

# Bodenschonende Reifen für Großmaschinen und Schlepper

2.1.2.1 Bodenschonende Reifen für Großmaschinen und Schlepper Seite 339



**Dr. Michael Weißbach**

## **Bodenschonende Reifen für Großmaschinen und Schlepper**

August 2001

Dr. Michael Weißbach ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik der Universität Kiel, Max-Eyth-Str. 6, 24098 Kiel, Tel. 0431-880-1455, Fax. 0431-880-4283, email: [mweissbach@ilv.uni-kiel.de](mailto:mweissbach@ilv.uni-kiel.de)

Herausgeber:

Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft (RKL)

Leiter: Dr. Hardwin Traulsen

Am Kamp 13, 24768 Rendsburg, Tel. 04331-847940, Fax: 04331-847950

Internet: [www.rkl-info.de](http://www.rkl-info.de); E-mail: [mail@rkl-info.de](mailto:mail@rkl-info.de)

Nachdruck, aus auszugsweise, nur mit Zustimmung des Herausgebers

Diese Arbeit wurde aus Mitteln der Prof.-Udo-Riemann-Stiftung gefördert. Ziel der Prof.-Udo-Riemann-Stiftung ist es, angewandte Forschung und praktische Erfahrung auf dem Gebiet der landwirtschaftlichen Verfahrenstechnik zu unterstützen.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	342
2	Entwicklung der Radlasten und Bereifungen.....	343
2.1	Radlasten .....	343
2.1.1	Schlepper .....	343
2.1.2	Mähdrescher .....	345
2.1.3	Feldhäcksler.....	346
2.1.4	Zuckerrübenroder.....	347
2.1.5	Fahrzeuge zur Gülleausbringung .....	349
2.1.6	Transportfahrzeuge (Muldenkipper) .....	350
2.2	Reifen und deren Tragfähigkeit .....	351
2.2.1	Tragfähigkeiten von Ackerschlepperreifen .....	352
2.2.2	Tragfähigkeit von Reifen an Erntemaschinen.....	354
2.2.3	Tragfähigkeit von Anhängerreifen .....	355
3	Messmethodik und Beispiele .....	357
3.1	Bodendruck.....	357
3.2	Porenvolumen und Lagerungsdichte.....	358
3.2.1	Druck und Wurzelentwicklung .....	359
4	Auswirkung der Kontaktfläche von AS-Reifen auf den Boden und die Kraftübertragung .....	360
4.1	Untersuchung der Bereifung für die 100 kW Kasse.....	361
4.1.1	Reifenausstattung .....	361
4.1.2	Varianten des Bodens.....	362
4.1.3	Aufstandsfläche und Kontaktflächendruck .....	363
4.1.4	Spurtiefe.....	364
4.1.5	Bodendruck.....	365
4.2	Zugkraftübertragung.....	369
4.3	Untersuchung der Bereifung für die 170 kW Kasse.....	374
4.3.1	Reifenausstattung .....	374
4.3.2	Aufstandsfläche.....	375
4.3.3	Bodendruck.....	375
4.3.4	Zugkraftübertragung.....	376
5	Mehrfachüberrollung.....	377
5.1	Varianten .....	377
5.2	Standort.....	379
5.3	Spurtiefe.....	380
5.4	Bodendruck .....	380
5.5	Reaktion des Bodens auf das Befahren .....	384
6	Wirkung hoher Radlasten von Erntemaschinen .....	386
6.1	Untersuchungen zu typischen Reifen für Erntemaschinen.....	386
6.1.1	Standort.....	387

6.1.2	Bodendruck.....	387
6.1.3	Einfluß wechselnder Radlast auf den Bodendruck bei gleichem Luftdruck.....	388
6.1.4	Einfluß des Luftdrucks bei gleicher Radlast .....	389
6.1.5	Mehrfachüberrollung bei hoher Radlast und hohem Luftdruck.....	390
7	Allgemeingültige Zusammenhänge .....	392
7.1	Luftdruck .....	392
7.2	Tiefenwirkung .....	393
7.3	Einfluß der Radlast.....	394
7.4	Empfehlungen .....	395

## 1 Einleitung

Der Boden bildet die Produktionsgrundlage der Landwirtschaft. Deshalb ist das Ziel, ihn fachgerecht und schonend zu bewirtschaften. Die Grundsätze zur guten fachlichen Praxis sind im Bodenschutzgesetz §17 formuliert. Für die Umsetzung der guten fachlichen Praxis stehen vielfältige Maßnahmen zum Produktionssystem und zur Technik zur Verfügung. Dennoch kann es zu starker Belastung und daraus resultierender Beanspruchung des Bodens kommen. Hervorgerufen werden diese durch hohe Auflasten von Maschinen und Fahrzeugen, deren häufiges Fahren in der gleichen Spur und Fahren unter ungünstigen Boden- und Witterungsverhältnissen.

Moderne Bereifungen von Großschleppern und leistungsfähigen Arbeitsmaschinen bedürfen einer Analyse. Darin müssen die Reifendimensionen, die Radlast sowie der Bearbeitungszustand des Bodens Berücksichtigung finden.

Angesichts großvolumiger Reifen an Ackerschleppern und leistungsfähigen Arbeitsmaschinen gewinnt die Reifenbreite und die daraus resultierende Aufstandsfläche an Bedeutung.

Bei selbstfahrenden Arbeitsmaschinen mit großem Bunker steht die Abstützung hoher Radlasten im Vordergrund. Hierzu ist die Wirkungsweise der Radlast in die Tiefe sowie deren verdichtende Wirkung zu quantifizieren.

Angesichts der Komplexität von Einflussgrößen des Bodens im Zusammenwirken mit dem Reifen gibt es nicht eine allgemein aussagefähige Messmethode zur Quantifizierung der Bodenbelastung und Bodenbeanspruchung. Vielmehr werden verschiedene Methoden eingesetzt, um die einzelnen Phänomene zu erfassen.

## 2 Entwicklung der Radlasten und Bereifungen

In den letzten Jahren ist die Anzahl leistungsfähiger Maschinen im gesamten Bereich der Landtechnik gestiegen. Das gilt besonders für Schlepper, Arbeitsmaschinen und Transportfahrzeuge. Mit der Kapazität steigen Motorleistung, Eigen- und Nutzmasse. Unter den Arbeitsmaschinen trifft das besonders für solche mit einem eigenen Bunker zu. Mit der Gesamtmasse steigt die Radlast. Daher wird ein Großteil der Maschinen und Transportfahrzeuge heute mit großvolumigen Reifen oder alternativ dazu mit einer zusätzlichen Achse ausgerüstet. Ein erheblicher Teil der Maschinen stößt an die Grenzen der zulässigen Gesamtbreite von landwirtschaftlichen Maschinen, so dass ein Kompromiss zwischen zulässiger Gesamtbreite und optimaler Bereifung gefunden werden muss.

### 2.1 Radlasten

#### 2.1.1 Schlepper

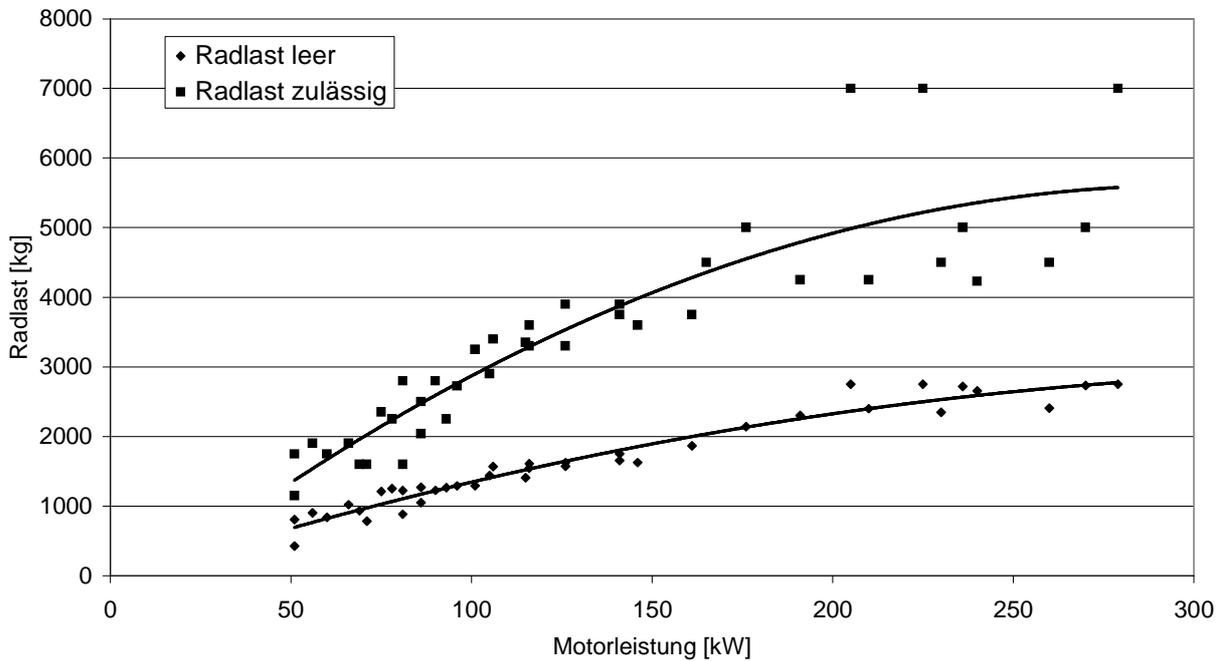
Die Zahl neu zugelassener Schlepper ist in den letzten Jahren rückläufig (Tab. 1). Im Zeitraum von 1990 bis 1998 verringerte sich die Anzahl um rund 10 %. Eine Betrachtung der unterschiedlichen Leistungsklassen zeigt ein sehr differenziertes Bild. In den Leistungsklassen bis 75 kW nimmt die Zahl deutlich ab. Hingegen steigt die Zulassungen bei den leistungsstarken Maschinen mit einer Motorleistung von 100 kW deutlich an.

**Tab. 1:** Entwicklung der Schlepperzulassungen

	30-50 kW	50-75 kW	75-100 kW	100-150 kW	> 150 kW	Gesamt
1990	8570	13910	3683	1421	217	27801
1967	7625	12277	5270	3400	480	29052
1992	6958	11208	5566	366794	650	28049
1993	5845	11721	4822	3189	691	26268
1994	5003	10835	5193	3346	782	25159
1995	4172	11056	4989	3152	984	24353
1996	3570	10606	5815	3844	1217	25052
1997	3512	9652	5892	3557	920	23533
1998	3535	10290	6194	4170	1209	25398

Mit der Motorleistung der Schlepper erhöht sich deren Radlasten. Der Schlepper mit 50 kW stützt ohne zusätzliche Ballastierung rund 1000 kg auf dem Hinterrad ab (Abb. 1). Die Radlast steigt weiter bis auf 2800 kg bei Schleppern mit 250 kW. Noch deutlicher ist die Zunahme der zulässigen Radlast. Sie erreicht bei 250 kW-

Schleppern rund 5000 kg. Die Differenz zwischen der Radlast des nicht belasteten Schleppers und der zulässigen Radlast nimmt mit der Motorleistung deutlich zu. Die Obergrenze für die Straßenfahrt legt die StVZO 10 t fest.

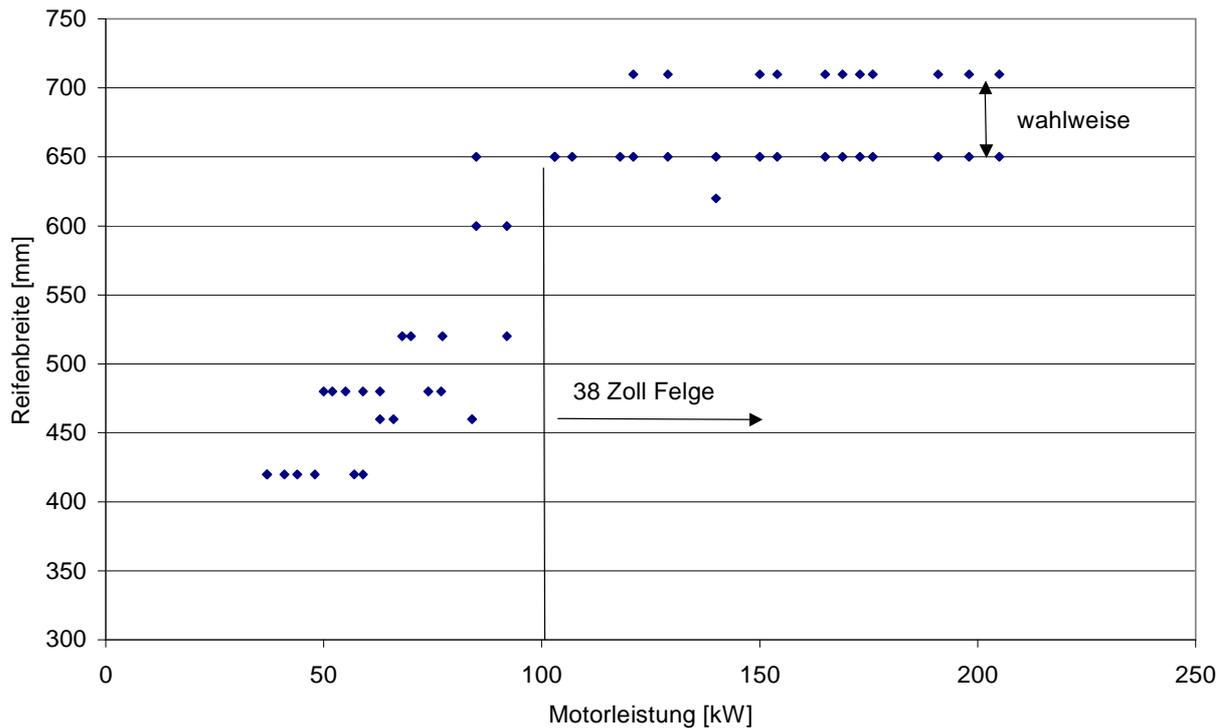


**Abb. 1:** Radlast und Schlepperleistung (Firmenangaben)

Die größer werdenden Schlepper erhalten großvolumigere Reifen. Vereinfacht wird das in der Reifenbreite ausgedrückt. Stellvertretend steht hier die Breite für zunehmende Aufstandsfläche und Tragfähigkeit.

Von 50 bis 70 kW sind Reifen mit 400 bis 500 mm Breite Standard (Abb. 2).

Schlepper ab 100 kW werden bereits mit Reifen von 650 mm Breite ausgerüstet. Ab 130 kW sind für Schlepper auch Reifen mit 710 mm Breite im Angebot. Die Wahl zwischen 650 mm und 710 mm richtet sich in erster Linie nach dem Einsatz des Schleppers. Schlepper die zum Pflügen eingesetzt werden, erhalten schmalere Reifen mit großem Querschnitt, um die hohe Tragfähigkeit zu garantieren. Dieser Reifen passt besser in die Furche.



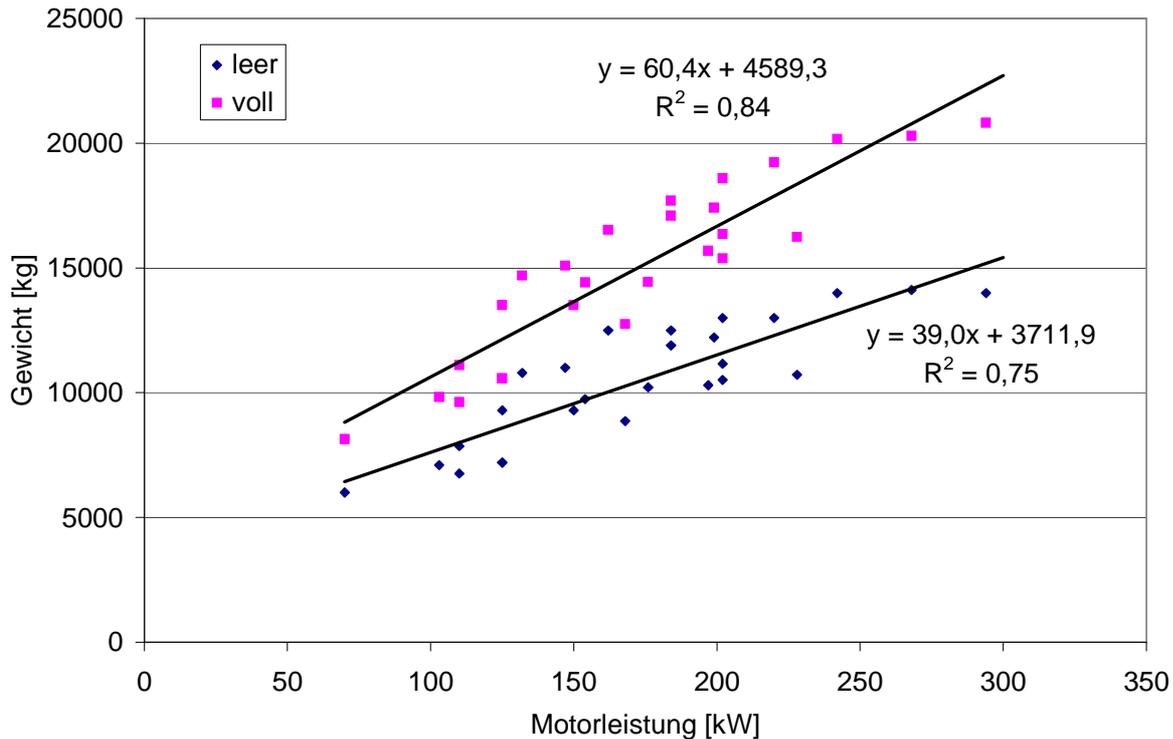
**Abb. 2:** Bereifung und Schlepperleistung (Firmenangaben)

### 2.1.2 Mähdrescher

Die Mähdrescher zeigen eine starke Abhängigkeit der Eigenmasse von der Leistung der Maschine, ausgedrückt in Schnittbreite, Korntankvolumen und Motorleistung. Folglich nimmt das Gesamtgewicht gegenüber dem Leergewicht mit steigender Motorleistung stark zu (Abb. 3).

Einen großen Teil der Masse stützen die Mähdrescher über die Vorderachse auf den Boden ab. Bei gefülltem Bunker erreichen die Achslasten der Vorderachse das Niveau des Leergewichtes der gesamten Maschinen. Die Radlasten steigen vorn bis 7,5 t.

Mit leerem Bunker und angebautem Schneidwerk (2 t) beträgt die Achslastverteilung 75 : 25 %. Der Bunker ist so auf der Maschine angeordnet, dass sich die Radlastverteilung nicht mit dem Füllgewicht ändert.



**Abb. 3:** Gewicht und Motorleistung von Mähdreschern

Der Bereifung sind aufgrund von Gesetzgebung und Chassisbreite Grenzen gesetzt. Größtenteils können nur Reifen mit einer Gesamtbreite von 620 bis 690 mm Breite Verwendung finden. Eine Gesamtbreite des Mähdreschers von 3,5 m ist dann schon erreicht. Die Reifenhöhe, also der Durchmesser, ist ebenfalls von der spezifischen Bauweise des Mähdreschers begrenzt. Daher werden hauptsächlich Reifen mit einem Innendurchmesser von 32 bis 34“ verwendet. Das ermöglicht bei gegebenem Außendurchmesser einen großen Reifenquerschnitt und ein hohes Luftvolumen.

### 2.1.3 Feldhäcksler

Feldhäcksler erreichen Leistungen von 200 bis 400 kW. Unabhängig von der Motorleistung wiegt die Basismaschine rund 10 t (Abb. 4).

