraussetzung, um die Bodenbeanspruchung im Ackerbau zu beurteilen

Etienne Diserens, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), Tänikon, CH-8356 Ettenhausen

Die Kontakt- oder Berührungsfläche zwischen Reifen und Boden ist ein wesentlicher Parameter zur Beurteilung der Druckbeanspruchung sowohl im Ober- als auch im Unterboden. Aus der Fachliteratur sind erweiterte Modelle für die Berechnung der Kontaktfläche bekannt, die unter kontrollierten Bedingungen wie starrer Fahrbahn oder Sandpiste entstanden sind. Allerdings haben sich solche Modelle für die Praxis unter Feldbedingungen nicht bewährt. So wurden bisher einfache Modelle nur unter Einbezug der Reifendimension angewendet. Eine erste Abschätzung ist damit zwar möglich, die Genauigkeit ist aber unbefriedigend. Auch bleiben

bedeutende Kontaktflächenveränderungen als Folge von Reifeninnendruck- oder Radlastschwankungen unberücksichtigt. Aus diesen Gründen wird ein neues praxisnahes Berechnungsmodell für Antriebsreifen mit einem Aussendurchmesser ab 130 cm und einem Felgendurchmesser ab 24 Zoll unter Feldbedingungen vorgestellt. Dabei sind neben der Reifendimension Einflussgrößen wie Reifentyp, Reifeninnendruck und Radlast berücksichtigt. Dadurch kann die Kontaktfläche und damit auch die Bodenbelastung als Folge von Maschinenlast präziser als bisher beurteilt werden.

Inhalt	Seite
Problemstellung	2
Literaturübersicht	2
Versuchsdurchführung	2
Begriffe «Reifen, Boden»	4
Messergebnisse	5
Neue Formeln zur Ermittlung der Kontaktfläche im Feld	6
Statistik in Kürze	6
Der Untergrund ist das A und O	8
Anwendungsbereich	9
Schlussfolgerungen	9
Formeln im Überblick	11
Literatur	11



Problemstellung

Zwischen dem unvermeidbaren Zwang zur Produktivitätssteigerung und den hohen Anforderungen an eine schonende Bodenbewirtschaftung (VBBO, Art. 6¹) gibt es immer wieder Zielkonflikte. Die Spannung zwischen ökologischen und ökonomischen Ansprüchen an die Landwirtschaft verstärkt sich. Als eine Konsequenz zielt die Entwicklung von Land- und Forstmaschinen auf die Minimierung des Kontaktflächendrucks trotz hoher Maschinengewichte ab. Bei der Beurteilung der Bodenbelastung ist die Kontaktfläche (Berührungsfläche zwischen Boden und Reifen) als Mess- oder Berechnungsgröße von entscheidender Bedeutung. Als Einflussgrößen auf die Kontaktfläche gelten die Reifendimension, der Reifeninnendruck und die Radlast. Bisher ging man vorwiegend von einer befestigten Fahrbahn aus. Die Einflussfaktoren auf die Kon-

taktfläche wie die Reifendimension, der Reifeninnendruck oder die Radlast sind einzeln bekannt. Zur Ermittlung der Kontaktfläche unter feuchten Feldverhältnissen für ein breites Spektrum von Antriebsbereifungen sind allerdings diese Einflussfaktoren gemeinsam wenig untersucht worden.

Das Ziel dieser Studie liegt bei der Erarbeitung eines **praxisnahen** Berechnungsmodells zur Erfassung der Kontaktfläche von Antriebsbereifungen im Feld unter Berücksichtigung der Haupteinflussfaktoren wie Reifendimension, Reifeninnendruck und Reifentyp. In Vergleich zur etablierten «Faustregelgleichung» (Kontaktfläche in $\text{cm}^2 = \text{Reifenbreite in cm} \cdot \text{Reifendurchmesser in cm} \cdot 0.25$) kann die Kontaktfläche und damit auch der mittlere Kontaktdruck **präzise** erfasst werden.

¹ Verordnung über Belastungen des Bodens vom 1.7.1998.

Kästchen 1

Literaturübersicht

Aus der Literatur sind verschiedene Ansätze bekannt, die die Kontaktfläche auf Böden mit unterschiedlichen Festigkeiten wiedergeben (Komandi 1976; Inns und Kilgour 1978; Steiner 1979; McKyes 1985; Bolling 1987; Schwiager 1996). **Inns und Kilgour (1978)** und **McKyes (1985)** schlagen diverse empirische Formeln für starre und für weiche Böden vor. Diese Formeln haben den Vorteil, dass sie für die Praxis leicht zugänglich sind, da sie nur die Reifendimension (Reifenbreite mal Reifendurchmesser) berücksichtigen.

Aufgrund einer Serie von Messungen von Diagonalreifen auf Pflasterstein schlägt Komandi (1976) eine Formel vor, welche die Radlast bei gegebenem und bei minimalem Reifeninnendruck sowie Reifenbreite, Reifendurchmesser und Reifeninnendruck berücksichtigt. Aus diesen Parametern leitet er verschiedene Gleichungen zur Bestimmung der Einfederung δ (Abb. 1) sowie der Breite und der Länge des Reifenabdruckes und damit die Kontaktfläche ab. Für Radialbereifung schlägt er einen Umrechnungsfaktor vor. Anhand von Reifenabdrücken entwickelt **Steiner (1979)** zwei Gleichungen für Radial- und Diagonalbereifungen anhand des Reifendurchmessers, der Radlast und des Rei-

feninnendruckes. Er verzichtet auf die Reifenbreite und die PLY-Zahl (Anzahl Cordeinlagen im Reifenunterbau. Kennzeichnung für die Reifenfestigkeit bei Diagonalreifen). Diese beiden Parameter würden bei seinen Messungen das Bestimmtheitsmass¹ nur um weniger als 1 % verbessern.

Bolling (1987) betrachtet den Reifen als ein starres Rad und schlägt für weiche Böden eine Gleichung für die Spurtiefe z als Funktion des Reifenradius und der Reifenbreite unter Belastung vor. Die Spurtiefe und die Reifenbreite unter Belastung sind Messgrößen, die von den Feldbedingungen abhängen. Bolling betrachtet die Kontaktfläche vom vordersten Berührungspunkt des Reifens mit dem Boden bis zur Radachse. Die Abflachung des Reifens hinter der Radachse wird nicht berücksichtigt. Schwiager (1996) schlägt eine Formel vor, die für alle Substratarten gilt. Dabei wird der Reifen wie folgt exakt vermessen: Länge mal Breite mit Abzug der vier abgerundeten Ecken. Das Verfahren ist sehr genau, benötigt aber auch aufwendige Feldmessungen. Die hier erwähnten Formeln sind je nach ihrem Anwendungsbereich in Kästchen 4 angeordnet.

¹ Bestimmtheitsmass (R^2): Mass für den Streuungsanteil der gemessenen Kontaktflächenwerte, bedingt durch die ausgewählten Variablen.

Versuchsdurchführung

Erfassung von Messwerten auf sechs verschiedenen Ackerstandorten

Praxisorientierte Erhebungen von Reifen-Kontaktflächen sind auf sechs verschiedenen Ackerflächen durchgeführt worden (Tab. 1). Die periodisch gepflügten Flächen wiesen zur Zeit der Messungen unterschiedliche Bepflanzungen auf. Dabei waren die Böden jeweils **feucht bis nass** und die Ackerkrume weitgehend **abgesetzt** und sogar im Falle einer Kunstwiese leicht verfestigt.