Der Pickup- oder Maisvorsatz erhöht die Vorderachslast bis 13,5 t. Eine Zusatzballstrierung an der Hinterachse gleicht die stark ausladende Frontbelastung aus. Eine Achslastverteilung von 70 : 30 % wird eingehalten und so die Lenksicherheit gewährleistet. Die Gesamtmasse steigt bis 18 t an. Die Gesamtbreite der Maschine engt auch hier die Dimension der Reifen auf 650 mm, selten bis 800 mm ein.

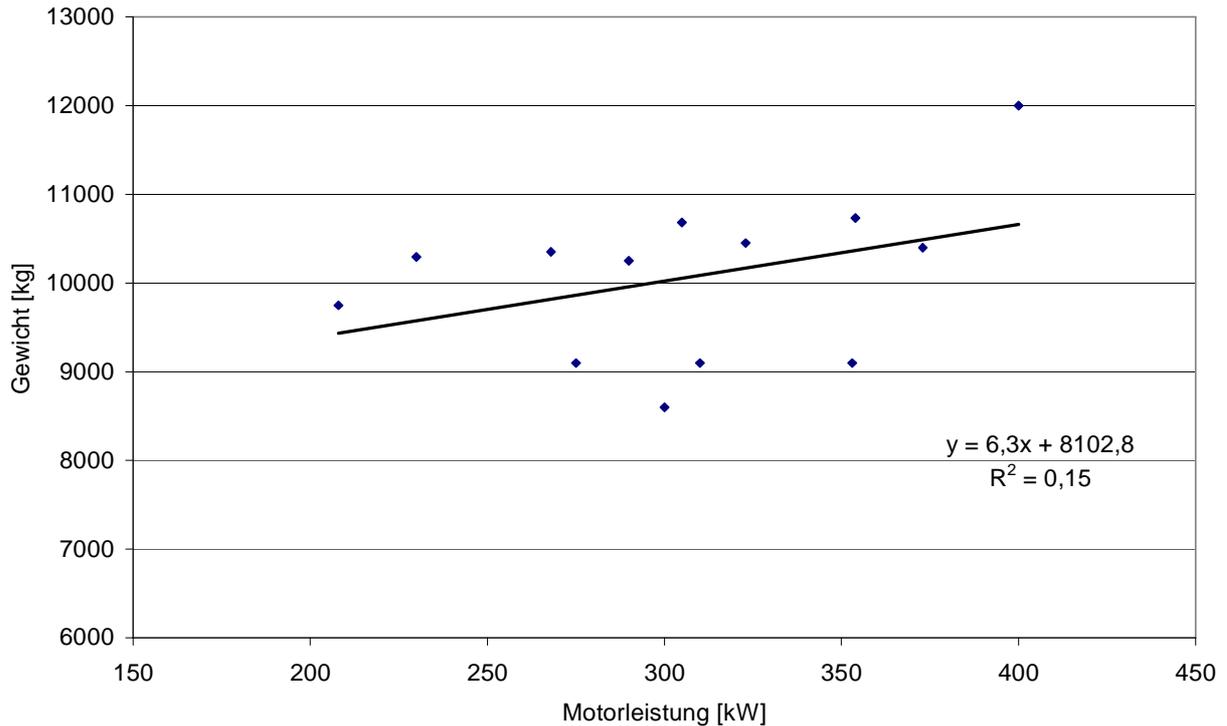


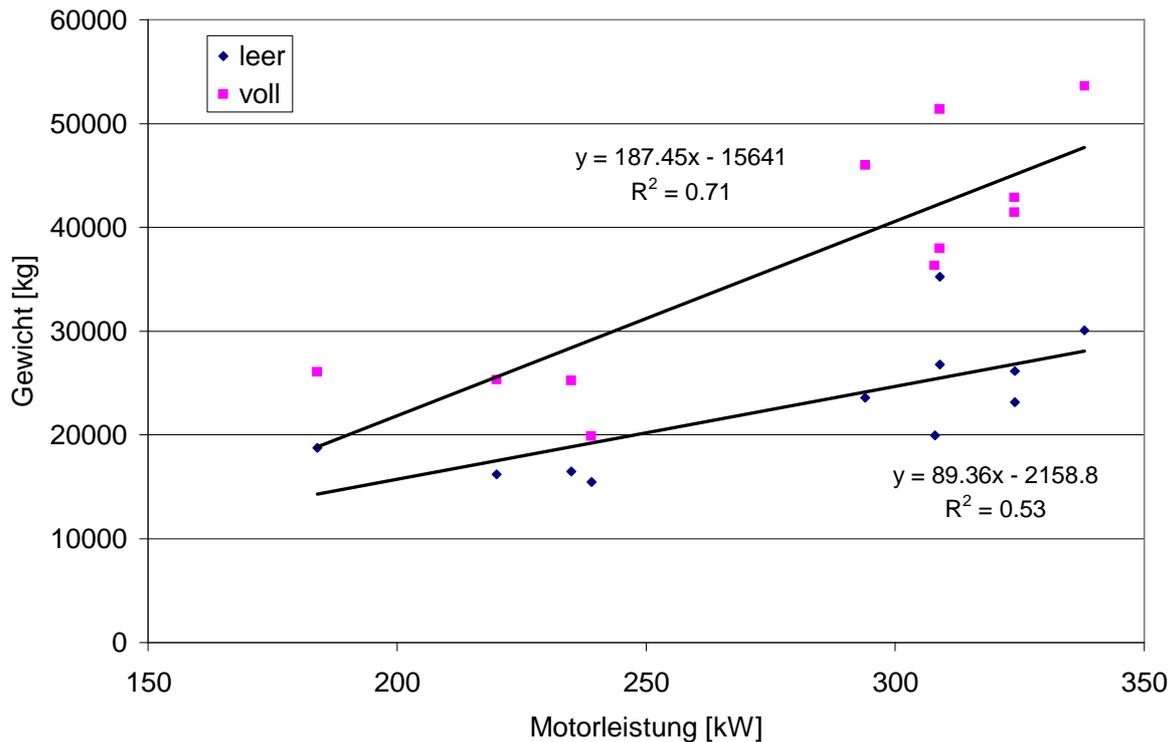
Abb. 4: Gewicht und Motorleistung von Feldhäckslern

### 2.1.4 Zuckerrübenroder

In der Zuckerrübenernte nimmt der Anteil 6-reihig selbstfahrender Köpfrödebunker zu. Im gesamten Bundesgebiet werden mit diesem Verfahren bereits über 60 % der Anbaufläche geerntet. In Schleswig Holstein beträgt der Anteil nahe 100 %.

Gezogene 2- und 3-reihige Systeme haben eine mittlere Radlast bei leerem Bunker von 3 t. Die Bunkergröße beeinflusst die Radlasten. Sie steigen am 2-Reiher bis auf 4 t und am 3-Reiher bis auf 6 t an. Die Bunker der gezogenen Systeme sind meist asymmetrisch über den Rode- und Reinigungsaggregaten angeordnet, so dass Radlasten bis 6 t am 2-Reiher und bis 8 t am 3-Reiher auftreten.

6-reihige selbstfahrende Köpfrödebunker erreichen die höchsten Maschinenmassen mit über 50 t (Abb. 5). Mit der Motorleistung steigt auch bei dieser Maschinengruppe das Gewicht. Mit dem Gesamtgewicht, letztlich der Bunkergröße, steigt die Flächenleistung. Für einen größeren Durchsatz wird die höhere Motorleistung nötig.



**Abb. 5:** Gewicht und Motorleistung von 6-reihigen Rübenrodern

Bunkergröße und Leergewicht der Maschinen stehen im engen Verhältnis. Schon bei kleinem Bunkern von 5 bis 10 t haben die Roder Leergewichte von 16 t. Das begründet sich durch die Rode- und Reinigungsorgane.

Um die Einzelradlasten sowie die Flächenbelastung so gering wie möglich zu halten, verfolgen die Hersteller unterschiedliche Konzepte. Bis zur Gesamtmasse von 42 t werden hauptsächlich 4-Rad-Maschinen eingesetzt. Darüber hinaus wird die Last auf 5 oder 6 Räder verteilt. Mit der Anordnung der Achsen bzw. Räder zueinander wird Einfluss auf die Überrollhäufigkeit der einzelnen Flächenanteile genommen.

Die höchste Radlast mit bis zu 11,5 t erreichen im beladenen Zustand Roder mit zwei Achsen und großem Bunker. Geringe Unterschiede zwischen der linken und rechten Seite entstehen durch das einseitig angebrachte Überladeband.

Das Ideal wäre, alle Räder gleichmäßig zu belasten. Diese Forderung erfüllen nur sehr wenige Maschinen. Bei der überwiegenden Zahl treten aufgrund der spezifischen Bauweise der Roder große Unterschiede auf.

Je nach Bunkergröße unterscheidet sich die Achslastverteilung. Roder mit großem Bunker (17,4 t) haben eine sehr ausgewogene Achslastverteilung von 56 : 54. Hingegen stützen Roder mit kleinerem Bunker (8 t) rund 77 % der Gesamtmasse über die Vorderachse auf den Boden ab.

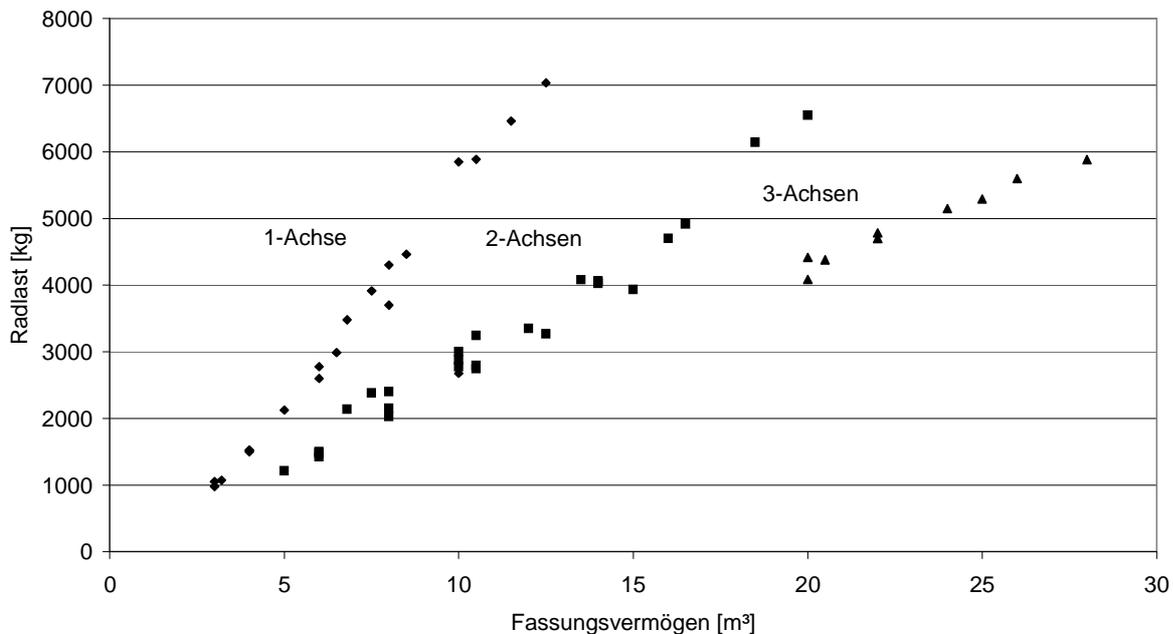
Roder mit 5 oder 6 Rädern erreiche eine nahezu gleichmäßige Radlastverteilung.

Die Bereifung der Roder reicht von 710 mm bis 1050 mm Breite.

### 2.1.5 Fahrzeuge zur Gülleausbringung

In der Gülleausbringung werden hohe Massen auf der Straße und auf dem Acker transportiert. Unterteilen lassen sich die Systeme in gezogene Tankwagen und Selbstfahrer. Die Tankwagen haben 1, 2 oder 3-Achsen. Bei den Selbstfahrern sind 3 bis 5 Rad-Fahrzeuge im Einsatz.

Bis zu einem Fassungsvermögen von 12 m<sup>3</sup> werden die Tankwagen sowohl mit Einzel- als auch mit Doppelachse eingesetzt (Abb. 6).



**Abb. 6:** Radlasten von gezogenen Gülletankwagen

Am 1-Achser reichen die Radlasten bis 7 t, wobei für die Fahrt auf der Straße die Obergrenze von 5 t Rad- bzw. 10 t Achslast gilt.

Den größten Bereich bezüglich des Fassungsvermögens von 5 bis 20 m<sup>3</sup> decken die 2-Achser ab. Erwartungsgemäß halbieren sich die Radlasten gegenüber dem 1-Achser bei gleicher Transportkapazität. Die Radlasten steigen auch hier bis zu 6,5 t an. Über 20 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen kommen ausschließlich 3-Achs-Tankwagen zum Einsatz.

Bis zu einer Radlast von 5 t sind die Gülletankwagen hauptsächlich mit 500 – 600 mm breiten Reifen ausgerüstet. Darüber hinaus werden vereinzelt Reifen mit einer Breite von 700 – 800 mm Breite angeboten, hauptsächlich aber 24“ (609 mm) Radialreifen.

Selbstfahrer haben mit 9 – 14 m<sup>3</sup> deutlich kleinere Fassvolumina. Sowohl das Leergewicht als auch das Gewicht der beladenen Fahrzeuge sind beachtlich: die Spannweite reicht von 13 bis 20 t bei leerem und von 24 bis 31 t bei vollem Fahrzeug.

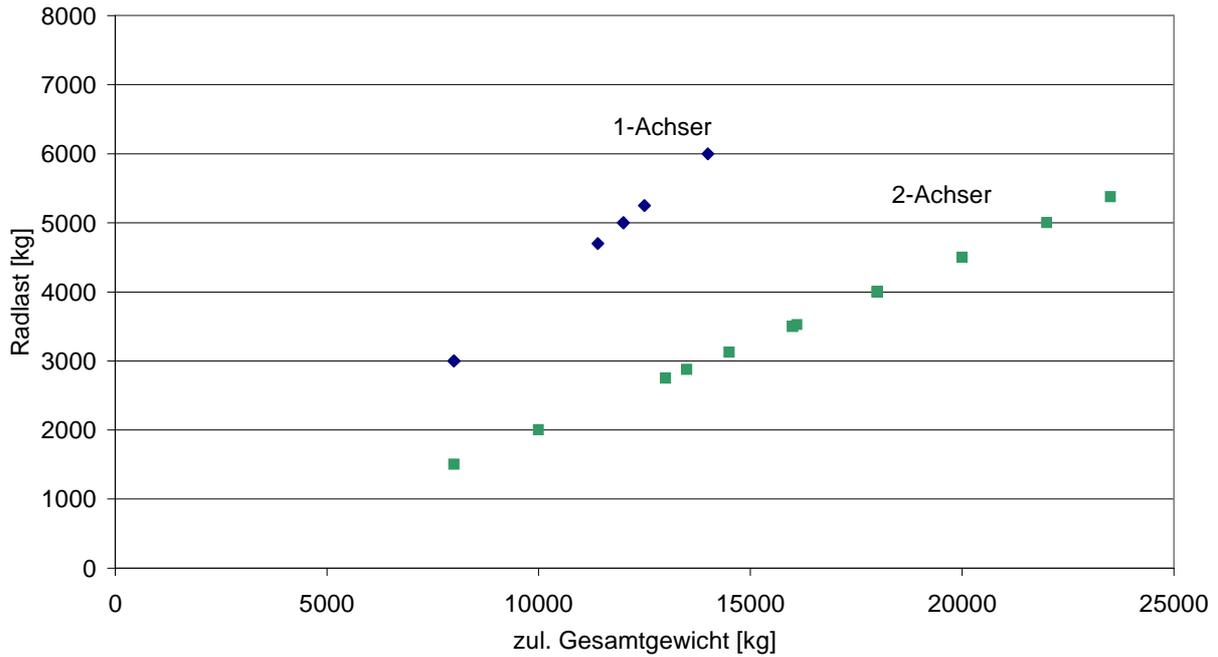
Die Fahrzeuge selbst werden als 3- oder 4-Rad-Maschinen angeboten. An den unbeladenen Selbstfahrer betragen die Radlasten zwischen 3,7 – 7 t. Sie steigen im beladenen Zustand auf 7 bis 11 t an und erreichen die Größenordnungen der Rübenroder. Die Selbstfahrer sind hauptsächlich mit Diagonal-Terrareifen von 1100 mm Breite ausgerüstet.

### **2.1.6 Transportfahrzeuge (Muldenkipper)**

Für den Transport hoher Massen auf dem Feld (z.B. Rübenernte) und zwischen Feld und Hof werden hauptsächlich Muldenkipper eingesetzt. Sie verfügen, vergleichbar den Gülletankwagen, über 1 bis 3 Achsen.

Die Nutzmasse des 1-Achser reicht bis 9 t. Bereits ab 5 t Nutzmasse werden Muldenkipper mit Doppelachse angeboten. Abhängig von der Ausstattung steigt das zul. Gesamtgewicht über 20 t an. Die Radlast erhöht sich nur begrenzt mit dem Gesamtgewicht, denn das Fahrwerk ändert sich vom 1-Achser zum 2-Achser (Abb. 7). Die Radlasten erreichen die Größenordnungen der Gülletankwagen.

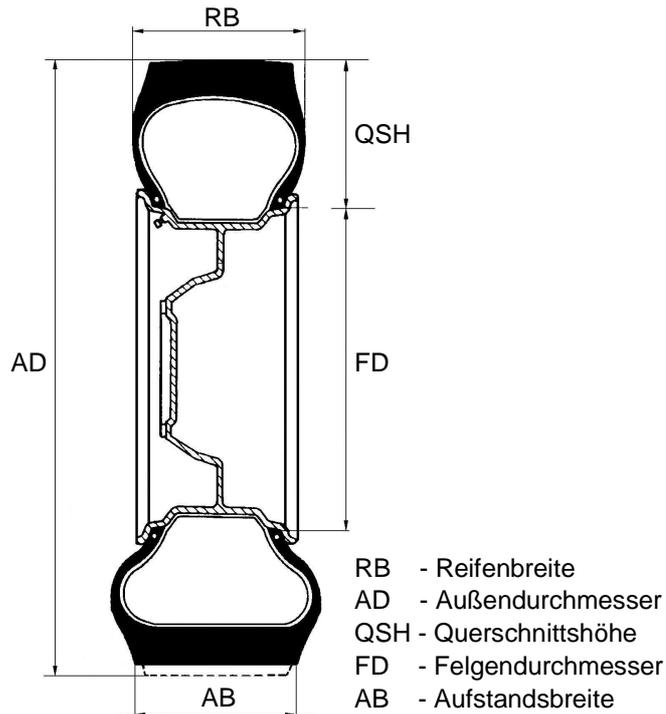
Die Reifenbreiten am 1-Achser reichen von 380 bis 550 mm. Der 2-Achser erhält Reifen mit 385 bis 700 mm Breite, wobei die Breite von 550 mm vorherrscht.



**Abb. 7:** Gesamtgewicht und Radlast von Muldenkippern

## 2.2 Reifen und deren Tragfähigkeit

Landwirtschaftsreifen unterscheiden sich von anderen Reifengruppen, da sie unterschiedliche Aufgaben auf dem Feld und der Straße erfüllen müssen. Für die Tragfähigkeit relevante Größen sind der Reifendurchmesser, die Reifenbreite, das Querschnittsverhältnis, die Lagenzahl sowie der Felgendurchmesser (Abb. 8). Die Reifenbreite ist die Gesamtbreite des Reifens und breiter als die tatsächliche Aufstandsweite des Reifens.



**Abb. 8:** Radabmessungen

Reifen lassen sich in Diagonal- und Radialreifen unterteilen. Hauptsächlich Vorteile der Radialreifen sind ein geringerer Rollwiderstand, besonders wichtig bei hohen Geschwindigkeiten um 50 km/h und eine höhere Tragfähigkeit bei gleicher Reifendimension. Nicht nur die Aufstandsfläche des Radialreifens ist größer, sondern der Radialreifen hat in der Kontaktfläche gegenüber dem Diagonalreifen eine bessere Druckverteilung. Speziell auf dem Acker wirkt der Vorteil einer großen Aufstandsfläche.

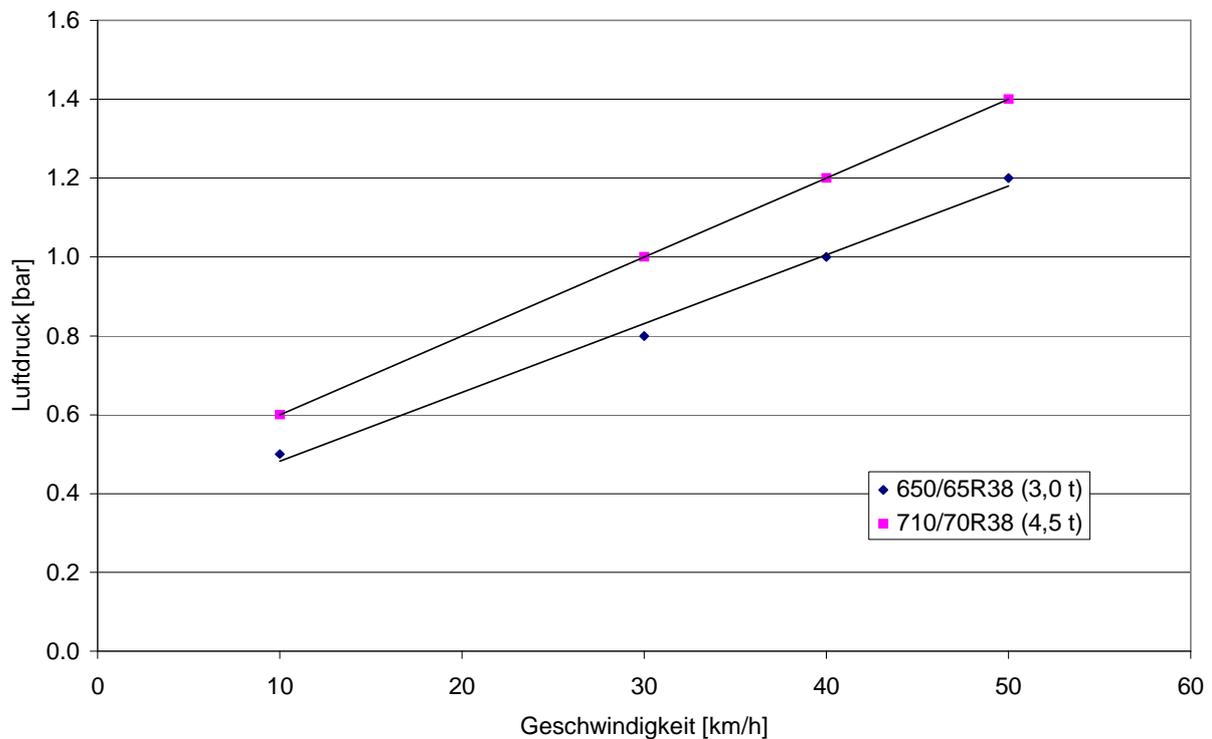
Für die Wirkung auf den Boden ist nicht der mittlere oder rechnerische Kontaktflächendruck entscheidend, sondern der maximale, an einer in der Kontaktfläche auftretenden Stelle maßgeblich. Den Vorteilen gegenüber steht der höhere Anschaffungspreis von Radialreifen und die höhere Empfindlichkeit der Seitenwand gegenüber Steinen oder beim Einsatz im Forst.

### 2.2.1 Tragfähigkeiten von Ackerschlepperreifen

Reifen sind so konzipiert, dass die Luft im Reifen die Last trägt. Je höher das Luftvolumen, um so größer ist die Tragfähigkeit. So kann bei steigendem Luftvolumen und gleicher Radlast der Luftdruck (Reifeninnendruck) abgesenkt werden.

Mit Blick auf den Boden sollte der Reifen mit dem niedrigsten Luftdruck, den der Hersteller zulässt, gefahren werden. Der Reifen federt so optimal ein und realisiert eine große Aufstandsfläche, auf der sich die Last gleichmäßig verteilt. Mit steigender Geschwindigkeit muß der Luftdruck angehoben oder die Radlast entsprechend verringert werden, um Beschädigungen des Reifens zu vermeiden.

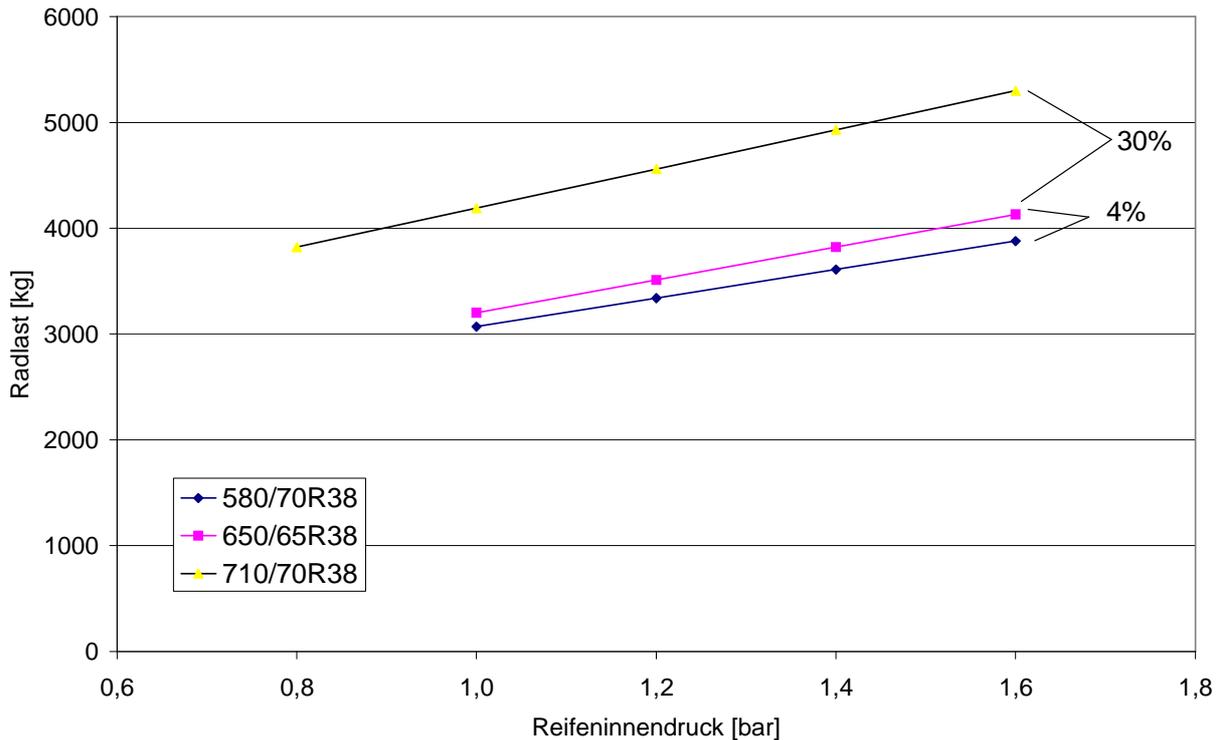
Traktoren fahren in einem sehr großen Geschwindigkeitsbereich: auf dem Acker mit 10 km/h auf der Straße bis 50 km/h (Abb. 9). So muß am Beispiel des Reifens 650/65R38 als typischer Reifen für die 100 kW-Klasse der Luftdruck pro 10 km/h um 0,2 bar erhöht werden. Das gleiche gilt für den großvolumigeren Reifen 710/70R38 als Vertreter des 170 kW-Schleppers.



**Abb. 9:** Zusammenhang zwischen Luftdruck und Geschwindigkeit (Firmenangaben)

In der Regel wird der für die maximale Geschwindigkeit notwendige Reifeninnendruck eingestellt.

Große Luftvolumina im Reifen werden durch größere Breite oder Durchmesser erzielt. Die dadurch zu erreichenden Effekte sind jedoch stark vom Reifenkonzept, dem Querschnitt und dem Aufbau abhängig (Abb. 10).



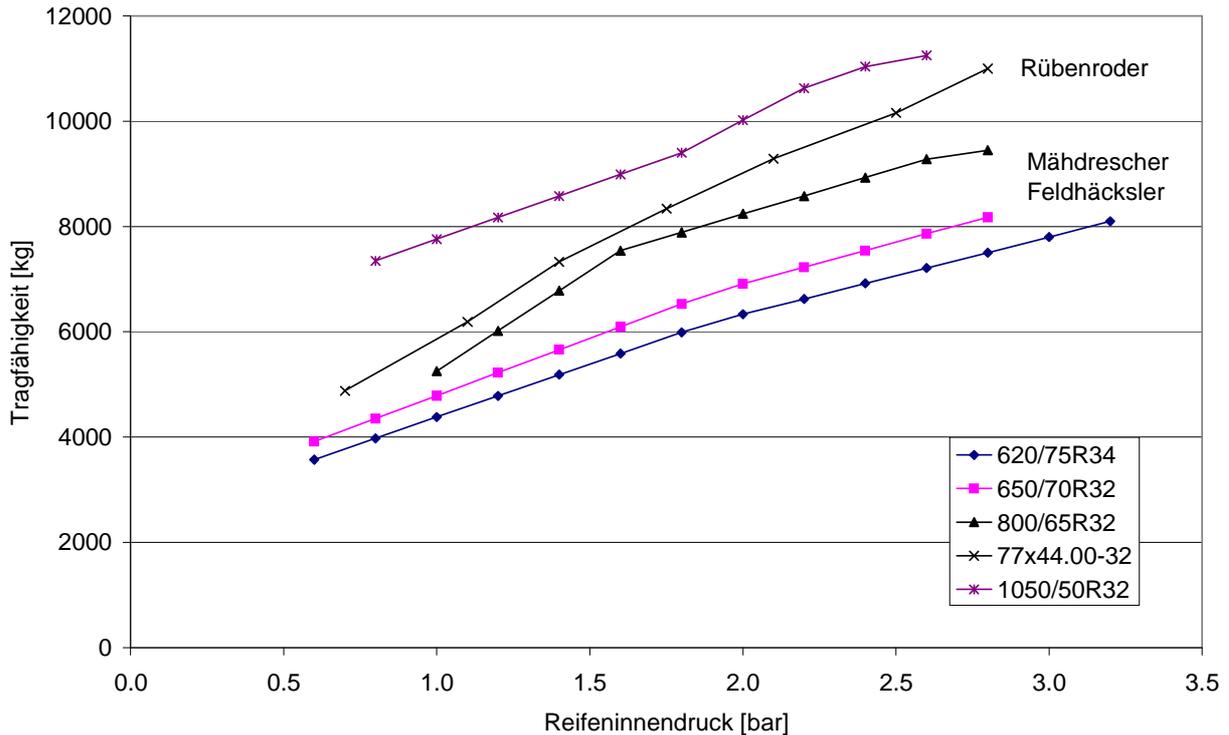
**Abb. 10:** Tragfähigkeit unterschiedlicher AS-Radialreifen ( $v=50$  km/h)

Ein 650er Reifen mit 65 % Querschnitt ist gegenüber einem 580er Reifen mit 70 % Querschnitt tatsächlich nur 53 mm breiter. Außerdem ist der Außendurchmesser des breiteren 650er Reifens um 15 mm kleiner. Der daraus resultierende Zuwachs an Tragfähigkeit beträgt nur 4 %. Der 710er Reifen mit 70 % Querschnitt bringt gegenüber dem 650er Reifen (65 % Querschnitt) 30 % höhere Tragfähigkeit. Hier wirken sich die um 47 mm gestiegene Breite und der um 10 mm größere Durchmesser aus.

## 2.2.2 Tragfähigkeit von Reifen an Erntemaschinen

Erntemaschinen fahren im Gegensatz zum Ackerschlepper in einem wesentlich engerem Geschwindigkeitsbereich (bis 20 km/h). Sie erreichen die hohen Radlasten nur (mit Ausnahme der Feldhäcksler) bei niedrigen Geschwindigkeiten auf dem Feld.

620 bis 650 mm breite Reifen sind speziell für Mähdrescher vorgesehen. Deren Tragfähigkeit reicht von 4000 bis 8000 kg (Abb. 11). Für die hohe Last von 7500 kg, einer typischen Radlast von Mähdreschern, ist ein hoher Luftdruck von 2,5 bar notwendig. Eine Alternative dazu wäre der 800 mm breite Reifen.



**Abb. 11:** Tragfähigkeit unterschiedlicher Reifen für Erntemaschinen ( $v=10$  km/h)

Er findet sowohl am Mährescher; Feldhäcksler und Rübenroder seine Einsatzschwerpunkte. Die gleiche Tragfähigkeit von 7500 kg kann dieser Reifen schon mit 1,6 bar Luftdruck realisieren.

Terrareifen, sowohl Diagonal als auch Radial, finden ihr Hauptanwendungsfeld am Rübenroder und Gülle-Selbstfahrer. Im zyklischen Lasteinsatz sind diese Reifen bis 12 t freigegeben.

Bei gleichem Fülldruck kann ein 1050/50R32 Terrareifen gegenüber dem 650 mm breiten Reifen das 1,5 fache Gewicht auf den Boden abstützen.

Der Vorteil einer radialen Bauweise werden aus Abbildung 11 sichtbar. Die Tragfähigkeit des Radialreifens (1050/50R32) ist gegenüber dem Diagonalreifen (77\*44.00-32) um 15 % höher.

### 2.2.3 Tragfähigkeit von Anhängerreifen

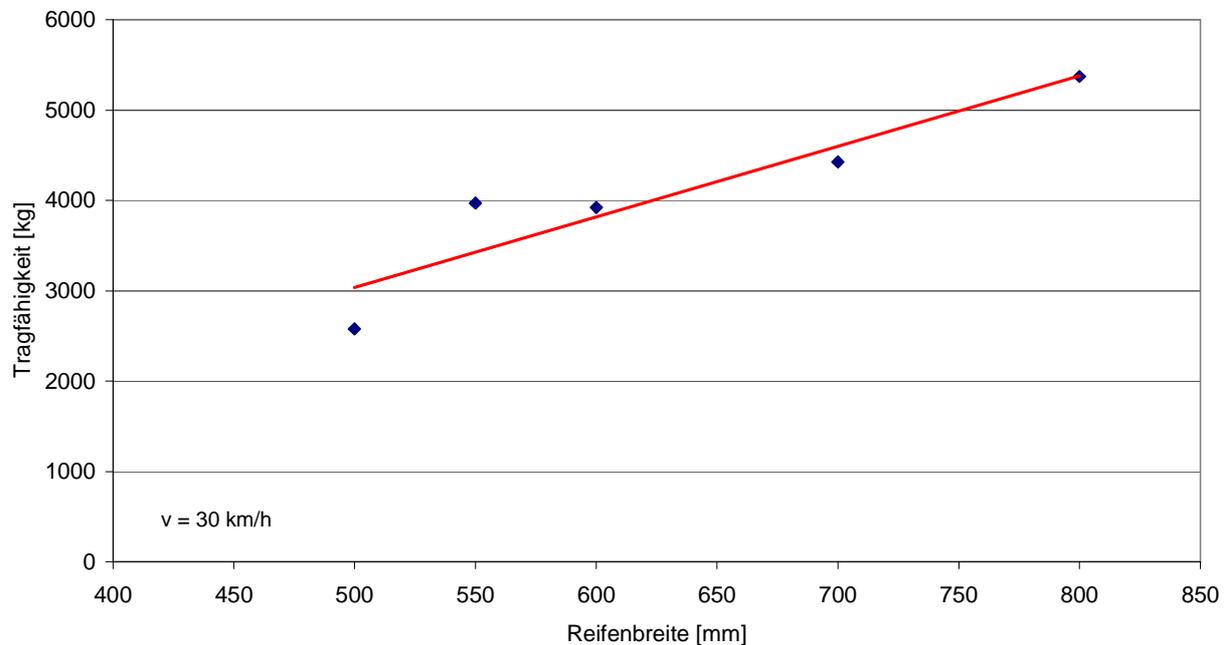
Bereifungen für Anhänger, Güllewagen und Kompoststreuer sind aufgrund des vorhandenen Bauraumes und eines möglichst niedrigen Schwerpunktes in ihrem Außendurchmesser begrenzt. Ein hohes Luftvolumen wird über die Breite und einen niedrigen Reifeninnendurchmesser von 22,5 Zoll realisiert. Im Vergleich zu einem

AS-Reifen gleicher Breite beträgt das Luftvolumen nur rund 50 bis 60 %. Dementsprechend niedriger ist die Tragfähigkeit.

Die Tragfähigkeiten der einzelnen Reifen selbst differieren je nach Hersteller und Aufbau, speziell der Lagenzahl.

Generell steigt bei Anhängerreifen die Tragfähigkeit unabhängig vom Querschnittsverhältnis und Felgendurchmesser. Bezogen auf eine Maximalgeschwindigkeit von 30 km/h erhöht sich die Tragfähigkeit pro 100 mm Reifenbreite um 800 kg (Abb. 12).

Welche Reifen letztlich am Fahrzeug eingesetzt werden können, hängt von der Breite und dem zur Verfügung stehenden Bauvolumen am Anhänger ab.



**Abb. 12:** Mit der Reifenbreite steigt die Tragfähigkeit (nach Firmenangaben)

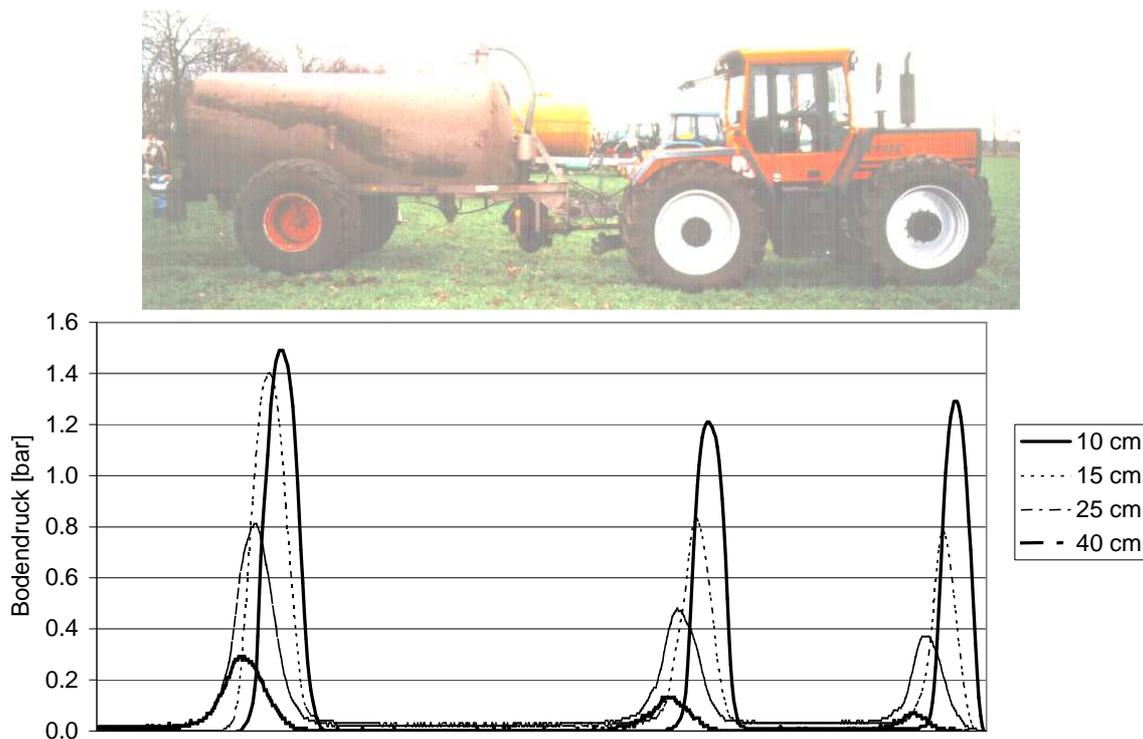
### 3 Messmethodik und Beispiele

#### 3.1 Bodendruck

Der aus Radlast, Aufstandsfläche und Luftdruck resultierende Druck wirkt in die Tiefe. Er kann mit geeigneten Sensoren im naturbelassenen Boden in der Krume wie auch im Unterboden gemessen werden. Das Meßsystem mit Schlauchsonden hat sich dafür bewährt. Es erlaubt eine große Zahl an Wiederholungen und vergleichenden Messungen unter den prozeßtechnischen Gegebenheiten der Praxis.