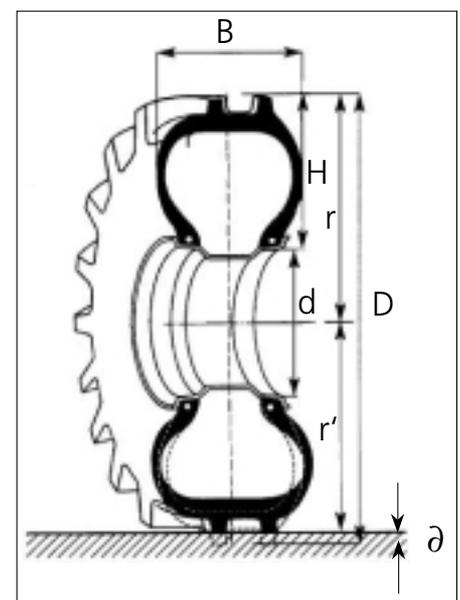


Abb. 1: Reifen- und Felgendimensionen. B: Reifenbreite; D: Aussendurchmesser unbelastet; H: Reifenhöhe; d: Felgendurchmesser; r: Radius unbelastet; r': Radius belastet; $\delta = r - r'$: Einfederung (Werkbild Michelin).

Bei den ersten drei Versuchen standen die Auswirkungen der Belastungen auf die Kontaktfläche beim Pflügen und beim Zuckerrübenroden im Vordergrund (Tab. 2). Pro Reifeninnendruckstufe wurden jeweils zwei Belastungsstufen ausgewählt. Bei den Versuchen 4 bis 6 untersuchten wir den Einfluss des Reifeninnendruckes auf die Kontaktfläche bei gegebener Radlast und jeweils zwei unterschiedliche Innendruckstufen. Bei allen sechs Versuchsstandorten lagen die Radlasten der Antriebsreifen im praxisüblichen Bereich; sie variierten zwischen 1400 und 10885 kg. Insgesamt sind zehn Maschinen mit unterschiedlichen Reifentypen eingesetzt worden.

Abgestimmte Reifeninnendrucke

Bei den Versuchen 1 bis 3 entspricht der Reifeninnendruck dem maximal empfohlenen Herstellerangaben für eine Geschwindigkeit von 30 km/h. Die nach den ETRTO-Normen (1996) auf Feldgeschwindigkeit (10 km/h) umgerechneten Radlasten sind meistens höher als die gemessenen Werte. Von daher kann der Reifeninnendruck gemäss der Tragfähigkeit unter Feldbedingungen als hoch bewertet werden.

Bei den Versuchen 4 bis 6 wurden je eine **niedrige**, bei der die Radlast die zulässige Tragfähigkeit bei Feldarbeit (10 km/h) nicht übersteigt, und eine **hohe** Druckstufe, die gemäss den Reifenherstellern noch die höheren Belastungen bei 30 km/h erlaubt, ausgewählt. Eine Ausnahme bildeten die Bereifungen 800/65R32 und 710/70R38, wo mit einer Radlast über 7 t bzw. 10 t die höchstzulässigen Grenzwerte für die Strasse überschritten wurden.

Abgestimmte Radlasten, zum Teil durch die Praxis gegeben

In den drei ersten Versuchen wurden die Bereifungen gemäss ihrer Tragfähigkeit im Feld mässig und hoch belastet. In den Versuchen 4 bis 6 sind die Radlasten der Vollernter (vorne: 710/70R38 und hinten: 700/50-26.5) und des Mähdeschers (vorne: 800/65R32) für Feldverhältnisse als sehr hoch einzustufen (Tab. 2). Die Radlasten der Traktorbereifung 16.9R34 (hinten) und der Mähdescherbereifung 540/65R24 (hinten) sind als mässig zu bewerten.

Feldmessungen für drei Reifentypen mit Traktionsprofil

Aufgrund der Dimensionen oder der Bauart (Kästchen 2) reagieren die Reifen auf Belastung oder auf Reifeninnendrucke je nach Typen unterschiedlich. Der **Niederquerschnittreifen** trägt im Vergleich zum **Normalquerschnittreifen** wegen der grösseren Reifenbreite (Abb. 1) bei gleichem Reifeninnendruck ein höheres Gewicht. **Terrareifen** sind überwiegend Diagonalreifen. Die Reifenflanken sind

Tab. 1: Bodeneigenschaften in 15 bis 20 cm Bodentiefe

Versuchs-Nr.	Bodenbedeckung Versuchsdatum	Bodenart ¹⁾	Ton/Schluff/Sand [%]	Bodenfeuchte	Saugspannung [hPa]	z/D ²⁾
1	Kunstwiese 29.05.96	L	24/44/32	nass	11	-
2	Zuckerrüben 8.-9.10.96	L	26/42/32	nass	36	-
3	Zuckerrüben 15.10.96	tU	-	feucht / nass	<100	-
4	Stoppel Weizen 6.10.98	sL	19/41/40	nass	18	0,035
5	Stoppel Raps 4.-5.8.99	IT	48/32/20	feucht	78	0,035
6	Kunstwiese 3.11.99	IU	27/53/20	nass	12	0,032

¹⁾ L Lehm, tU toniger Schluff, sL sandiger Lehm, IT lehmiger Ton, IU lehmiger Schluff

²⁾ z/D : maximale Spurtiefe / Reifendurchmesser
z/D < 0.025 = harter Boden; z/D > 0.05 = weicher Boden (Mc Kyes, 1985)
-: nicht gemessen

Tab. 2: Eingesetzte Bereifungen mit Reifeninnendruck- und Radlastveränderung, Kontaktfläche und Spurtiefe

Versuchs-Nr.	Reifentyp ¹⁾	Reifenbezeichnung	Reifendimension Breite · Durchm. ²⁾ [cm] · [cm]	Reifeninnendruck [bar]	Radlast [kg]	Kontaktfläche ³⁾ [cm ²]	Spurtiefe max ⁴⁾ [cm]
1	no	16.9R38	43 x 169	1,2	1400 2030	2445 2608	- -
2	tr	700/50-26.5	70 x 135	2,4	5690 6550	3157 3251	- -
	ni	710/70R38	71 x 193	3,6	5450 7640	5283 6164	- -
3	tr	800/45-30.5	80 x 150	1,4	5750 8850	5574 7099	- -
4	ni	710/70R38	71 x 193	2,2 2,8	10765	7424 5913	6,8 -
5	no	16.9R34	43 x 158	0,8 1,6	1830	2654 2285	5,4 5,4
	no	13.6R38	35 x 155	0,8 1,6	1940	2601 1930	4,6 4,2
	ni	540/65R24	54 x 131	1,0 1,5	1970	2884 2516	- -
	ni	800/65R32	80 x 186	1,6 2,5	7630	6941 6149	7,3 8,7
6	ni	540/65R34	54 x 157	0,8 1,6	2625	3734 2980	4,2 3,4
	ni	15.5R38	39 x 157	0,8 1,6	1610	2454 1699	- -
	tr	700/50-26.5	70 x 135	1,5 2,7	5340	3823 3566	- -
	ni	710/70R38	71 x 193	1,9 3,0	10885	6894 5908	6,0 6,3

¹⁾ no: Normalquerschnitt
ni: Niederquerschnitt
tr: Terrareifen
²⁾ Durchm.: Durchmesser

³⁾ Gemessene Werte (Bildanalysemethode)
⁴⁾ Maximale Spurtiefe (Laser-Profilometermethode)
-: nicht gemessen



steifer als bei Radialbereifungen; sie tragen wegen ihrer Dimension und Konstruktion hohe Gewichte bei vergleichsweise tiefen Reifeninnendrücken. Für die Erhebung der Kontaktfläche im Feld wurden insgesamt 18 Bereifungen (acht Normalquerschnitt-, sechs Niederquerschnitt- und vier Terrareifen) an Traktoren der 50 bis 100 kW-Klasse und an Erntemaschinen (Mähdrescher und Zuckerrübenschnitzmaschinen) ausgewählt. Gesamthaft sind 39 Einzelmessungen, 38 davon mit **Traktionsprofil** durchgeführt worden. Der kleinste Reifen war eine Lenkbereifung der Dimension 10.00-16SL mit einem Ribprofil (Nute in der Längsrichtung). Die 13 geprüften Bereifungen mit unterschiedlichen Belastungswerten (Versuche 1–3) oder Reifeninnendrücken (4–6) sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Abb. 2: Eng verstreutes Kalkpulver um den Reifen, um den Abdruck auf den Boden deutlich abzugrenzen.