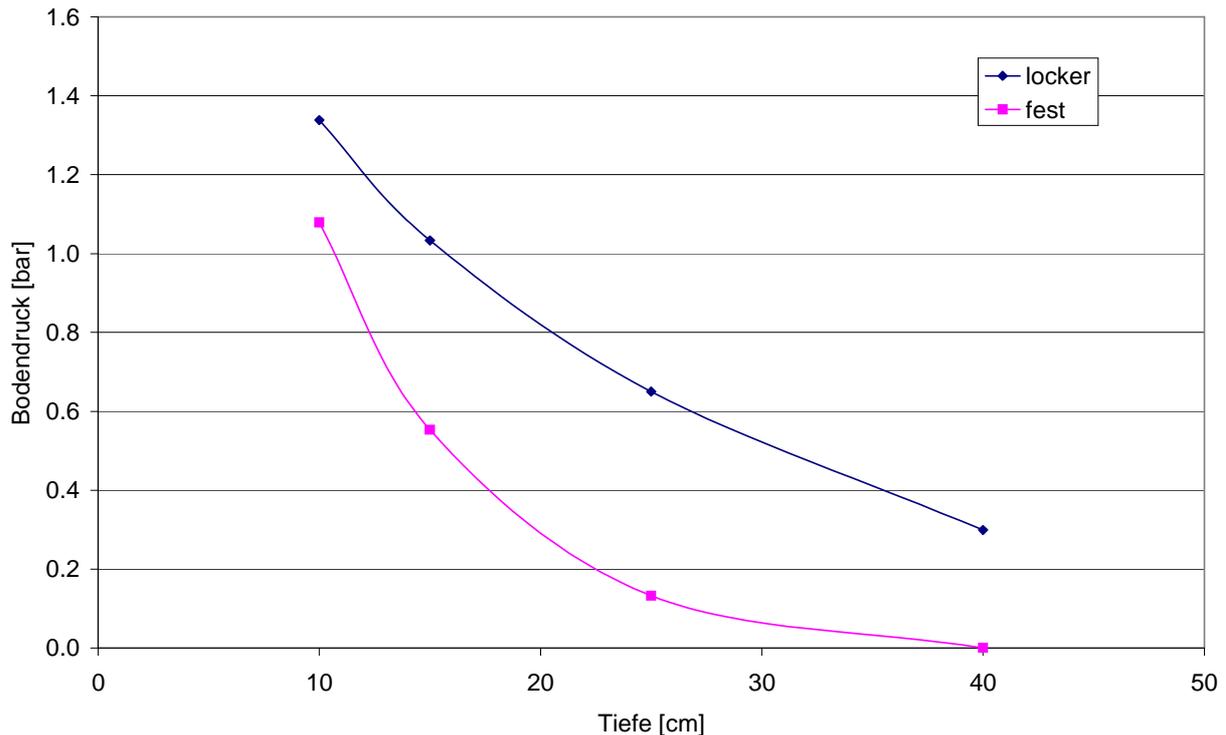
Der Sensor gibt einen Mittelwert für den Druck aus verschiedenen Richtungen wieder.

Die elektronische Meßwerterfassung erlaubt es, die additive Wirkung aufeinanderfolgender Räder zu erfassen. Als Beispiel ist der Druckverlauf unter einem Schlepper mit Gülletankwagen dargestellt (Abb. 13).



**Abb. 13:** Bodendruckverlauf unter einem Schlepper mit Gülletankwagen während der Fahrt

Für die Auswertung wird der Druck über die Tiefe aufgetragen. Der Druckverlauf im Boden ist im besonderen Maße von der Bodenfestigkeit abhängig. Auf lockerem Boden geht (unter gleichen Reifen) der Druck mit der Tiefe annähernd linear ab. Auf abgesetzten Boden nimmt der Druck mit der Tiefe überproportional ab (Abb. 14).



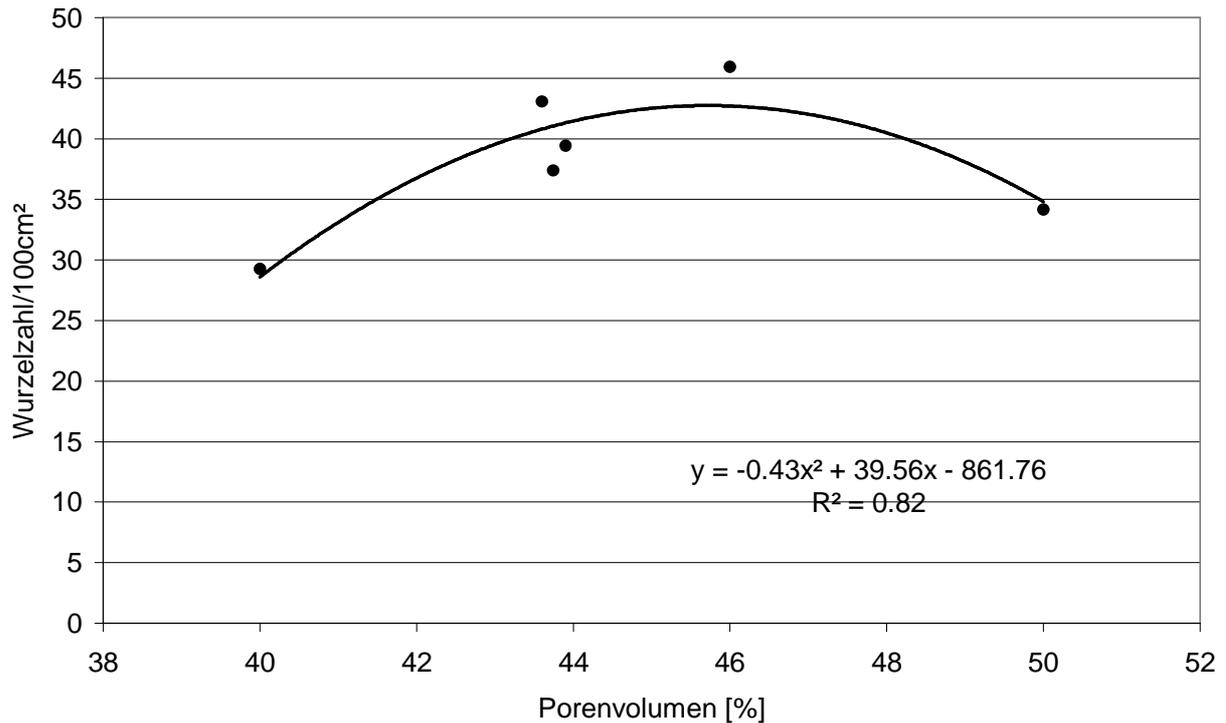
**Abb. 14:** Bodendruck bei verschiedenen Bodenzuständen

Die Meßwerte korrelieren gut mit dem Luftdruck und Parametern des Bodens. Somit schafft diese landtechnisch geprägte Methode eine direkte Aussage zu der in den Boden eingebrachten Energie. Die Höhe der eingeleiteten Energie bestimmt, ob die Bodenparameter sich bleibend ändern.

### 3.2 Porenvolumen und Lagerungsdichte

Porenvolumen und Lagerungsdichte beschreiben den physikalischen Bodenzustand. Sie geben Auskunft, ob der Boden sich in einem optimalen oder verdichteten Zustand befindet. Die Poren werden nach unterschiedlicher Größe gruppiert. Besonders die Grobporen ( $>50 \mu\text{m}$ ) sind für die Funktionalität und das Verdichtungsverhalten bedeutsam.

Das Porenvolumen wirkt auf die Entwicklung und das Wachstum der Pflanzen. Je nach Bodenart ist ein entsprechendes Porenvolumen für ein optimales Pflanzenwachstum Voraussetzung. Sowohl ein zu hohes Porenvolumen als auch ein zu niedriges beeinträchtigen das Wachstum. Im hier vorliegenden Beispiel liegt der Optimalbereich des Porenvolumens zwischen 43 und 47%. (Abb. 15).



**Abb. 15:** Einfluss des Porenvolumens auf die Wurzelentwicklung

Die Probenahme erfolgt auf dem Acker mit Stechzylindern je 100 cm<sup>3</sup> in mehrfacher Wiederholung und in unmittelbarer Nähe zu einander, da die Heterogenität des Bodens zur Streuung der Ergebnisse führt.

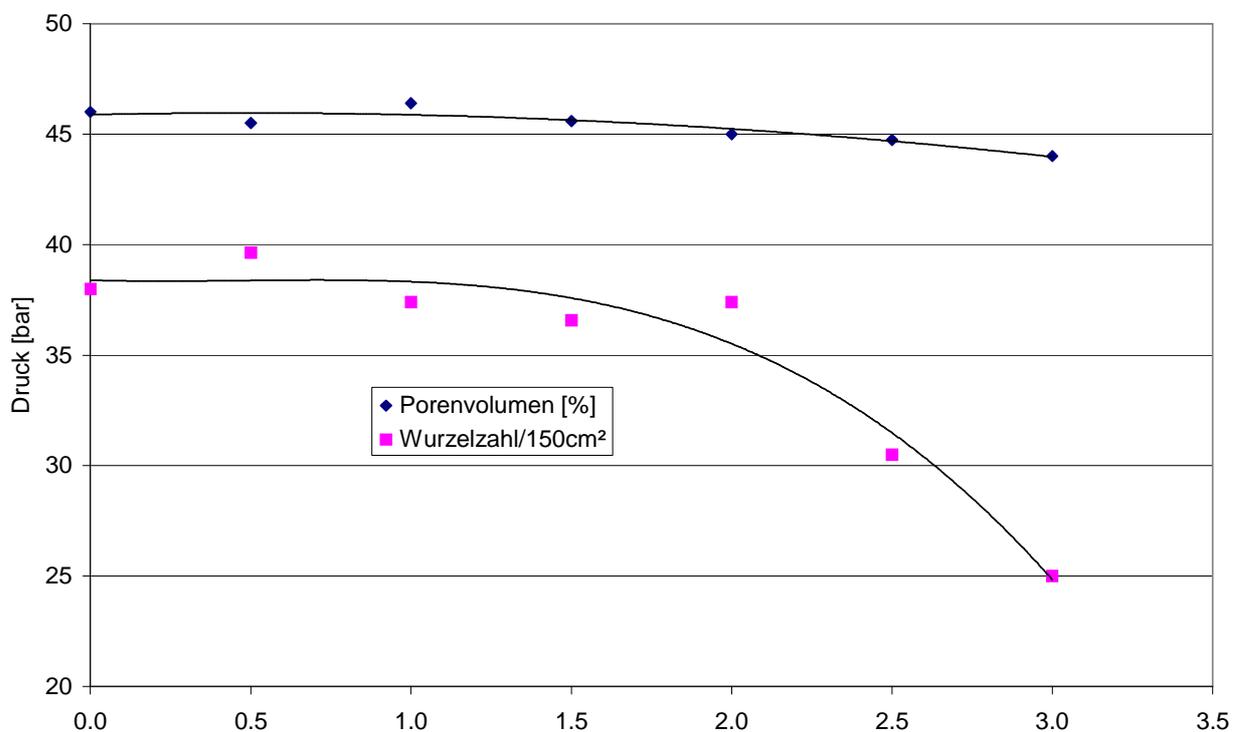
Das Porenvolumen steht in enger Beziehung zum gemessenen Bodendruck. Auf lockerem Boden, zum Zeitpunkt der Bestellung führt bereits ein geringer Druck >1 bar (bei 75% Feldkapazität) zu einer deutlichen Minderung des Porenvolumens. Zur Ernte befindet sich der Boden in einem tragfähigen Zustand. Hier werden deutlich höhere Drucke benötigt >2 bar (bei 80% Feldkapazität), um den Boden nachhaltig zu verdichten.

### 3.2.1 Druck und Wurzelentwicklung

Bei all der Vielfalt physikalisch bestimmter Methoden erscheint es wesentlich, das pflanzenbauliche Wachstum als Indikator für die Eigenschaft des Bodens einzubeziehen. Das geschieht unter einheitlichen Bedingungen im Labor, aber mit ungestörten Proben vom Feld. Diese Proben werden von den Messstellen der Varianten unbefahren und Spur in definierten Tiefen auf dem Acker im Stechzylinder entnommen.

Auf die einzelnen Stechzylinder wird einheitliches, vorgekeimtes Saatgut gegeben, 20 Keimlinge auf insgesamt 150 cm<sup>2</sup>. Die Wurzeln durchdringen den Boden je nach seiner Dichte unterschiedlich. Somit gibt die Zahl der Wurzeln, die nach 10 Tagen aus dem unten offenen Zylinder gewachsen sind, ein physiologisches Maß für die Verdichtung [5].

Beide Parameter Porenvolumen und Durchwurzelung stehen im engen Verhältnis zum Bodendruck ( Abb. 16). Bis zu einem bestimmten Druck werden auf dem abgesetzten Boden beide Parameter nicht beeinflusst. Im dargestellten Beispiel, ein abgesetzter Boden, reagieren die Wurzeln erst ab einem Druck von > 2,0 bar.



**Abb. 16:** Auswirkung des Bodendrucks auf Porenvolumen und Wurzelwachstum

#### 4 Auswirkung der Kontaktfläche von AS-Reifen auf den Boden und die Kraftübertragung

Die große Kontaktfläche vermindert die Bodenbelastung und trägt gleichzeitig zur Verbesserung der Zugkraft bei. Inwieweit das unterschiedliche Reifen realisieren können, soll in diesem Kapitel beschrieben werden.

Die Vergrößerung der Kontaktfläche wird über den Reifendurchmesser, das Querschnittsverhältnis oder über die Breite des Reifens erreicht. Eine Verbreiterung

der Reifen ist dabei die effektivste Möglichkeit. Generell führt die Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche bei gleicher Radlast zu einer Abnahme des Kontaktflächendrucks. Das größere Luftvolumen im Reifen ermöglicht es, den Luftdruck zu senken.

Ziel dieses Kapitels ist es, den Einfluß unterschiedlicher Reifenbreiten auf Bodendruck und Zugkraft für zwei unterschiedliche Schlepperleistungsklassen (100 kW und 170kW) zu untersuchen und zwar in einem sensiblen Bereich des Bodens: bei relativ hohem Wassergehalt, nach krumentief wendender Bearbeitung.

## 4.1 Untersuchung der Bereifung für die 100 kW Kasse

### 4.1.1 Reifenausstattung

Schlepper mit 100 kW Motorleistung gewinnen im Marktanteil und innerhalb von Arbeitsverfahren an Bedeutung. In der Reifenausstattung befinden sie sich am Übergang zu den großdimensionierten Reifen (s. Abb. 2). Als Standardreifen gilt die Größe 20.8R38. Er wird ebenfalls als Zwilling eingesetzt. Als Breitreifen wurden die Größen 650/65R38 und 800/65R32 gewählt (Tab. 2). Der 650er Reifen ist im Gegensatz zu seiner Beschreibung tatsächlich nur 615 mm breit. Der 800 mm breite Reifen ist kein reiner Schlepperreifen, sondern hauptsächlich für Erntemaschinen entwickelt.

Diese Reifen wurden am gleichen Schlepper mit 100 kW Motorleistung montiert. Bei der Auswahl der Reifen wurde auf den annähernd gleichen Außendurchmesser mit 1842 mm geachtet. Die gewählte Radlast betrug 3 t und entspricht dem mittleren Wert lt. Abb. 1 dieser Leistungsklasse bei Belastung.

**Tab. 2:** Parameter der eingesetzten Reifen

	Standardreifen	Zwillingsreifen	Breitreifen	Superbreitreifen
Reifen	20.8R38	2x20.8R38	650/65R38	800/65R32
Luftdruck (30km/h)	1,1	0,6	0,8	0,5
Reifenbreite (mm)	550	2x550	615	800

Der Luftdruck orientierte sich an den Empfehlungen des Herstellers für 30 km/h und die gewählte Radlast von 3 t. Die zugrunde gelegte Geschwindigkeit berücksichtigt den starken Wechsel zwischen Straße und Feld. In einem zusätzlichen Versuch wurde bei gleicher Radlast der Luftdruck variiert, um zu untersuchen, welche Auswirkung auf den Bodendruck und die Zugkraftübertragung zu erwarten sind.

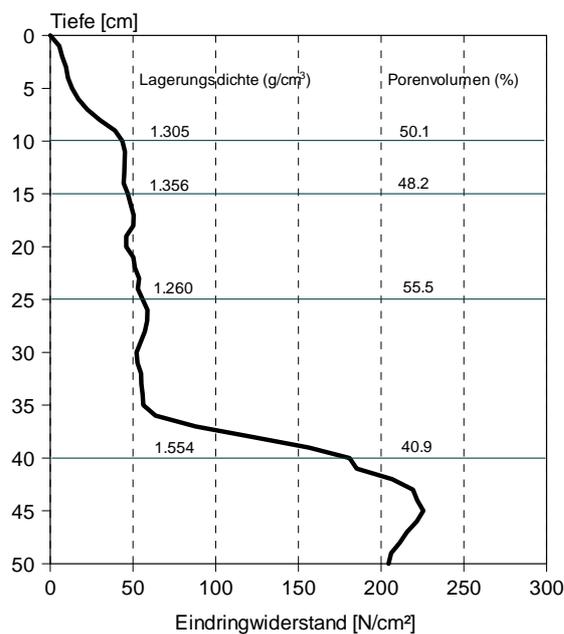
### 4.1.2 Varianten des Bodens

Der Boden sollte in Struktur und Feuchte sensibel sein, um den Zustand zum Zeitpunkt der Bestellung zu charakterisieren. Die Versuchsfläche, ein schwach lehmiger Sand (sL2), hatte zum Versuchszeitpunkt eine Bodenfeuchte von 75% FK, entsprechend 75 % der Wassersättigung. In Anlehnung an die Grenzen für die Bearbeitbarkeit liegt er im Bereich der beginnenden Bearbeitungsfähigkeit.

Die Untersuchungsfläche bietet 2 Varianten: eine gelockerte, erkennbar an dem niedrigen Eindringwiderstand von 50 N/cm<sup>2</sup> und eine abgesetzte, mit einem mittleren Eindringwiderstand von 180 N/cm<sup>2</sup>.

Der Boden der gelockerten Variante ist über die gesamte Arbeitstiefe des Pfluges auf 32 cm gleichmäßig gelockert (Abb. 17). Dementsprechend hoch ist das Porenvolumen.

Im ungelockerten Unterboden lagert der Boden erheblich dichter, das Porenvolumen liegt mit 40% um 10%-Punkte niedriger.