Kästchen 2

Begriffe «Reifen, Boden»

Kontaktfläche A [cm²]:	Berührungsfläche zwischen Reifen und Boden
Kontaktflächendruck [bar]:	Druck, der durch die Radlast auf der Kontaktfläche entsteht
Radlast F [kg]:	Last, die durch ein einzelnes Rad getragen wird
Reifeninnendruck Pi [bar]:	Luftdruck im Reifen
Reifenkategorie:	Lenkungs-, Antriebs- oder Implementreifen
Lenkungsreifen:	Reifen mit geschlossenem, in Fahrrichtung gelegtem Profil. Hohe laterale Stabilität. Starre Rippen
Antriebsreifen:	Reifen mit offenen oder geschlossenen Stollen, die schräg zur Fahrrichtung liegen. Hohe Griffigkeit (Zugleistung), möglichst hoher Selbstreinigungsgrad und hohe Fahrsicherheit auf der Strasse
Implementreifen (Ackerwagenreifen):	Reifen zum Transport geeignet. Tragen hohe Last. Profil mit eher flach und eng liegenden Stollen. Auf nassen, klebrigen Böden, kann das Wasser entweichen. Selbstreinigungswirkung
Reifenart:	Diagonal- oder Radialbereifung
Diagonal:	Cordeinlagen kreuzweise in einem Winkel von 40° bis 45° zur Laufrichtung einvulkanisiert
Radial:	Cordeinlagen in einem Winkel von 90° einvulkanisiert. Radialbereifung verformen sich wegen der starren Lauffläche und der weichen Flanken in der Fahrrichtung. Höhere Zugkraft.
Reifentyp:	Normalquerschnitts-, Niederquerschnitts- oder Terrareifen
Normalquerschnitt [no]:	$H/B \geq 0.8$ (Reifenhöhe H durch Reifenbreite B, Abb. 1). Reifeninnendruck bis über 3.0 bar möglich
Niederquerschnitt [ni]:	$0.6 < H/B < 0.8$. Breitere Bereifung als Normalquerschnitt. Bei gleichwertiger Last, tieferer Reifeninnendruck möglich. Empfohlener Druck generell nicht über 2.0 bar.
Terrareifen [tr]:	$H/B \leq 0.6$. Tragen hohe Lasten bei reduziertem Reifeninnendruck. Wirkt für den Oberboden schonend. Empfohlener Druck für Bereifung mit weniger als 10 PLY liegt zwischen 0.6 und 2.0 bar.
PLY-Zahl (PLY-Rating):	Anzahl Cordeinlagen im Reifenunterbau. Kennzeichnung für die Reifengestigkeit bei Diagonalreifen.
Saugspannung:	Benötigter Unterdruck in hPa, um einem Boden Wasser zu entziehen.

Bildanalyse für die Kontaktflächenbestimmung, Laser-Profilmeter für die Spurtiefe und Tensiometer für die Saugspannung im Boden

Die Radlast wurde am Feldrand auf starrem Untergrund mit zwei mobilen **Radlastwagen** der Firma Haenni erhoben. Die Erhebung der Kontaktfläche im Feld erfolgte bei stehendem Fahrzeug durch Markieren des Reifenabdruckes mit Kalkpulver (Abb. 2). Nach dem Wegfahren des Fahrzeuges wurde ein Massstab (Doppelmeter oder Messband als Kalibrierungsinstrument) in die markierte Zone gelegt und der Reifenabdruck fotografiert (Abb. 3 und 4). Mittels **Bildanalyseprogrammen** (Bmp Tool 1.0, Adobe Photoshop D1-4.0.1) konnte die Kontaktfläche ausgemessen werden. Die Kontaktfläche pro Bereifung, Last- und Reifeninnendruck wurde je einmal erhoben.

Die Bestimmung der Spurtiefe erfolgte mit einem sogenannten Profilmeter: Ein auf einer 1,6 m langen Schiene montierter **Laser** misst alle 2 mm den Abstand zur Bodenoberfläche. Die durchschnittliche sowie die maximale Spurtiefe können daraus abgeleitet werden. Pro Belastungs- und Innendrucksstufe wurden zwei Wiederholungen durchgeführt. Die Ermittlung der Saugspannung (Kästchen 2) erfolgte mittels vier **Tensiometern** und einem dazugehörigen Einstich-Messgerät in einer Tiefe von 15 bis 20 cm.

Messergebnisse

Radlast und Reifeninnendruck: zwei wichtige Einflussgrößen zur Erfassung der Kontaktfläche

Die Messungen der Kontaktfläche wurden auf gesetztem Boden unter feuchten bis nassen Feldverhältnissen durchgeführt. Das Verhältnis z/D (z für maximale Spurtiefe und D für Reifendurchmesser in cm, Tab. 1; Abb. 1) gilt als Mass für die Bodenfestigkeit. Mit einem Verhältnis unter 0.025 wird der Boden als hart, mit einem Verhältnis über 0.05 als weich bezeichnet (McKyes, 1985). Mit 0.035 liegen die Werte der Feldversuche 4–6 in einem

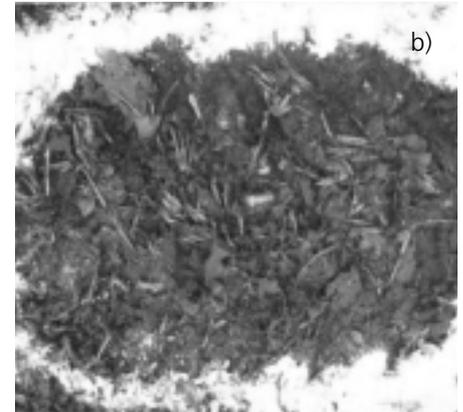


Abb. 3: Bei zusätzlicher Radlast nimmt die Kontaktfläche auch zu: Reifen 800/45-30.5, Reifeninnendruck 1,4 bar, zusätzliche Radlast 3100 kg, Kontaktflächenzunahme 21 %. Fahrriichtung von r.n.l. a) Radlast 5750 kg, Kontaktfläche 5574 cm² – b) Radlast 8850 kg, Kontaktfläche 7099 cm².

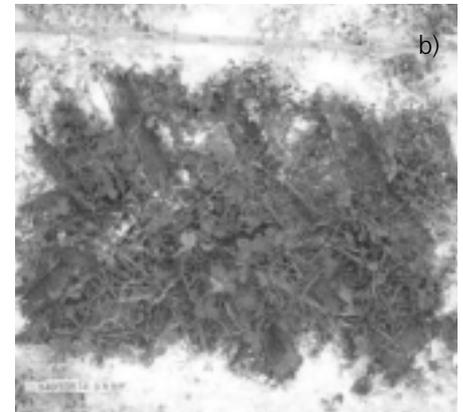
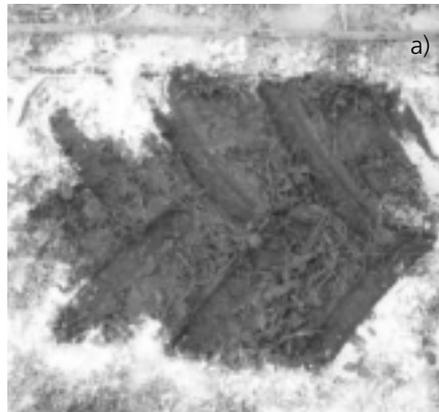


Abb. 4: Bei einer Reifeninnendruckabnahme nimmt die Kontaktfläche entsprechend zu: Reifen 540/65R34, Reifeninnendruckabnahme 0,8 bar, Radlast 2625 kg, Kontaktflächenzunahme 25 %, Fahrriichtung von r.n.l. a) Reifeninnendruck 1,6 bar, Kontaktfläche 2980 cm² – b) Reifeninnendruck 0,8 bar, Kontaktfläche 3734 cm².

Zwischenbereich, der Boden ist nachgiebig. Bodentextur und Saugspannungsmesswerte liessen keine Extremwerte für die ersten drei Feldversuche erwarten.

In Tabelle 2 sind Messwerte der Kontaktfläche je nach Bereifungen, Reifeninnendruck und Radlast aufgeführt. Wird der Reifeninnendruck bei unterschiedlichen Radlasten konstant gehalten, wird die Kontaktfläche bei zunehmender Radlast eindeutig grösser (Versuche 1–3). Nimmt zum Beispiel die Last der Bereifung 800/54-30.5 um 3100 kg bei konstantem Reifeninnendruck zu, steigt die Kontaktfläche um 27 % an (Versuch 3, Abb. 3). Berechnet man anhand dieses Beispiels zusätzlich die Kontaktdruckveränderung, so erhöht sie sich infolge der höheren Berührungsfläche nur um 21 %.

Wird die Radlast konstant gehalten und der Reifeninnendruck variiert, dann nimmt bei abnehmendem Reifeninnendruck die Kontaktfläche entsprechend zu (Versuche 4–6). Versuch 6 (Bereifung 540/65R34) zeigt, dass sich die Kontaktfläche bei einer Reduktion des Reifeninnendruckes von 1.6 auf 0.8 bar, um 25 % vergrössert (Abb. 4). Der mittlere Kontaktdruck vermindert sich dabei um 20 %. Dabei wäre zu erwarten, dass sich die Spurtiefe mit einer Reduktion des Reifeninnendruckes bedingt durch eine erhöhte Kontaktfläche verkleinert. Dies bestätigte sich nur bei Lasten über 7000 kg. Die geringere Anzahl Wiederholungen bei der Erfassung der Spurtiefe erlaubt hier keine schlüssige Aussage.

Tab. 3: Neue Formeln zur Ermittlung der Kontaktfläche im Feld unter feuchten Bodenverhältnissen mit Bestimmtheitsmass [R²], Korrelationskoeffizienten [r] und F-Wert, ein Mass für die Signifikanz des Bestimmtheitsmasses

Gl. ¹⁾	A = a · B · D ²⁾						A = (a · B · D) + (b · P _i) + (c · F) ²⁾							
	a	n ¹⁾	[R ²]	[r]	F-Wert	Gl.	a	b	c	n	[R ²]	[r]	F-Wert	Gl.
undifferenziert	0,432	39	0,9719	0,9526	1348	Gl.1	0,428	-650,215	0,221	39	0,9899	0,9846	1287	Gl.5
Normalquerschnitt	0,336	12	0,9527	0,8606	243	Gl.2	0,260	-295,944	0,556	12	0,9687	0,9213	125	Gl.6
Niederquerschnitt	0,442	16	0,9851	0,9590	1059	Gl.3	0,416	-457,670	0,186	16	0,9941	0,9819	898	Gl.7
Terrareifen	0,444	11	0,9634	0,7714	291	Gl.4	0,420	-1120,680	0,370	11	0,9910	0,9559	403	Gl.8

¹⁾ Gl. = Gleichung, n = Anzahl Messwerte

²⁾ a, b, c = Regressionskoeffizienten, A = Kontaktfläche [cm²], B = Reifenbreite [cm], D = Reifendurchmesser [cm], P_i = Reifeninnendruck [bar], F = Radlast [kg]

Aufgrund der Elastizitätseigenschaften der Bereifung sind neben der **Reifen-dimension** auch der Reifeninnendruck und die **Radlast** wichtige Einflussgrössen zur Bestimmung der Kontaktfläche auf nachgiebigen Ackerböden.

Neue Formeln zur Ermittlung der Kontaktfläche im Feld

In Abbildung 5 sind alle 39 Messwerte der Kontaktfläche als Funktion der Reifendimension (Produkt Reifenbreite · Reifendurchmesser) eingetragen. Die Gerade der Form $Y = a \cdot X$ (Kästchen 3) oder $A = 0,432 \cdot B \cdot D$ ist die einfachste Funktion zur Beschreibung der Kontaktfläche, aus-

schliesslich aufgrund der Reifendimension (Gl. 1, Tab. 3). Diese Funktion zeigt sich jedoch für Normalquerschnittreifen als wenig geeignet, da die Mehrzahl der Punkte unterhalb der Regressionsgerade liegt (Abb. 5). Neu abgeleitet für Normalquerschnittbereifungen (Gl. 2, Tab. 3) verändert sich der Steigungsfaktor von 0,432 auf **0,336**, da die Reifenbreite bei einem vorgegebenen Durchmesser schmäler ist als bei Niederquerschnitt- oder Terrareifen. Für Niederquerschnitt- und Terrareifen verändern sich dagegen die Steigungsfaktoren **0,442** bzw. **0,444** kaum (Gl. 3 und 4 Tab. 3). Bei der Erfassung der Kontaktfläche kamen beträchtliche Streuungen bei gross dimensionierten Bereifungen wie Niederquerschnitts- (z.B. 710/70R38) und Terrareifen (z.B. 700/50-26.5) vor (Abb. 5). Allein anhand der Reifendimension sind vor allem bei

Kästchen 3

Statistik in Kürze

Zur Ermittlung der Kontaktfläche erfolgten Regressionenberechnungen. Die Kontaktfläche Y als gesuchte Grösse gilt als abhängige Variable. Die Einflussgrössen gelten dagegen als unabhängige Variablen. Die folgenden Regressionsformen haben sich als geeignet erwiesen:

- Die einfache lineare Regression der Form $Y = a \cdot X + C$ mit linearen Transformationen der unabhängigen Einflussgrösse X (Produkt Reifenbreite · Reifendurchmesser). Damit ein Vergleich mit den bisherigen etablierten Formeln aus der Literatur ermöglicht wird, ist die Konstante C gleich Null gesetzt. Es führt dazu, dass der Bestimmtheitsmass R² hoch wird.
- Die einfache lineare Regression der Form $Y = a \cdot X + b \cdot X^2$ mit nicht linearen Transformationen der unabhängigen Einflussgrösse X (Produkt Reifenbreite · Reifendurchmesser). Im Messbereich, äquivalent zur Funktion der exponentiellen Form $Y = a(b^X)$.
- Die multiple lineare Regression mit linearer Transformation ($Y = a \cdot X_1 + b \cdot X_2 + c \cdot X_3$) der erklärenden Einflussgrössen (Reifenbreite mal Reifendurchmesser (X₁), Radlast (X₂) und Reifeninnendruck (X₃)).