**Abb. 17:** Eindringwiderstand und Porenvolumen der gepflügten Versuchsfläche

Die Messungen zu Bodendruck und -verdichtung werden ausschließlich auf dem gelockerten Boden durchgeführt. Er reagiert im Sinne des Vergleiches ausreichend sensibel. Für die Zugkraftmessungen liegen Ergebnisse sowohl von der gelockerten als auch der festen Bodenvariante vor.

### 4.1.3 Aufstandsfläche und Kontaktflächendruck

Die Aufstandsfläche wächst mit der Reifendimension und sinkendem Luftdruck. Die Messwerte für den um 6,5 cm (also 11 %) breiteren Breitreifen weisen gegenüber dem Standardreifen eine 30 % größere Fläche nach (Tab. 3). Sie ist für den Superbreitreifen um 86 % größer. Wird die Standardbereifung als Zwillingsbereifung montiert, vergrößert sich die Aufstandsfläche auf 224 %, bedingt durch die Luftdruckabsenkung.

Neben der Reifenverbreiterung wirkt der Luftdruck auf die Aufstandsfläche. Ein um 0,5 bar überhöhter Reifeninnendruck verringert beim Standardreifen die Aufstandsfläche um 500 und beim Breitreifen um 1000 cm<sup>2</sup>, das entspricht jeweils 13 %.

Die auf den Boden einwirkende Kraft resultiert aus der Radlast, die sich über eine große Aufstandsfläche verteilt. Der Quotient aus beiden bildet den errechneten mittleren Kontaktflächendruck (Tab.3). Er liegt unterhalb und teilweise nur halb so hoch wie der Luftdruck.

**Tab. 3:** Kontaktflächen/ -drücke

	Standard- reifen		Zwillingsreifen		Breitreifen		Superbreit- reifen
Luftdruck [bar]	1,1	1,6	2 x 0,6	2 x 1,5	0,8	1,3	0,4
Kontaktfläche [cm <sup>2</sup> ] gemessen	4456	3900	10000	7000	5793	4799	8314
errechnet	4959	4144	10170		6500	5040	8904
rechn. Kontakt- flächendruck [bar]	0.7	0,8	0.3	0,4	0.5	0,6	0.4

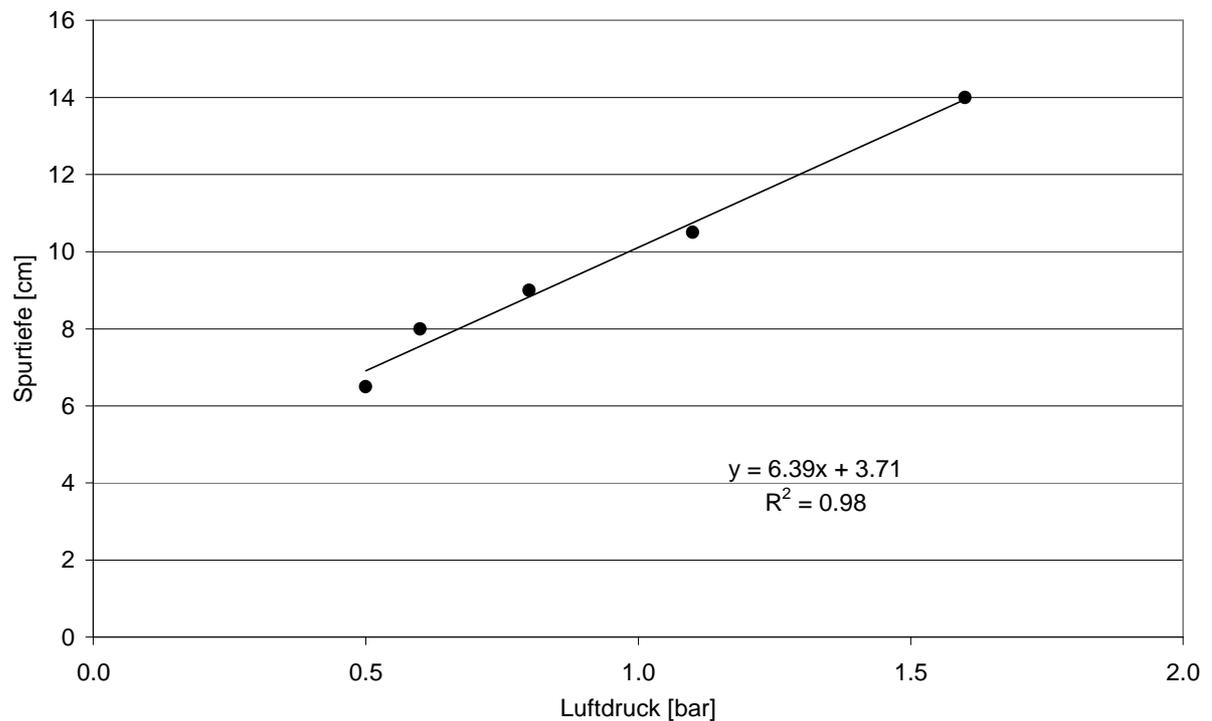
Die Aufstandsfläche wird am Einsatzort gemessen. Dazu wird der Reifen mit einem Farbstoff umstäubt und anschließend der Abdruck vermessen. Für den Praktiker wesentlich einfacher ist es in etwa die Länge und Breite zu vermessen, denn Radialreifen haben eine nahezu rechteckige Aufstands-Kontur. Die Kontaktflächengröße kann so näherungsweise aus dem Produkt von Länge und Breite gebildet werden. Die Differenzen zur tatsächlich ausgemessenen Kontaktfläche betragen dabei zwischen 5 und 12%. Generell ist das Vermessen der Kontaktfläche sehr aufwendig, und deren Aussagekraft wenig ergiebig. Viel wichtiger und für den Praktiker auch leichter zu erfassen ist der Luftdruck und dessen Einflüsse auf die unterschiedlichen Parameter.

#### 4.1.4 Spurtiefe

Die Spurtiefe ist unmittelbar nach der Befahrung der erste Anhaltspunkt zur Reaktion des Bodens auf das Befahren.

Der Standardreifen mit überhöhtem Luftdruck von 1,6 bar und reduzierter Kontaktfläche sinkt 14 cm tief in den Boden ein. Für den praktischen Einsatz, z.B. bei Bestellarbeiten, ist dieser Wert nicht akzeptabel. Durch eine Luftdruckabsenkung um 0,5 bar auf den angepassten Luftdruck flacht die Spur auf 10,5 cm Tiefe ab. Der geringe Luftdruck von 0,5 bar der Superbreitbereifung verringert die Spurtiefe auf 6 cm. Hier sinken lediglich die Stollen ein. Reifen mit angepasstem Luftdruck hinterlassen einen ebenen Spurquerschnitt, d.h. Spurmitte und Spurrand haben die gleiche Tiefe. Ein zu hoher Luftdruck verhindert, dass der Reifen in der Mitte abplattet, entsprechend konkav wird der Spurquerschnitt, die Spur folglich tiefer.

Zwischen Luftdruck und Spurtiefe besteht im Messbereich ein enger Zusammenhang. Eine Erhöhung des Luftdruckes hat auf lockerem Boden den linearen Anstieg der Spurtiefe zur Folge (Abb. 18)



**Abb. 18:** Reifeninnendruck und Spurtiefe der Versuchsreifen

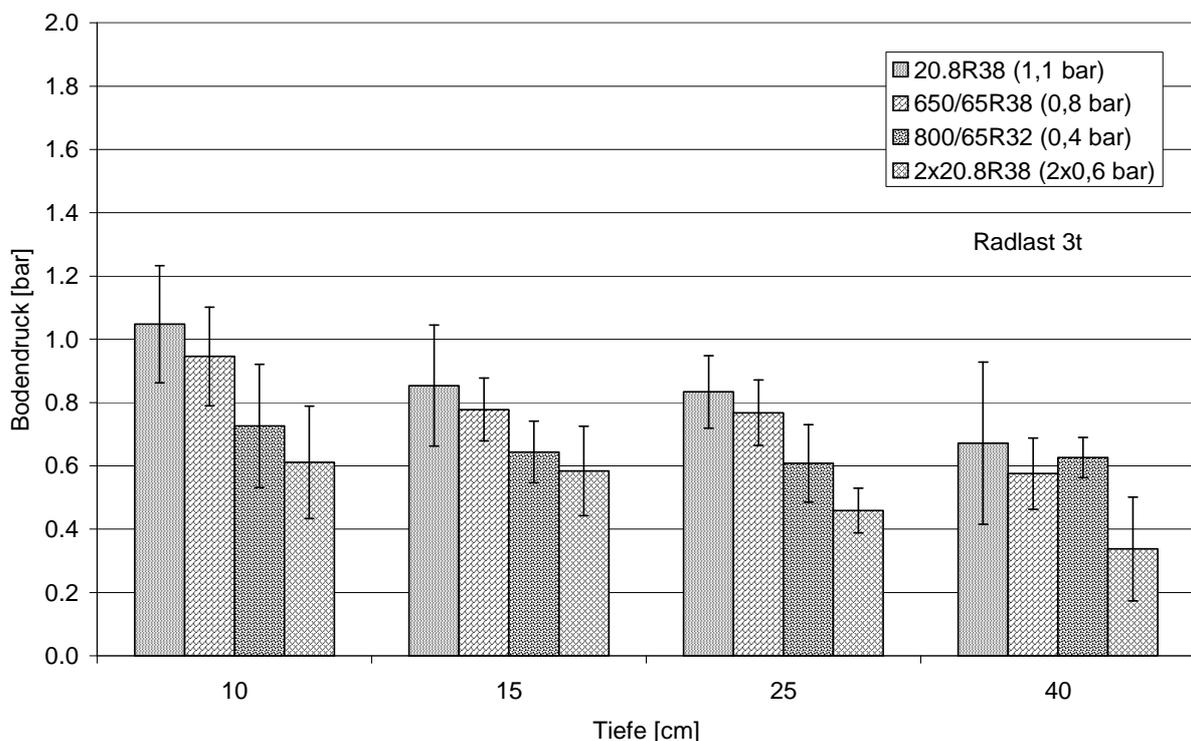
### 4.1.5 Bodendruck

Ziel soll es sein, dass bereits der Kontaktflächendruck des Reifens niedrig ist und der Druck über die Tiefe schnell abnimmt.

Jeder Messung liegen 8 Wiederholungen zugrunde.

Zwischen den beiden Bodenhorizonten, Krume und Unterboden ist keine Änderung im Abbauverhalten festzustellen. Der Grund ist in der gleichmäßigen Durchfeuchtung des Bodens zu finden (Abb. 19).

Zwischen den einzelnen Reifen treten Unterschiede auf. Der Luftdruck der Bereifungsvarianten beeinflusst den Druckverlauf. Unter dem schmalen Standardreifen mit einem Luftdruck von 1,1 bar ist der Bodendruck erwartungsgemäß auch am höchsten, etwas geringer beim Breitreifen.



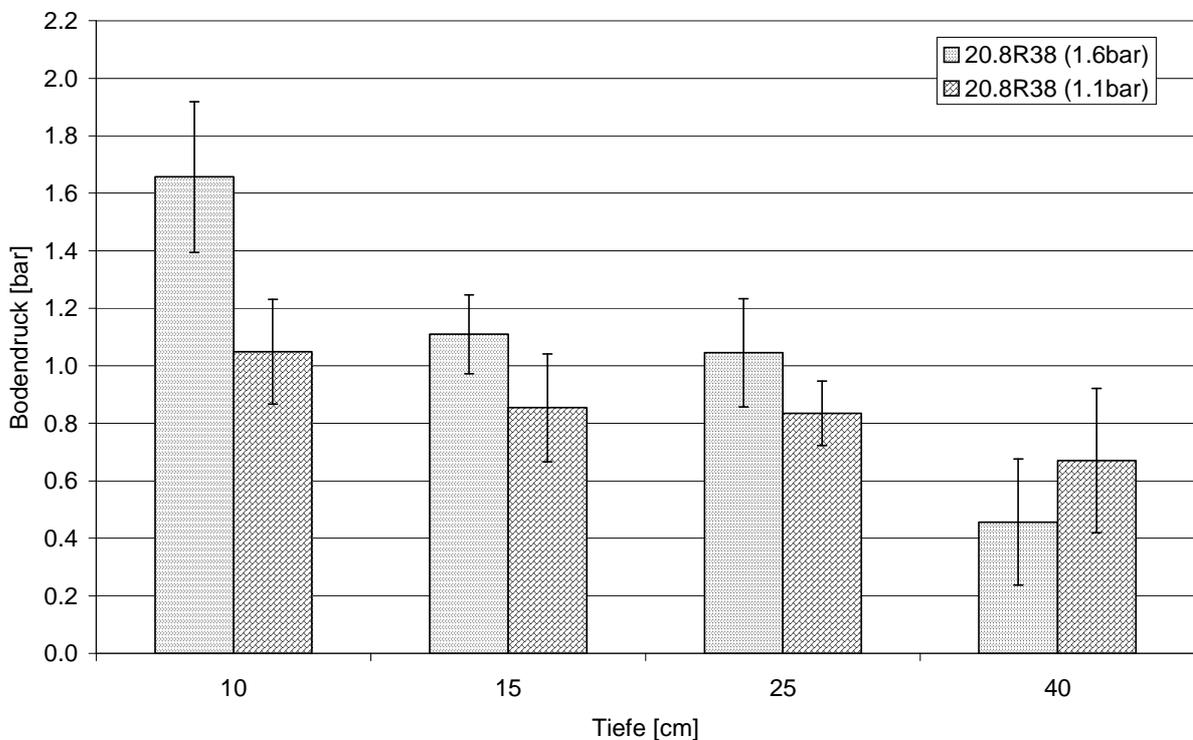
**Abb. 19:** Bodendruck der unterschiedlichen Reifen auf lockerem Boden (n=4)

Der Bodendruck unter dem Superbreitreifen mit dem niedrigsten Reifeninnendruck ist gegenüber dem Breitreifen nur geringfügig niedriger. In allen Messtiefen liegt der Bodendruck über dem Luftdruck des jeweiligen Reifens. Dieser Reifen ist an der unteren Grenze seiner Tragfähigkeit, die bis 10 t Radlast reicht. Entsprechend fester ist dessen Karkasse. Ein größerer Teil der Radlast wird nicht über den Luftdruck sondern den Reifen, speziell der Reifenseitenwand, getragen.

Die Unterschiede zwischen den Reifenvarianten beschränken sich mit Ausnahme der Zwillingsbereifung auf den Bearbeitungshorizont. In 40 cm Tiefe beträgt der mittlere Bodendruck 0,6 bar.

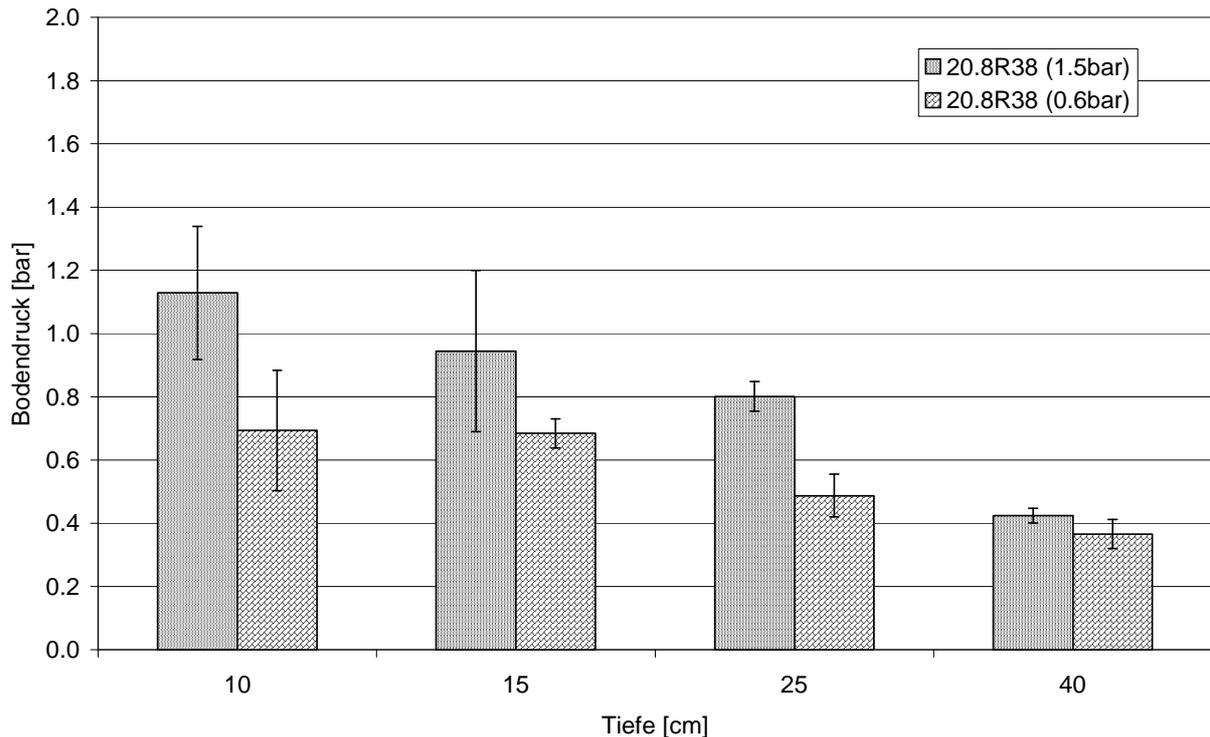
Unter der Zwillingsbereifung mit dem geringsten Reifeninnendruck ist der Bodendruck erwartungsgemäß am niedrigsten. Er nimmt mit der Tiefe nahezu linear ab und erreicht in 40 cm einen geringen Wert von 0,35 bar. Damit ist Druck im Unterboden gegenüber den anderen Reifen um die Hälfte niedriger.

Eine spezifische Wirkung im oberflächennahen Bereich zeigt die Variante des Standardreifens mit überhöhtem Luftdruck (Abb. 20). Die Unterschiede erstrecken sich über die gesamte Ackerkrume. Erst im Unterboden nähern sich die Werte beider Luftdruckvarianten an.



**Abb. 20:** Auswirkung eines überhöhten Luftdruckes am Standardreifen

Ein derartiger Effekt gilt auch für die Zwillingsbereifung. Sind die Luftdrücke von beiden Reifen eines Zwillingspaares angepaßt, verteilt sich der Bodendruck unter beiden Reifen gleichmäßig. Wird jedoch der eine Reifen mit niedrigem und der zweite mit hohem Luftdruck gefahren, ändert sich das Einfederungsverhalten. Die Last stützt sich hauptsächlich über den steiferen, mit zu hohem Luftdruck gefüllten Reifen ab (Abb. 21). Die Wirkung dieser Variante beschränkt sich ebenfalls nur auf den Bereich der Krume.