Die Auswertung erfolgte mittels der Software Statistika (Version 5).

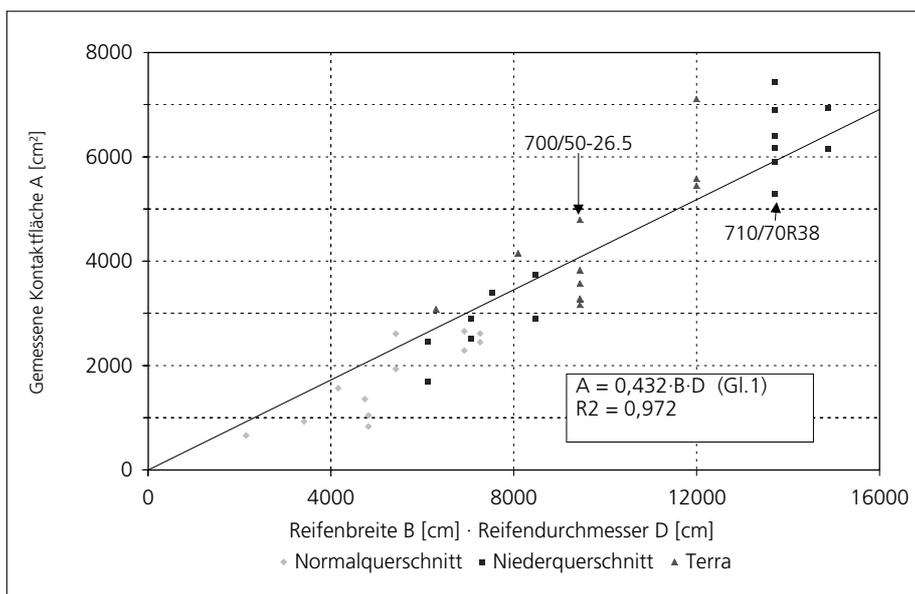


Abb. 5: Kontaktfläche für feuchte Bodenverhältnisse als Funktion der Reifendimension. Einfache lineare Regression der Form $Y = a \cdot X$ (Gl.1) als «Faustregel», nun mit grosser Ungenauigkeit gebunden.

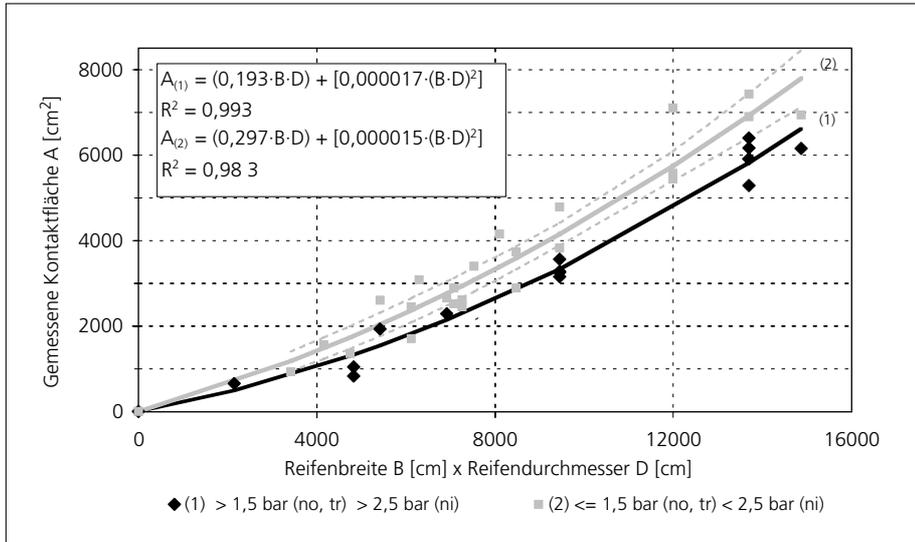


Abb. 6: Signifikanter Einfluss des Reifennendruckes auf die Kontaktfläche. Regressionskurven mit zugeordneten Vertrauensintervallen ($p = 0,05$) – mit no: Normalquerschnittreifen, ni: Niederquerschnittreifen, tr: Terrareifen.

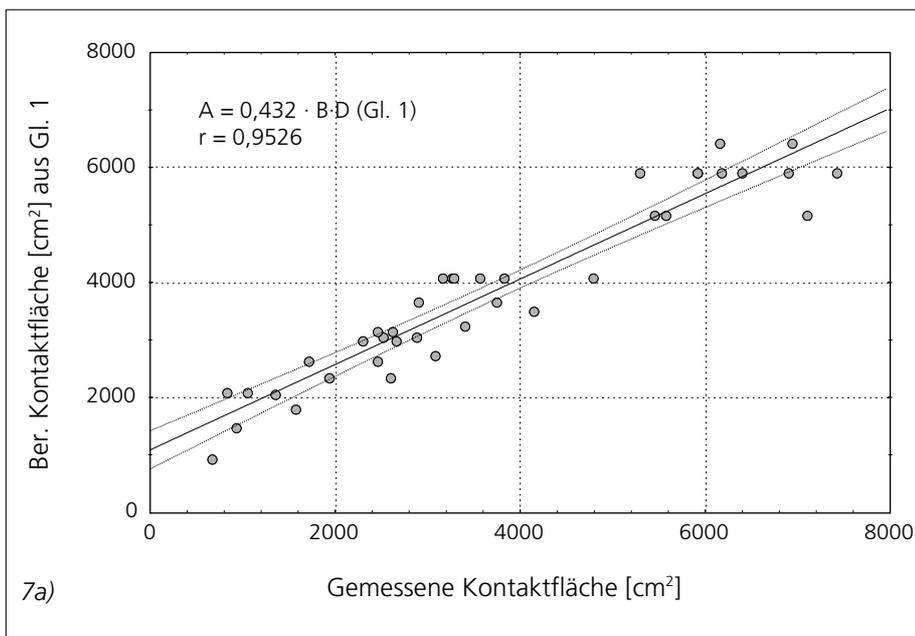
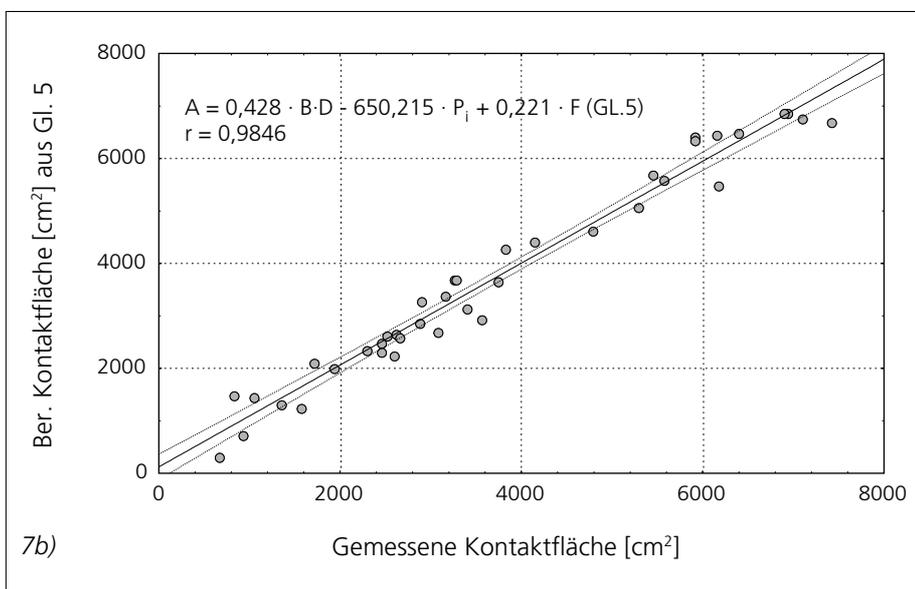


Abb. 7: Korrelation zwischen gemessenen und berechneten Kontaktflächen. Höhere Strenge der Abhängigkeit mit berechneten Werten aus der multiplen linearen Regression.