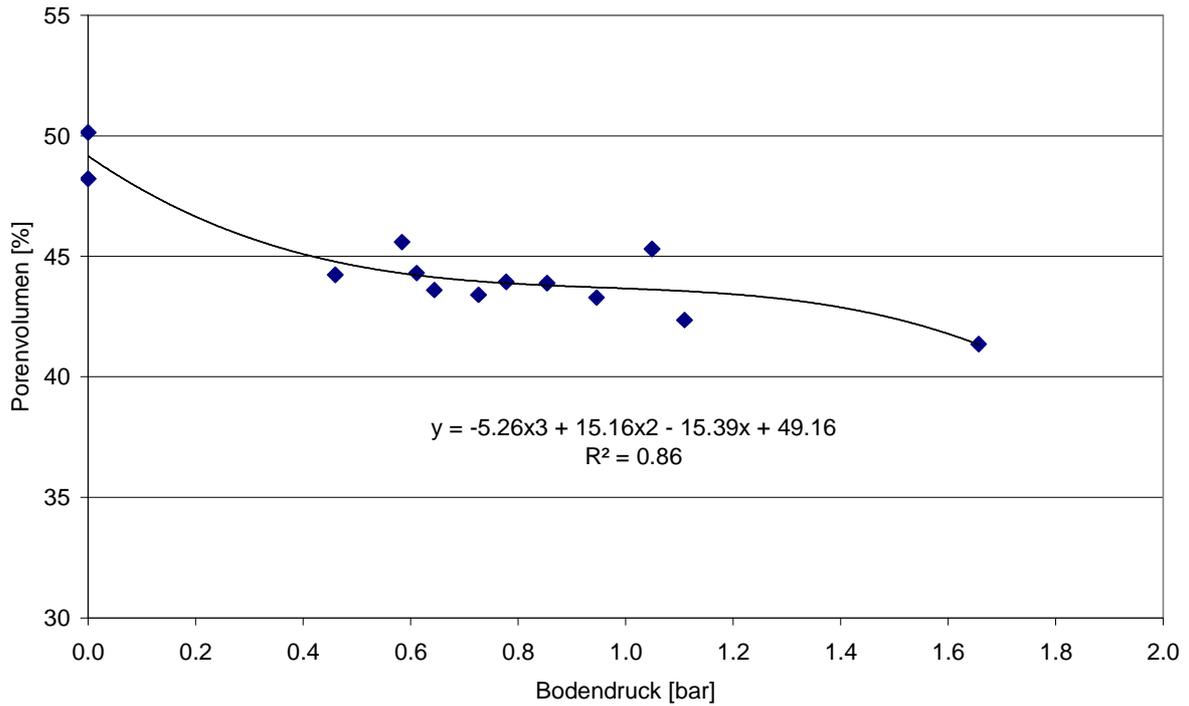


**Abb. 21:** Wirkung eines nicht angepassten Luftdrucks bei einer Zwillingbereifung

### ***Bodenparameter***

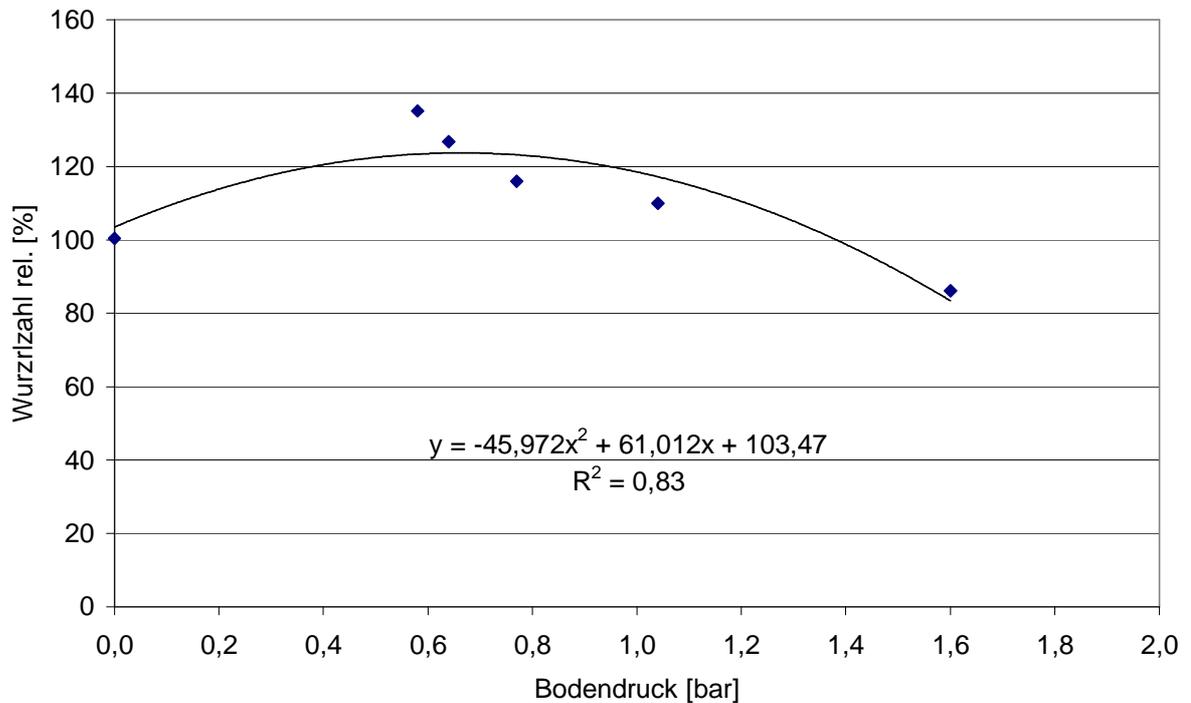
Zum Zeitpunkt des Befahrens war der Boden über die gesamte Krume gleichmäßig gelockert. Das Porenvolumen schwankte zwischen 48 – 55 %. Es ist zu erwarten, dass bereits ein geringer Druck die Bodenparameter Porenvolumen und Dichte beeinflussen.

Generalisierend wird das Porenvolumen über den Druck aufgetragen (Abb. 22). Zunächst genügt geringer Druck, den lockeren Boden (rück-) zu verfestigen. Er bleibt dann über einen weiten Bereich in einem gleichen Zustand bei rund 45 % PV. Erst ab einem Druck von über 1 bar geht das Porenvolumen zurück. Die Eigenfestigkeit des Bodens wird überschritten.



**Abb. 22:** Bodendruck und Porenvolumen

Im weiteren soll die Reaktion der Pflanze auf die Belastung betrachtet werden. Es wird die Funktion des Bodens, ausgedrückt in der Durchwurzelung, über den Bodendruck aufgetragen (Abb. 23).



**Abb. 23:** Bodendruck und Wurzelwachstum

Die Pflanzenwurzeln reagieren spezifisch. Die maximale Durchwurzelung wird in den Proben erreicht, welche mit einem Druck von 0,5 - 1,0 bar belastet wurden. Hier liegt die Wurzelzahl um rund 30 % höher als im unbefahrenen Boden (rel.=100). Dem Boden fehlt die notwendige Rückverfestigung. Diese wird mit Packern, die mit einem Druck von 0,3 bis 0,5 bar arbeiten, werden. Liegen die Drücke deutlich über 1,0 bar, nimmt die Wurzelzahl ab und fällt unter das Niveau des unbefahrenen Boden. Ab diesem Punkt ist mit Wachstumsdepressionen zu rechnen.

### **Fazit**

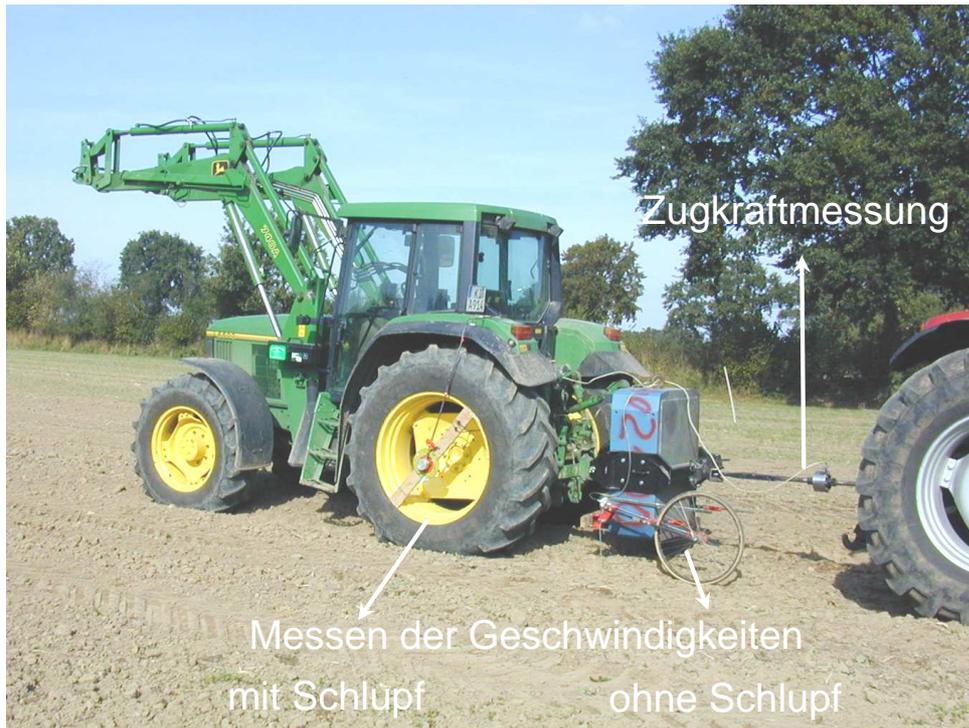
**Großvolumige Reifen können mit einem geringen Luftdruck gefahren werden. Zwischen Luftdruck und Bodendruck besteht ein enger Zusammenhang. Unabhängig von der Reifenbreite führt ein hoher Luftdruck zu hohen Bodendrücken. Auf einem lockeren Boden sollte der aufgebrachte Druck 1,0 bar nicht überschreiten. Bodenparameter und Pflanzenentwicklung werden so nicht negativ beeinflusst.**

## **4.2 Zugkraftübertragung**

Der Reifen soll den Boden schonen, andererseits hohe Kräfte abstützen, ohne den Boden zu sehr zu beeinträchtigen. Aus energetischer und pflanzenbaulicher Sicht ist der Bereich bis 20% Schlupf von besonderem Interesse. Pflanzenbaulich gesehen sind Schlupfwerte bis 15% noch tolerabel. Dagegen wird im Bereich von 10% der höchste Wirkungsgrad erzielt.

Für die Bewertung wird die Zugkräfte der Reifen für 10, 15, 20 und 25% Schlupf ausgewählt. Die Zugkräfte, ausgedrückt im Beiwert, ermöglichen den direkten Vergleich zueinander.

Die Reifenvarianten sind wie beim Messen des Bodendrucks am Schlepper montiert. Um ausschließlich den Reifeneinfluß zu erkennen, fährt der Schlepper ohne Vorderachsantrieb. Er zieht den Brems-Schlepper, der den Zugwiderstand durch Bremsen kontinuierlich steigert (Abb. 24).

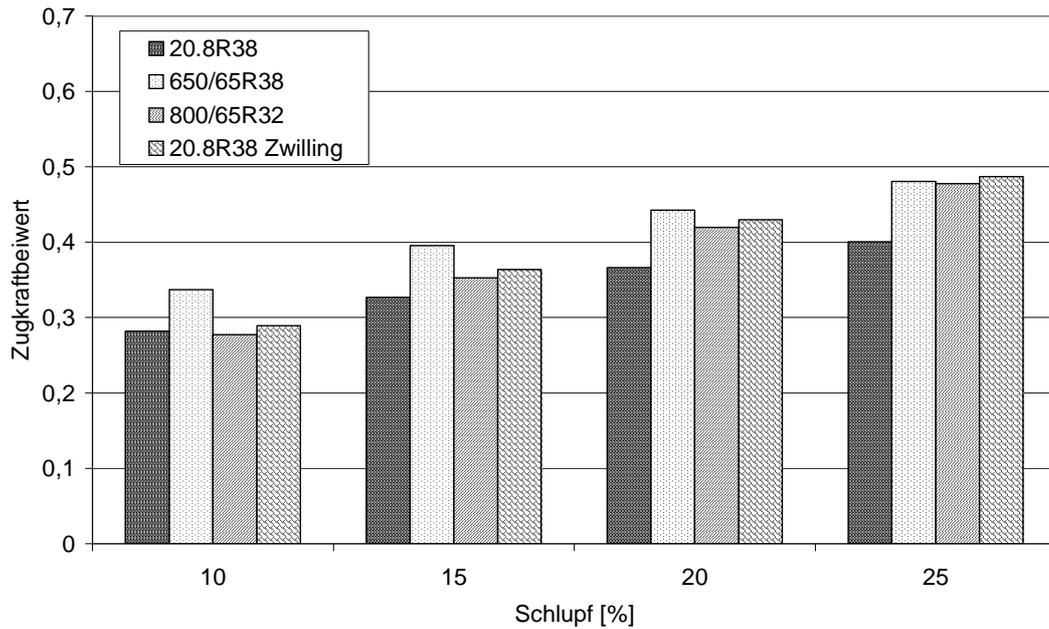


**Abb. 24:** Zugkraftmessung

Generell steigt die Zugkraft mit dem Schlupf an und zwar spezifisch für Reifen und Bodenzustand. Auf dem abgesetzten Boden können die Stollen nur wenig in den Boden eindringen. Hier ist hauptsächlich die kraftschlüssige Verbindung zwischen Stollen und Boden entscheidend. Ein direkter Zusammenhang der einzelnen Stollenaufstandsfläche mit dem Zugkraftbeiwert kann jedoch nicht gebracht werden, da diese messtechnisch online nicht separat erfaßt werden können.

Auf der abgesetzten, festen Variante überträgt der Breitreifen zwischen 10 und 20% Schlupf die höchste Zugkraft (Abb. 25).

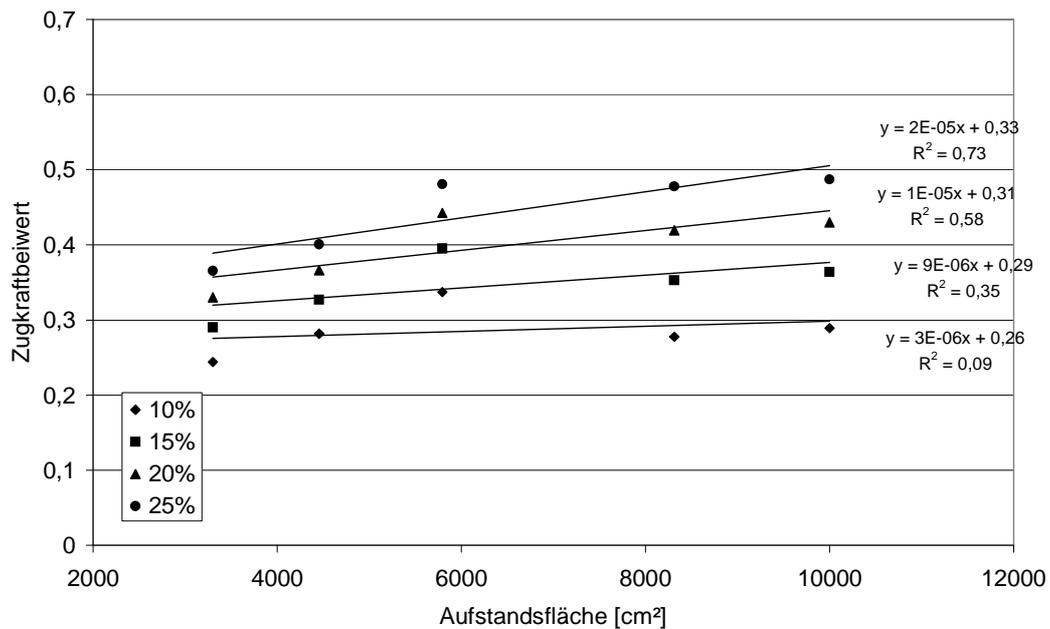
Dies beruht auf der spezifische Konstruktion des Reifens. Er federt aufgrund seines geringen Querschnittsverhältnisses gut ein und bildet eine große Kontaktfläche zur Kraftübertragung aus, wie die Beobachtung während der Arbeit bestätigt.



**Abb. 25:** Zugkraftbeiwert auf festem Boden

Zwischen dem Reifen 800/65R32 und der Zwillingsbereifung treten keine Unterschiede auf. Der Standardreifen fällt gegenüber den breiten Varianten ab.

Die Unterschiede zwischen den Reifenvarianten sind gering. Generell wirkt die Kontaktfläche erst mit steigendem Schlupf spürbar (Abb. 26).

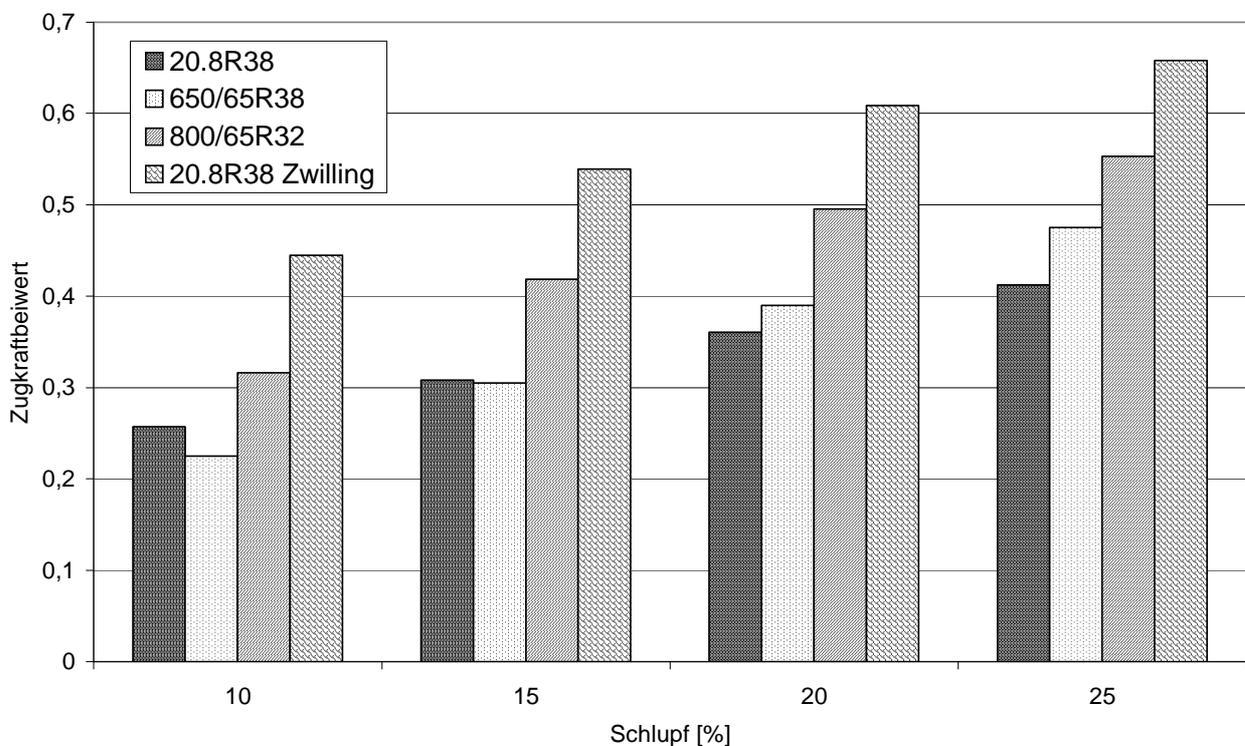


**Abb. 26:** Aufstandsflächengröße und Kraftübertragung (fester Boden)

Auf lockerem Boden zeigt sich ein anderes Bild (Abb. 27).

Das Niveau der Zugkräfte ist generell höher. Unterschiede zwischen den Reifen treten deutlich hervor, besonders ausgeprägt bei den Varianten Superbreitreifen und Zwillingsreifen. Im Gegensatz zum festen Boden verzahnen sich die Reifen mit dem Boden. Zusätzlich zur kraftschlüssigen Verbindung gewinnt die formschlüssige an Bedeutung.

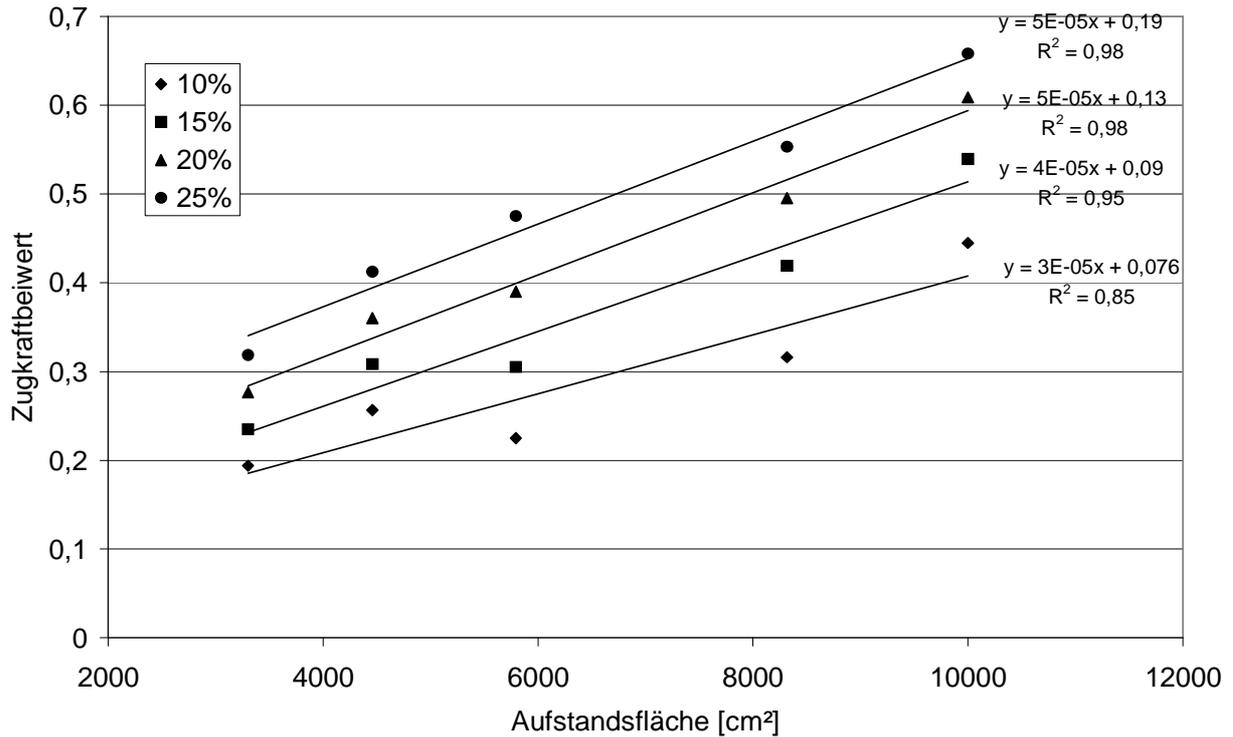
Im Gegensatz zur festen Variante sind die Vorteile des 650er Breitreifens bei 10 und 15 % Schlupf nicht mehr zu finden. Er erreicht annähernd das Niveau der Standardbereifung. Erst ab 20 % Schlupf kann er gegenüber der schmaleren Standardbereifung seine Zugkraft steigern.



**Abb. 27:** Zugkraftübertragung auf lockerem Boden

Die Kontaktfläche der breiten Varianten 800/65R32 und Zwilling wirkt stark auf den Anstieg der Kraftübertragung und zwar im gesamten untersuchten Bereich. Im Vergleich zur Standardbereifung überträgt der Zwilling über den gesamten Meßbereich im Mittel 70 % mehr Zugkraft.

Auf lockerem Boden verbessert eine große Kontaktfläche deutlich die Zugkraftübertragung und zwar für den gesamten Schlupfbereich (Abb. 28).



**Abb. 28:** Kontaktflächengröße und Kraftübertragung (lockerer Boden)

Daraus abgeleitet wirkt sich die Luftdruckanpassung direkt auf die Kraftübertragung aus.

Ist der Luftdruck zu hoch, verkleinert sich die Kontaktfläche. Dieser Effekt ist auf lockerem Boden deutlicher als auf festem Boden ausgeprägt.

Am Beispiel des Standardreifens mit 0,5 bar überhöhtem Luftdruck verringert sich die Kraftübertragung um rund 20 % gegenüber angepaßtem Luftdruck bei gleichzeitiger Abnahme der Kontaktfläche um 15%. Diese Feststellung ist auch auf die anderen Reifenvarianten übertragbar.

## Fazit

**Eine große Kontaktfläche verbessert die Zugkraftübertragung. Wichtig ist, der richtige Luftdruck für die Realisierung einer großen Kontaktfläche. Auf einem flach gelockertem Boden (Grubber) kann der Reifen sich besser verzahnen und überträgt höhere Zugkräfte als auf festem Boden.**

## 4.3 Untersuchung der Bereifung für die 170 kW Kasse

### 4.3.1 Reifenausstattung

Kennzeichnend für Schlepper der oberen Leistungsklasse sind Reifen mit dem großen Innendurchmesser von 42". Angesichts ihres Gewichtes wurde eine Radlast von 4,5 t gewählt.

Weiterhin sind diese Schlepper bis zu Geschwindigkeiten von 50 km/h zugelassen. Da ein Wechsel des Luftdruckes zwischen Straße und Feld nicht praktikabel ist, wurde für die Messungen der Luftdruck für 50 km/h gewählt.

Für die Untersuchungen wurden 4 unterschiedliche Reifen ausgewählt, die sich in der Breite und dem Außendurchmesser unterscheiden (Tab. 4).

**Tab. 4:** Technische Daten der Reifen für Schlepper der 170-kW-Klasse (Radlast: 4,5 t)

Reifen	580/70R42	650/65R42	900/50R42	710/70R42
Breite [mm]	584	645	886	716
Durchmesser [mm]	1908	1912	1946	2060
Luftdruck [bar]	1,8	1,6	1,2	1,2
Aufstandsfläche [cm <sup>2</sup> ] gemessen	4501	4598	7196	6968

Der 580 mm breite Reifen ist lt. Hersteller bei 50 km/h für diese Radlast nicht mehr freigegeben. Für die Untersuchungen wurde jedoch die Tragfähigkeit extrapoliert und der entsprechende Luftdruck eingestellt. Der Reife 650/65R42 ist für den 170 kW-Schlepper derzeit Standard.

Die beiden Reifen mit 700 und 900 mm Breite sind Alternativen zur Standardbereifung. Sie haben die gleichen Tragfähigkeitskennlinien und können so mit dem gleichen Luftdruck befüllt werden.

Die Untersuchungen wurden ebenfalls auf der bereits unter Punkt 4.1.2 beschriebenen Fläche durchgeführt. Anhand der bereits beschriebenen Auswirkungen des Druckes auf das Bodengefüge werden für diese Reifen die spezifischen Wirkungen abgeleitet.

### 4.3.2 Aufstandsfläche

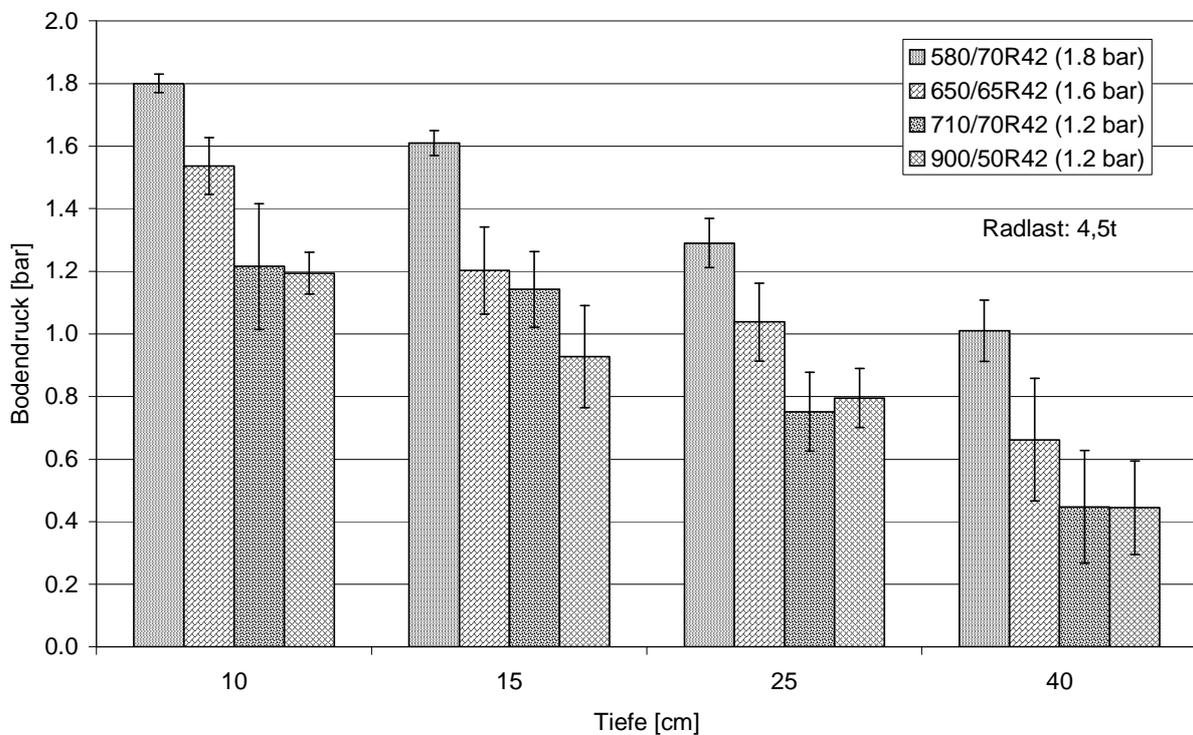
Die Aufstandsfläche des schmalen Reifens 580/70R42 unterscheidet sich nur unwesentlich von der des 650 mm breiten Reifens.

Darüber hinaus steigt die Kontaktfläche vom 650er Reifen zu den beiden breiteren Reifen um 35 % an.

Trotz gleicher Reifenkennlinien ist die Aufstandsfläche des 900er Reifens etwas größer. Das mag an einem leicht besseren Einfederungsverhalten des 900er Reifens auf nachgiebiger Fahrbahn liegen.

### 4.3.3 Bodendruck

Der Bodendruck wurde ebenfalls auf dem lockeren Boden (PV 50 %) gemessen. Die unterschiedliche Breite der Reifen sowie der Luftdruck wirken spezifisch auf die Absoluthöhe und den Druckverlauf über die Tiefe (Abb. 29).



**Abb. 29:** Bodendruck unter großvolumigen Reifen (lockerer Boden)

In 10 cm Tiefe liegen Bodendruck und Luftdruck nahe beieinander.

Die Bodendrücke verlaufen nahezu parallel. Mit dem Luftdruck ändert sich auch der Bodendruck in nahezu allen Tiefen. Unter den schmalen Reifen ist der Druckabbau annähernd linear, d.h. der Übergang vom lockeren Boden der Krume zum festeren im Unterboden wirken nicht auf den Druckverlauf. Im Unterboden ist unter dem schmalen Reifen immer noch ein Druck von 1,0 bar zu messen.

Das Ausgangsniveau der beiden breiten Reifen mit 1,2 bar ist bereits gering und bewirkt einen Rückgang des Bodendrucks bis auf 0,45 bar im Unterboden.

Der eingestellte Luftdruck war für eine Geschwindigkeit von 50 km/h ausgelegt. Bei einer Luftdruckabsenkung geht ebenfalls der Bodendruck unter allen Varianten zurück. Wie bereits in diesem Beispiel beschrieben verschieben sich die Werte nahezu parallel über die gesamte Messtiefe.

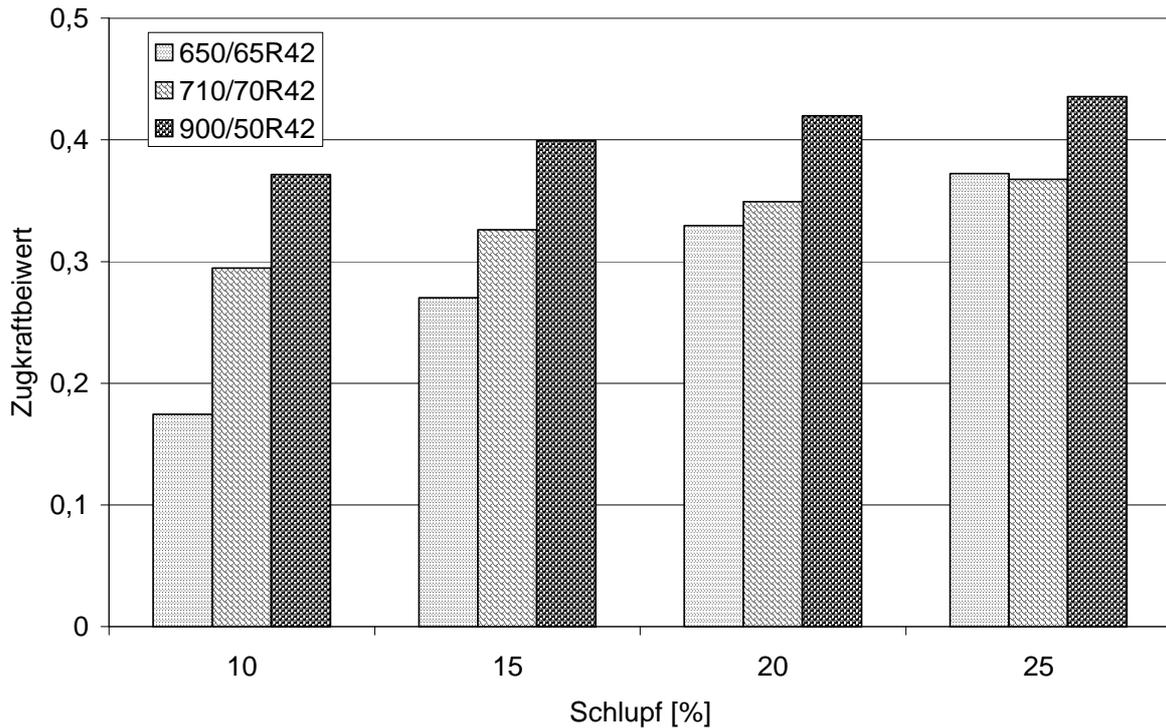
#### **4.3.4 Zugkraftübertragung**

Ziel der Reifen an Großschleppern ist es, über ihren großen Druckmesser Zugkräfte schonend auf den Boden zu übertragen.

Die Messungen wurden an 3 Breitreifen auf nachgiebiger Fahrbahn durchgeführt. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Untersuchungen erfolgte hier der Vergleich mit der speziellen Einzelradmessvorrichtung des Institutes. Damit lassen sich einzelne Räder bis 10 t Radlast und 2,3 m Durchmesser hinsichtlich Bodendruck und Zugkraftverhalten untersuchen. Die Messungen wurden auf gelockerem Boden durchgeführt.

Bei niedrigem Schlupf von 10 % ist der Unterschied zwischen den Varianten deutlich ausgeprägt. Mit steigendem Schlupf nähern sich der 600 mm und der 710 mm breite Reifen an (Abb. 30). Möglicherweise führt der höhere Druck des schmaleren Reifens beim Abbremsen zu einer tieferen Spur, so dass sich die effektive Aufstandsfläche des Reifens erhöht hat.

Generell steigt auch bei diesen Reifenvarianten die Zugkraft- bzw. Triebkraft mit zunehmender Aufstandsfläche an.



**Abb. 30:** Zugkraftübertragung

## 5 Mehrfachüberrollung

Eine einmalig Belastung mit bodenschonenden Reifen führt zu keiner Beeinträchtigung. Zu untersuchen gilt, ob ein mehrfaches Befahren der gleichen Fläche Auswirkungen auf den Boden hat.

In den Arbeitsverfahren laufen mehrere Räder in der gleichen Spur: etwa Schlepper und Arbeitsmaschine oder Anhänger, oder die Spur wird in Fahrgassen mehrfach befahren. Auf Ackerflächen werden Fahrgassen für Düngung- und Pflanzenschutzmaßnahmen in der Vegetation mehrfach überrollt. Die Radlasten betragen mit angebauten Düngerstreuer oder der Pflanzenschutzspritze rund 3 t. In der Gülleausbringung in den wachsenden Pflanzenbestand können diese bis auf 6 t steigen.

### 5.1 Varianten

Gülletankwagen bringen im Frühjahr oft unter ungünstigen Witterungsbedingungen die Gülle in den wachsenden Pflanzenbestand aus. Die hohen Transportmassen

erfordern Fahrwerke mit 2 oder 3 Achsen. Der Boden wird infolge dessen während einer Überfahrt 4 bis 5 mal überrollt.

Um die Auswirkung der Mehrfachüberrollung zu untersuchen wurden Messungen an einem 2-Achs Güllewagen sowie einem 3-Achs Güllewagen durchgeführt.

Mit Blick auf das Fahrwerk ergeben sich gegensätzliche Ansprüche: auf dem Acker wird für die Bodenschonung ein niedriger Luftdruck benötigt, auf der Straße wegen der hohen Geschwindigkeit ein hoher Luftdruck. Daher sollte das Fahrzeug mit einer Reifendruckregelanlage ausgerüstet sein.

Zu beiden Varianten wurden Messungen durchgeführt.

Die Fahrzeuge unterscheiden sich in der Bereifung, der Radlast und dem Luftdruck (Tab. 5).

Die Radlasten des Standard-Schleppers am 2-Achs-Tankwagen weichen voneinander ab: vorn 1,5 t, am Hinterrad ist sie doppelt so hoch. Der Tankwagen stützt einen Teil seiner Last auf der Schlepperhinterachse ab.

**Tab. 5:** Technische Daten der Fahrzeuge

	Reifen	Radlast [t]	Luftdruck [bar]	Kontaktfläche [cm <sup>2</sup> ]
<b>2-Achs-Tankwagen</b>				
Schlepper Vorderrad	540/65R28	1,4	1,4	2290
Schlepper Vorderrad	650/65R38	3,1	1,4	4859
Güllewagen Rad	750/60-30.5	4,1	1,2	5570
<b>3-Achs-Tankwagen</b>				
Schlepper Vorderrad	600/65R28	2,2	1,4	4217
Schlepper Vorderrad	710/70R38	4,5	1,4	6596
Güllewagen Rad	24R20.5	5,9	1,2	5650
Güllewagen Rad	24R20.5	5,9	3,0	3380

Mit 4 t sind die Radlasten am Tankwagen gegenüber dem Schlepper deutlich höher. Die Tandemachse verteilt die Last gleichmäßig auf alle 4 Räder.

Am Schlepper des 3-Achs-Tankwagens sind die Radlasten höher, ebenfalls gleichmäßig auf alle Räder verteilt. Der Schlepper selbst ist leistungsfähiger. Er hat ein höheres Eigengewicht. Außerdem verfügt der Schlepper zusätzlich über ein Frontgewicht. Die Radlast des Vorderrades steigt gegenüber dem Schlepper des 2-Achs-Tankwagens um 0,8 t. Am Hinterrad ist die Radlast sogar 1,3 t höher. Aufgrund des großen Fassvolumens beträgt die Radlast am Tankwagen je Rad rund 6,0 t. Im Vergleich zu üblichen Radlasten bei Düngung und Pflanzenschutz ist sie doppelt so hoch.