7b) Berechnete Werte aus der multiplen linearen Regression.

diesen beiden Reifentypen nur sehr **annähernde Schätzungen** bei der Ermittlung der Kontaktfläche möglich, was jegliche Aussage über mittleren Kontaktdruck und Druckausbreitung im Boden stark einschränkt.

Neben der Reifendimension ist der Reifennendruck ebenfalls als Einflussgrösse zur Ermittlung der Kontaktfläche im Feld einzusetzen. Der Einfluss des Reifennendruckes auf die Kontaktfläche wird ebenfalls ersichtlich, wenn von allen Messdaten ausgegangen wird. Hierfür wurde eine neue Regressionberechnung der Form $Y = a \cdot X + b \cdot X^2$ (Kästchen 3) mit $A = B \cdot D \cdot X + B \cdot D \cdot X^2$ (A für Kontaktfläche und B·D für das Produkt Reifenbreite · Reifendurchmesser) vorgenommen (Abb. 6). Abgestimmt auf den Bereifungstyp gibt es eine Gruppe mit eher niedrigen und eine Gruppe mit eher hohen Reifennendruck. Die beiden Gruppen bzw. Regressionlinien gehen bei zunehmenden Reifendimensionen deutlicher auseinander. Je grösser die Bereifung ist, desto grösser wird auch seine Verformung als Folge einer Veränderung ihres Reifennendruckes (Versuche 4–6, Tab.2).

Wird neben der Reifendimension und dem Reifennendruck auch die Radlast miteinbezogen, dann erhält man mittels einer multiplen linearen Regression der Form $Y = a \cdot X_1 + b \cdot X_2 + c \cdot X_3$ (Kästchen 3) eine neue Gleichung (Gl. 5, Tab. 3) zur Ermittlung der Kontaktfläche im Feld. Eine bessere Anpassung der berechneten Werten zu den gemessenen Werten mit der multiplen Regression lässt sich an Hand der Abbildungen 7a und 7b bildlich feststellen. Die Punkte der Abbildung 7b stehen näher zur Gerade als in der Abbildung 7a. Die Streuung der berechneten Werte ist mit der neuen Gleichung 5 kleiner und die Korrelation zwischen berechneten und gemessenen Werten infolge auch grösser. Eine noch höhere Abhängigkeit zwischen berechneten und gemessenen Werten lässt sich unter Berücksichtigung der einzelnen Reifentypen erlangen (Gl. 6–8, Tab. 3). Unter den Bereifungen mit einem Aussendurchmesser grösser als 130 cm (33 Messwerte) liegen die Abweichungen von den berechneten gegenüber den gemessenen Werten weitgehend unterhalb 10 %. Es gibt eine Ausnahme (unter sechs Fällen) mit 13 % bei Normalquerschnittbereifung, eine Ausnahme (unter 16 Fällen) mit 24 % bei Niederquerschnittbereifungen und drei Ausnahmen (unter elf Fällen) mit

Abweichungen zwischen 14 und 17 % bei Terrareifen.

Werden neben der Reifendimension auch der **Reifennendruck**, die **Radlast** und der **Reifentyp** als Einflussgrössen berücksichtigt, so kann die Kontaktfläche im Feld deutlich genauer erfasst werden. Dadurch wird auch die Beurteilung der Ober- und Unterbodengefährdung als Folge einer Reifennendruckverstellung ermöglicht.

Der Untergrund ist das A und O

Die Grösse der Kontaktfläche hängt im Weiteren auch vom Boden ab (Söhne 1953; McKyes 1985). Je nachdem ob der Boden hart oder weich, tief- oder flachgründig ist, wird er sich bei einer gegebenen Belastung unterschiedlich verhalten. Vergleicht man die Feldmesswerte der Abbildung 5 mit Messwerten, die auf

sionsgeraden lassen sich voneinander eindeutig trennen. Bei kleineren Reifendimensionen fällt der Unterschied nur weniger auf. Ein extremes Beispiel ist mit der Bereifung 16.9R38 in Tabelle 4 gegeben. Trotz höherem Reifennendruck und kleinerer Radlast im Feld ist die Kontaktfläche auf feuchtem Ackerboden immer noch höher. Aus der einfachen linearen Regressionsberechnung entsteht für die Messwerte auf Sand ein Koeffizient von 0,23 (Steigung der Gerade 2, Abb. 8). Auf starren Böden mit einem Verhältnis $z/D < 0.025$ (als Mass für die Bodenfestigkeit, Tab. 1) schlägt McKyes einen vergleichbaren Faktor von 0,25 vor. Auf sehr weichen Böden (Verhältnis $z/D > 0.05$, Tab. 1) schlägt er hingegen einen Faktor von 0,5 vor (Kästchen 4). Mit einem Koeffizienten von 0,43 (Tab. 3, Gl. 1; Abb. 5) einerseits und einem Verhältnis z/D von 0,035 andererseits (Tab. 1) stehen die **hier untersuchten Böden** in einem Zwischenbereich, den man als **geschmeidig** bezeichnen kann. Eine flachgründige feuchte Sandpiste und ein feuchter Acker-

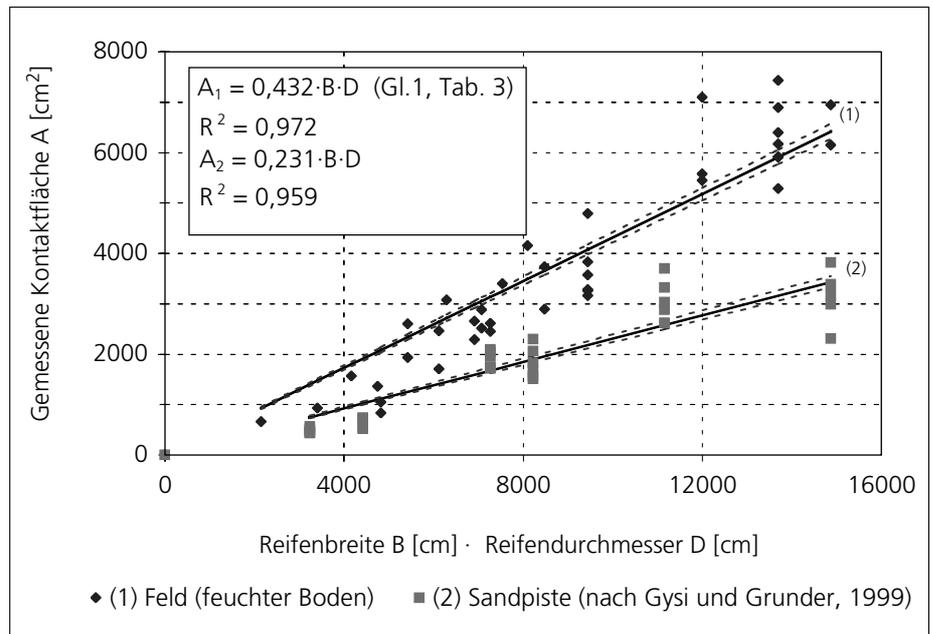


Abb. 8: Als Untergrundmedium wirken sich feuchte Ackerböden und Sandpiste auf die Kontaktfläche grundsätzlich anders aus.

einer flachen feuchten Sandpiste (Tiefe 15 cm) mit teilweise gleichen Bereifungen erhoben wurden (Gysi und Grunder 1999), erhält man zwei Wolken von Punkten (Abb. 8). Auf Sand wurde der Einfluss des Reifennendruckes auf die Kontaktfläche für sechs Bereifungen untersucht. Trotz der hohen Abweichungen bei den einzelnen Bereifungen liegen die Werte der Sandpiste deutlich tiefer als beim feuchten Feld. Die beiden Regres-

boden reagieren als Reifenabdruckmedium grundsätzlich **verschieden**. Demzufolge kann der gleiche Steigungsfaktor a für die beiden Untergrundfläche **nicht** eingesetzt werden.

Vergleicht man nun die multiple lineare Regressionsgleichung 5 der Tabelle 3 zur Berechnung der Kontaktfläche mit weiteren Literaturangaben, so lässt sich der Anwendungsbereich unserer Funktionen

Untergrund	Reifeninnendruck [bar]	Radlast [kg]	Kontaktfläche [cm ²]
Sandpiste	1,0	3000	2037 ^(*)
Ackerboden	1,2	2030	2608

Tab. 4: Extrembeispiel zwischen Sandpiste und Ackerboden mit der Bereifung 16.9R38

(*) Messwerte nach Gysi und Grunder, 1999.

Tab. 5: Kontaktflächevergleich zwischen Mess- und Berechnungsangaben (Gl. 6, Tab. 3). Messangabe von Söhne (1953) mit vier Normalquerschnittreifen und drei Klassen von Bodenfestigkeiten.

Bereifungen	Reifeninnendruck [bar]	Radlast [kg]	Messwerte nach Söhne (1953)			berechn. Werte [cm ²]
			Boden hart [cm ²]	Boden normal gelagert [cm ²]	Boden sehr weich [cm ²]	
7-24	0,84	300	214	400	462	358
9-24	0,84	500	357	667	769	615
11-28	0,84	750	536	1000	1155	1020
13-30	0,84	1000	714	1333	1539	1423

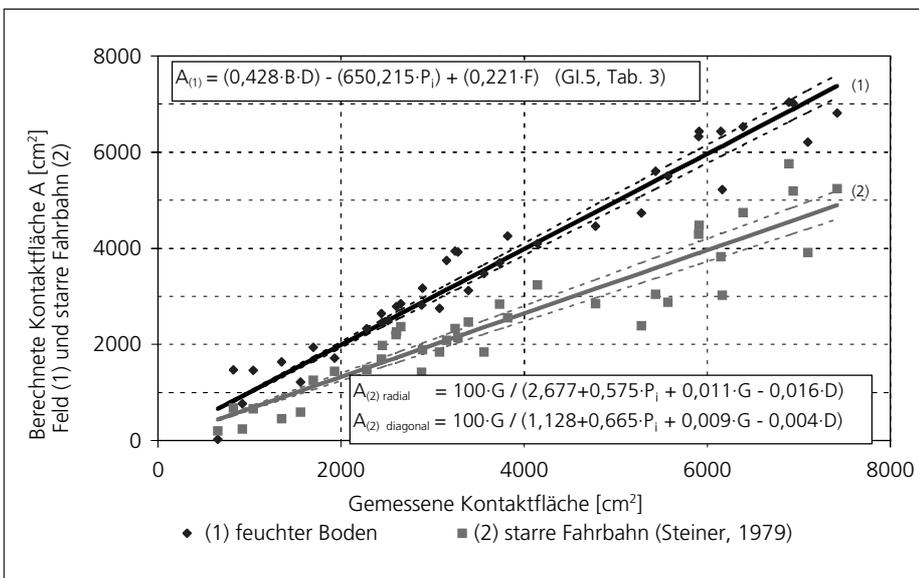


Abb. 9: Algorithmen, die für starren Untergrund berechnet wurden, lassen sich nicht für feuchte Ackerböden anwenden – mit B: Reifenbreite [cm], D: Reifendurchmesser [cm], F: Radlast [kg], G Radlast [kN], Pi: Reifeninnendruck [bar].

bezüglich Bodenfestigkeit nochmals bestätigen. Werden die aus starrem, befestigtem Untergrund abgeleiteten Formeln von Steiner (1979) der Gleichung 5 gegenübergestellt, erhält man mit gleichen Messwerten wiederum zwei Wolken von Punkten (Abb. 9). Bei feuchtem Ackerboden liegen die berechneten Werte **höher** als bei starrer Fahrbahn. Die beiden Regressionsgeraden lassen sich deutlich voneinander trennen. Ein letztes

Beispiel ist durch Söhne (1953) gegeben. Er hat die Kontaktfläche von vier Normalquerschnittreifen aus drei verschiedenen verfestigten Böden gemessen (Tab. 5). Seine Messdaten werden den eigenen berechneten Werten aus der Gleichung 6 (Tab. 3) für Normalquerschnittreifen gegenübergestellt. Bei allen vier Reifendimensionen passen die berechneten Werten eher zu einem sogenannten «normal gelagerten und feuchten Boden».

Anwendungsbereich

Die Gleichungen aus den multiplen linearen Regressionen passen für Reifen mit einem Aussendurchmesser über **130 cm** oder einem Felgendurchmesser mit mindestens **24 Zoll**. Die Feldkontaktflächen von **Lenkungs-, Kleintraktor- oder klein dimensionierten Antriebs- oder Implementreifen** können mit den Gleichungen 6-8 (Tab. 3) **nicht vorbehaltlos** abgeleitet werden, da von kleindimensionierten Bereifungen zu wenig Versuchsdaten vorliegen. Eine grobe Abschätzung mit den Gleichungen 2-4 der gleichen Tabelle ist hingegen möglich. Die Gleichungen aus den multiplen linearen Regressionen können für gross dimensionierte Implementreifen mit Traktionsprofil aber nicht ohne weiteres mit Ribprofil (Nute in der Längsrichtung) eingesetzt werden. Ausserdem zeigt der Vergleich mit Literaturangaben deutlich, dass die hier vorgeschlagenen neuen Gleichungen weder für einen starren noch für einen sehr weichen Boden gelten. Zur **Erfassung** der Kontaktfläche sollte auf jeden Fall die **Bodenfestigkeit** berücksichtigt werden, auch wenn deren Einschätzung nur **annähernd** möglich ist (Saunier et al. 1995).

Schlussfolgerungen

Eine genaue Erfassung der Kontaktfläche lässt sich erst unter Berücksichtigung aller Haupteinflussgrössen wie Bodenfestigkeit, Reifentyp, Reifendimension, Reifeninnendruck und Radlast ermitteln.

Für die Praxis liegen nun neue Gleichungen zur Berechnung der Kontaktfläche unter feuchten Feldverhältnissen angepasst zu Antriebsreifen mit Reifendurchmesser grösser als 130 cm vor (Kästchen 4). Das Beispiel (Tab. 6) belegt, dass die neue vorgeschlagene Rechnungsmethode (Gl. 3, Tab. 6) die Situation in nachgiebigen Böden am besten abbildet.

Wird der mittlere Kontaktdruck beurteilt, gelten folgende Erfahrungswerte: **> 1,5 bar** als hoch und **> 2,0 bar** als sehr hoch. Dieses Beispiel zeigt, dass erst durch eine adäquate Ermittlung der Kontaktfläche eine zutreffende Beurteilung des mittleren Kontaktdruckes im Feld möglich wird.

Terrareifen - 800/45-30.5	Kontaktfläche A [cm ²]	
	bei 1,4 bar / 8850 kg	bei 1,4 bar / 5750 kg
Messwerte	7099	5574
Berechnete Werte*		
(1) $A = B \cdot D / 4$	3236	3236
(2) $A = B \cdot D \cdot 0,44 \cdot D$	5328	5328
(3) $A = (0,420 \cdot B \cdot D) - (1120,680 \cdot P_i) + (0,370 \cdot F)$	6746	5599
	Mittlerer Kontaktdruck σ_0 [bar]	
Berechnung nach den Messwerten	1.22 (mittel)	1.01 (mittel)
Berechnung nach Regressionsfunktionen		
(1)	2,68 (sehr hoch)	1,74 (hoch)
(2)	1,63 (hoch)	1,06 (mittel)
(3)	1,29 (mittel)	1,01 (mittel)

Tab. 6: Beispiel für den Vergleich von gemessenen und berechneten Kenngrößen für die Kontaktfläche und den Kontaktdruck.

- * (1) Gleichung für harte Böden, starre Fahrpiste (McKyes 1985) mit $A =$ Kontaktfläche [cm²];
 $B =$ Reifenbreite [cm]; $D =$ Reifendurchmesser [cm].
 (2) Neue Gleichung für feuchte normalgelagerte Ackerböden mit $A =$ Kontaktfläche [cm²];
 $B =$ Reifenbreite [cm]; $D =$ Reifendurchmesser [cm].
 (3) Neue Gleichung für feuchte, normalgelagerte, nachgiebige Ackerböden für Terrareifen mit
 $A =$ Kontaktfläche [cm²]; $B =$ Reifenbreite [cm]; $D =$ Reifendurchmesser [cm];
 $P_i =$ Reifennendruck [bar]; $F =$ Radlast [kg].

Literatur

Bolling I., 1987. Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen – Neue Mess- und Rechenmethoden – Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG) 133. Dissertation, München.

Browne A., Ludema K.C. und Clark S.K., 1981. Contact between the tire and roadway. In: Soil Compaction in Crop Production B.D. Soane and C. van Ouwerkerk (Editors) 1994 Elsevier Science, Amsterdam, 400 S.

ETRTO, 1996. Standards Manual. The European Tyre and Rim Technical Organisation.

Gysi M. und Grunder F., 1999. Zusammenhang zwischen Kontaktfläche und Pneuenndruck. Agrarforschung 6(1): 9–12.

Inns F. M. und Kilgour J., 1978. Agricultural tyres. London: Dunlop, 1978. 69 S.

Komandi G., 1976. The determination of the deflection, contact area, dimensions, and load carrying capacity for driven pneumatic tires operating on concrete

pavement. Journal of Terramechanics, Vol.13, No1, pp 15–20.

McKyes E., 1985. Soil Cutting and Tillage. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, Developments in Agricultural Science 7, 217 pp.

Saunier P.A., Brassart F. und Oger P., 1995. Reifenaufstandsfläche in lockerem Boden. VDI Berichte Nr.1211, 47-48.

Schwieger H., 1996. Untersuchung neuartiger Laufwerke und lasergestützte Erfassung der Reifen-/ Bodenverformung. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG). Dissertation, Kiel.

Söhne W., 1953. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schleppeireifen. Grdlgn. d. Landtechn. Heft 5/1953, 49–63.

Steiner M., 1979. Analyse, Synthese und Berechnungsmethoden der Triebkraft-Schlupf-Kurve von Luftreifen auf nachgiebigem Boden. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG) 33. Dissertation, München.

Abkürzungen

- A:** Kontaktfläche [cm²]
- B:** Reifenbreite [cm]
- C₁:** Faktor für die Bauart des Reifens; 1,15 für Diagonalreifen, 1,50 für Radialreifen
- C₂:** Faktor für die Felge, 0,87 für normale Felgen, 0,90 für breite Felgen
- D:** Reifendurchmesser [cm]
- F:** Radlast [kg]
- G:** Radlast [kN]
- K:** Faktor nach Komandi (1976) $15 \times 10^{-3} \times (B + 0.42)$
- P_i:** Reifeninnendruck [bar]
- Q:** Radlast [kp]
- Q_{min}:** Radlast bei minimalem Reifeninnendruck gemäss Herstellerangaben [kp]
- b:** Breite der Kontaktfläche [cm]
- d:** Felgendurchmesser [Zoll]
- l:** Länge der Kontaktfläche [cm]
- r:** Reifenradius unbelastet [cm]
- r':** Reifenradius belastet [cm]
- r_r:** Rundungsradius an der Ecke der Kontaktfläche [cm] 13,0–16,5 cm, ≈ 15 cm
- z:** maximale Spurtiefe [cm]
- δ : Einfederung [cm]

Kästchen 4

Formeln im Überblick

Formeln nach Literaturangabe (ohne Anpassungen) zur Berechnung der Kontaktfläche – ein Überblick			
Starre Fahrbahn, harter Boden z/D <= 0,025		Feuchter, normal gelagerter Ackerboden 0,025 < z/D <= 0,05	Weicher Boden z/D > 0,05
1. Kontaktfläche als Funktion der Reifendimension			
Undifferenziert A = B · D/4	[1]	Normalquerschnitt A = 0,34 · B · D Niederquerschnitt A = 0,44 · B · D und Terrareifen	Undifferenziert A = B · D/2 [1]
Undifferenziert A = 0,87 · B · 0,31 · D	[2]		
2. Kontaktfläche als Funktion der Reifendimension, des Reifeninnendrucks und der Radlast			
Diagonalreifen A = 100 · G / (1,128 + [0,665 · P _i] + [0,009 · G] - [0,004 · D])	[3]	Normalquerschnitt* A = (0,260 · B · D) - (295,944 · P _i) + (0,556 · F)	
Radialreifen A = 100 · G / (2,677 + [0,575 · P _i] + [0,011 · G] - [0,016 · D])		Niederquerschnitt* A = (0,416 · B · D) - (457,670 · P _i) + (0,186 · F)	
		Terrareifen* A = (0,420 · B · D) - (1120,680 · P _i) + (0,370 · F)	
3. Kontaktfläche als Funktion der Abdruckdimension, Spurtiefe und Reifenradius			
Undifferenziert A = (l · b · π/4) ≈ π · δ · (D · B) ^{0,5}	[4]	Undifferenziert A = [r ₀ ² - (r ₀ - z) ²] ^{0,5} · b	[7] Undifferenziert A = [r ₀ ² - (r ₀ - z) ²] ^{0,5} · b [7]
Undifferenziert A = (l · b) · (0,858 · r ₀ ²)	[5]	Undifferenziert A = (l · b) · (0,858 · r ₀ ²)	[5] Undifferenziert A = (l · b) · (0,858 · r ₀ ²) [5]
Undifferenziert A = (l · b) · b + [(b ² · π) / 4] wobei	[6]		
r = C ₁ · [Q ^{0,85} / (B ^{0,7} · D ^{0,43} · P _i ^{0,6})] · K			
b = C ₂ · B · P _i ^{-0,14} · [1 - e ^{-Q/0,4Q_{min}}]			
l = 1,7 · [(D - r) · r] ^{0,5}			

[1] McKyes 1985
 [2] Inns und Kilgour 1978
 [3] Steiner 1976
 [4] Browne et al. 1981

[5] Schwieger 1996
 [6] Komandi 1976
 [7] Bolling 1987
 * für Antriebsprofil, D > 130 cm, d >= 24 Zoll