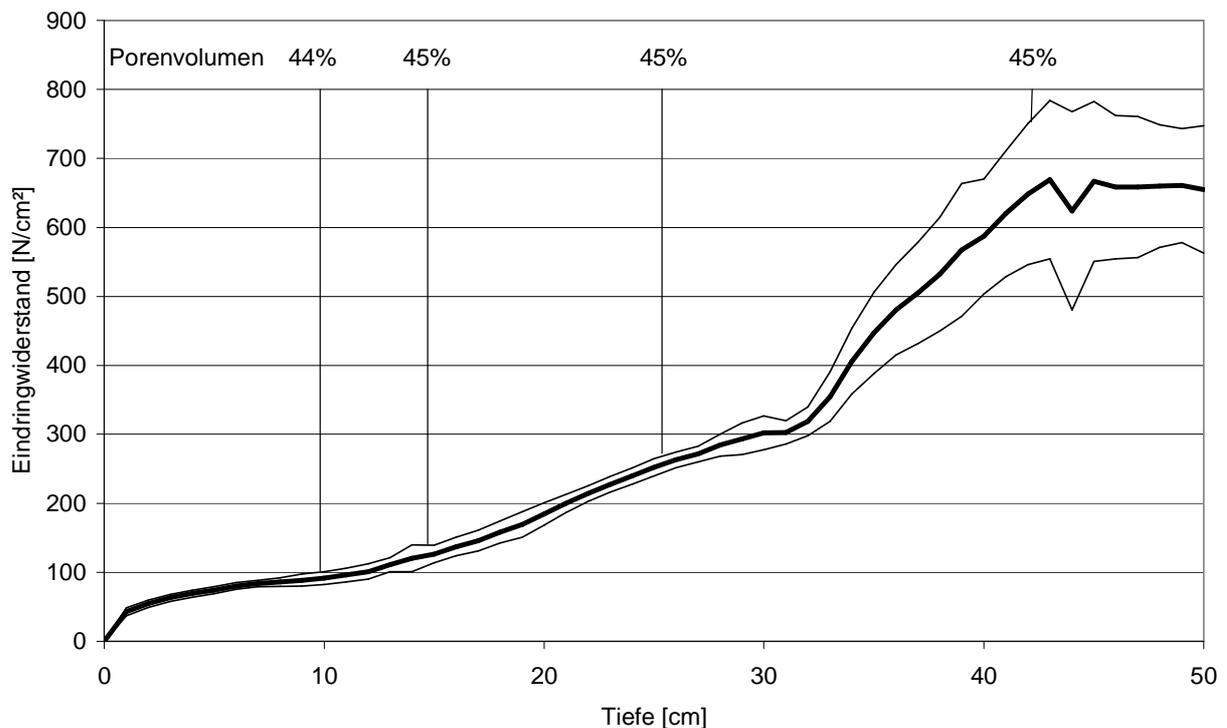
Die großvolumige Bereifung ermöglicht es, die hohen Radlasten auf einer großen Aufstandsfläche abzustützen. Der Schlepper des 3-Achs-Tankwagens hat gegenüber dem anderen Schlepper größere Aufstandsflächen, zurückzuführen auf die größere Reifendimension. So ist es möglich, trotz höherer Radlast mit gleichem Luftdruck wie der Schlepper des 2-Achs-Tankwagens zu fahren. Gleiches gilt für die Räder beider Tankwagen.

Der hohe Luftdruck von 3,0 bar am 3-Achs-Tankwagens verringert die Aufstandsfläche um rund 40 %.

## 5.2 Standort

Für die Messungen stand eine Fläche zur Verfügung, die im Vorjahr mit Mais bestellt war. Die Messungen selbst wurden im folgenden Frühjahr durchgeführt. Seit der Ernte wurde die Fläche nicht bearbeitet. Beim Boden handelt es sich um einen anlehmigen Sand IS.

Die Werte des Eindringwiderstandes und das Porenvolumen beschreiben den Bodenzustand. In den oberen 20 cm betrug der mittlere Eindringwiderstand rund 100 N/cm<sup>2</sup>. Mit der Tiefe steigt er im Bearbeitungshorizont trotz gleichen Porenvolumens stetig an (Abb. 31).



**Abb. 31:** Eindringwiderstand und Porenvolumen auf der Versuchsfläche (IS)

Zurückzuführen ist das auf die hohe Schafreibung am Penetrometer infolge des hohen Sandanteils im Boden. Der Boden selbst ist im Ap-Horizont sehr homogen, zu erkennen an der niedrigen Streuung der Messwerte. Unterhalb des Bearbeitungshorizontes nimmt der Penetrometerwert deutlich zu. Ebenfalls streuen die Messwerte erheblich.

Das Porenvolumen ist im gesamten Bodenhorizont mit 45 % gleich.

### 5.3 Spurtiefe

Die erste Reaktion des Bodens zeigt die Spurtiefe. Sie wurden nach der Überfahrt des gesamten Systems gemessen.

Vom 2-Achs-Tankwagen zum 3-Achs-Tankwagen geht sie trotz einer Überrollung mehr tendenziell zurück (Tab. 6). Das mag an einer besseren Abplattung der Radialreifen des 3-Achstankwagens gegenüber der Diagonalreifen am 2-Achstankwagen liegen.

**Tab. 6:** Spurtiefen

	Spurtiefe [cm]
2-Achs- Gülletankwagen	4,0
3-Achs- Gülletankwagen niedrigern Luftdruck	3,0
3-Achs- Gülletankwagen hoher Luftdruck	8,0

Deutlich tritt die Variante mit hohem Luftdruck hervor. Die Spurtiefe ist um das doppelte höher im Vergleich zur Variante mit angepasstem Luftdruck.

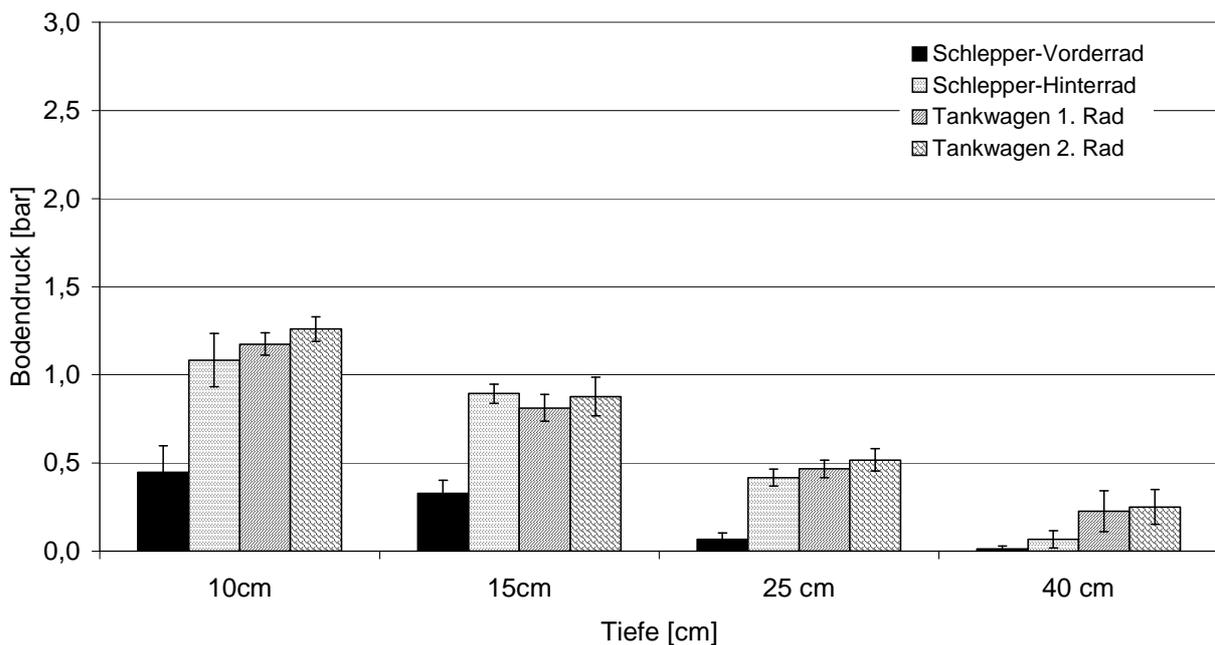
### 5.4 Bodendruck

Angesichts der hohen Rad- bzw. Gesamtmassen sind die Fahrzeuge so ausgerüstet, dass sie den Boden schonen. Der Bodendruck soll die Eigenfestigkeit des Bodens nicht überschreiten und mit steigender Tiefe schnell abgebaut werden.

Den Ergebnissen liegen jeweils 4 Wiederholungen zugrunde.

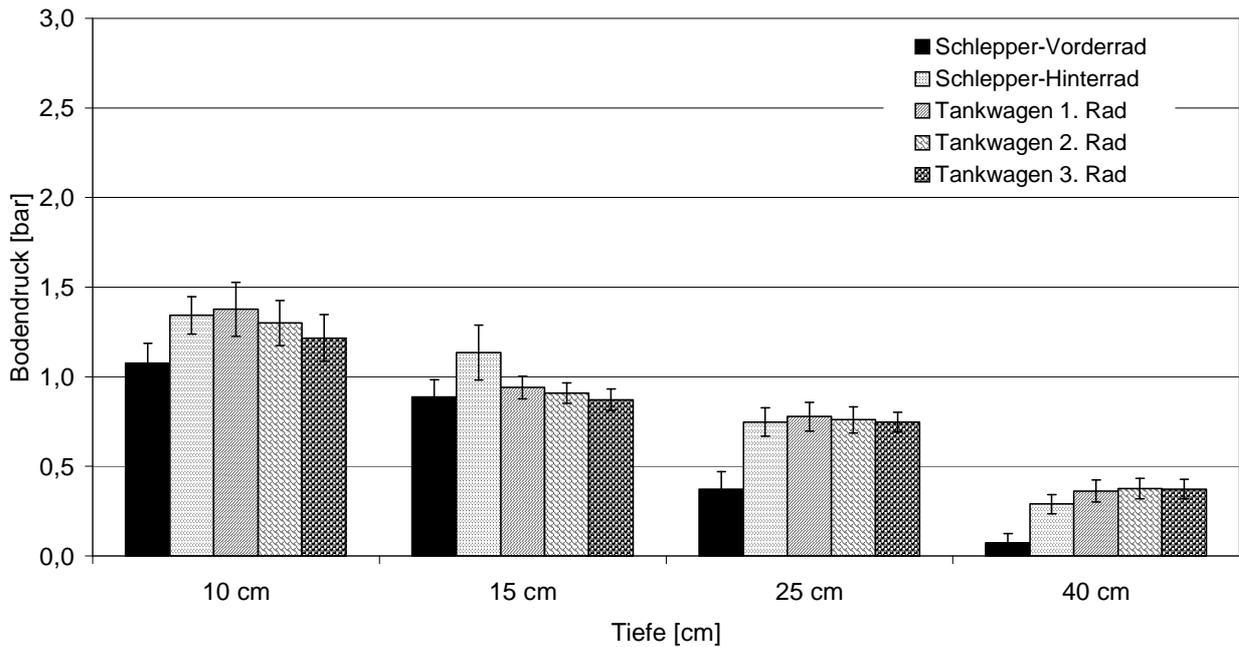
Unter dem 2-Achser erreichen die Werte des Bodendrucks – außer unter dem Vorderrad des Schleppers - einen Wert von 1,2 bar. Er liegt nahe dem Luftdruck (Abb. 32). Während es Fahrens wird das Vorderrad des Schleppers entlastet.

Unter allen Rädern wird der Druck über die Tiefe schnell abgebaut. Im Unterboden (40 cm) sind nur noch wenige Zehntel bar zu messen. Eine Zunahme des Druckes mit steigender Anzahl an Überrollungen ist nicht zu erkennen.



**Abb. 32:** Bodendruck unter dem 2-Achs-Güllewagen (n=4)

Die 3-Achser hatten von beiden Systemen die größten Massen auf den Boden abzustützen. Aufgrund der großvolumigen Bereifung und des niedrigeren Luftdruckes steigt der Bodendruck auch in dieser Varianten nicht von einem Rad zum nächsten (Abb. 33). Die Eigenfestigkeit des Bodens wird nicht überschritten. Er bleibt auf dem gleichen Niveau wie unter dem 2-Achser und bewegt sich im Absolutniveau auf der Höhe des Luftdruckes.

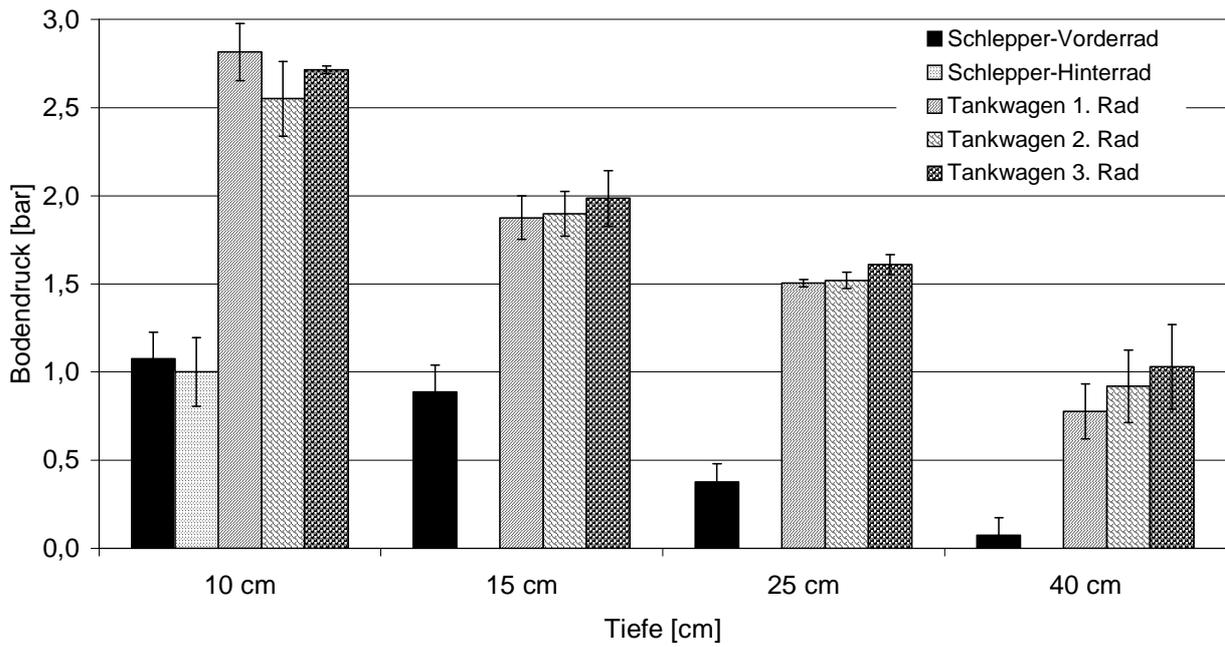


**Abb. 33:** Bodendruck unter dem 3-Achs-Gütlewagen, angepasster Luftdruck (n=4)

Im Gegensatz zur vorangegangenen Variante ist unter dem Vorderrad der Bodendruck um 0,6 bar höher und spiegelt die Wirkung der Frontballastierung wieder. Anhand der Ergebnisse ist kein Einfluss der Radlast auf die Tiefenwirkung des Druckes feststellbar. Das Druckniveau im Unterboden beider Varianten ist vergleichbar.

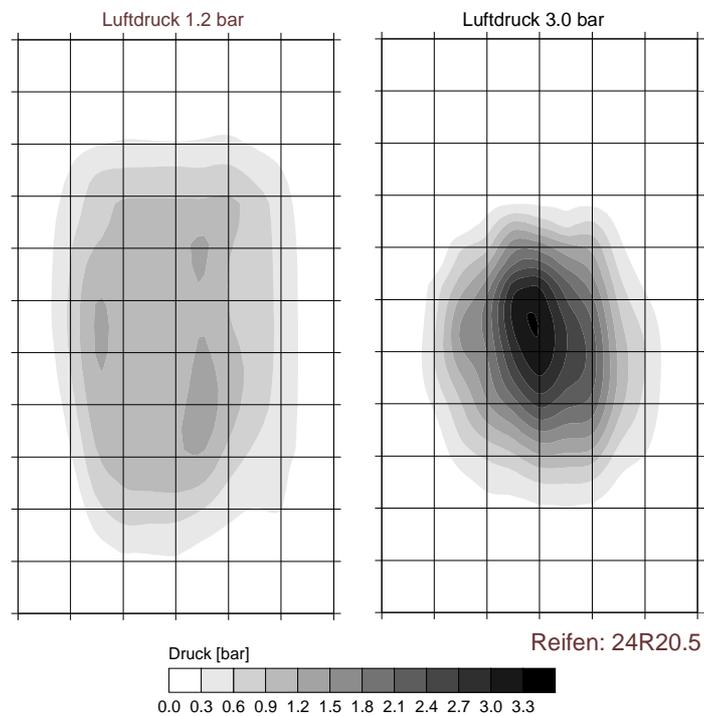
Der hohe Luftdruck aber zeigt erstaunlichen Effekt (Abb. 34). Der Bodendruck unter allen drei Rädern des Tankwagens steigt nahezu auf den doppelten Wert an. Er erreicht den Wert des Luftdruckes vom Reifen. Daraus resultiert auch der geringe Druckabfall in der Tiefe. So werden in 25 cm Tiefe immer noch Werte von 1,5 bar gemessen.

Beachtlich scheint die Wirkung in 40 cm: Mit jeder zusätzlichen Überrollung nimmt der Bodendruck um rund 0,2 bar zu. Dieser Effekt deutet auf eine Festigkeitszunahme mit jeder zusätzlichen Überrollung des Tankwagens hin.



**Abb. 34:** Bodendruck unter dem 3-Achs-Güllewagen, hoher Luftdruck (n=4)

Der Druck in der Kontaktfläche verteilt sich nicht gleichmäßig (Abb. 35).



**Abb. 35:** Druckverteilung in der Kontaktfläche bei unterschiedlichem Luftdruck

Bei angepasstem Reifeninnendruck ist in der Kontaktfläche eine homogene Verteilung des Drucks sichtbar. Bei hohem Luftdruck steigt der Druck zur Reifenmitte hin stark an. Er erreicht Werte von rund 3 bar.

## 5.5 Reaktion des Bodens auf das Befahren

Der Boden reagiert auf Belastung mit einer Zunahme der Dichte und einer Verringerung des Porenvolumens bei Überschreitung dessen Eigenfestigkeit.

Die Werte des Porenvolumens waren über den gesamten Untersuchungshorizont mit rund 45 % annähernd gleich (Tab. 7). Sie liegen in der Spannweite eines abgesetzten Bodens. Der Anteil der Grobporen, welche für die Wasserinfiltration und die Durchlüftung des Bodens verantwortlich sind, schwankt in den einzelnen Tiefen zwischen 15 und 18 %.

**Tab. 7:** Porenvolumen (n = 5) vor und nach dem Befahren

	Meßtiefe							
	10 cm		15 cm		25 cm		40 cm	
	PV [%]	GP [%]	PV [%]	GP [%]	PV [%]	GP [%]	PV [%]	GP [%]
unbefahren	44,3 a	15,2 a	44,7 a	16,6 a	45,6 a	14,9 a	45,4 ab	18,2 ab
2-Achser	43,6 a	14,2 a	45,4 a	17,8 a	43,5 ab	12,8 a	48,5 a	22,1 a
3-Achser nLd*	42,4 a	13,1 a	41,8 b	11,4 b	42,0 ab	12,8 a	44,5 ab	16,5 b
3-Achser hLD**	42,1 a	4,5 b	40,3 b	8,1 c	39,9 b	7,6 b	40,8 b	10,3 c

\*niedrige Luftdruck

\*\* hohe Luftdruck

Der 2-Achs-Tankwagen hat das gleiche Niveau des unbefahrenen Bodens und zwar über die gesamte Tiefe.

Unter dem 3-Achs-Tankwagen mit angepasstem Reifeninnendruck nimmt das Porenvolumen in der Krume leicht ab, unterschreitet aber keinen kritischen Wert. Im Unterboden ändern sich die Werte nicht.

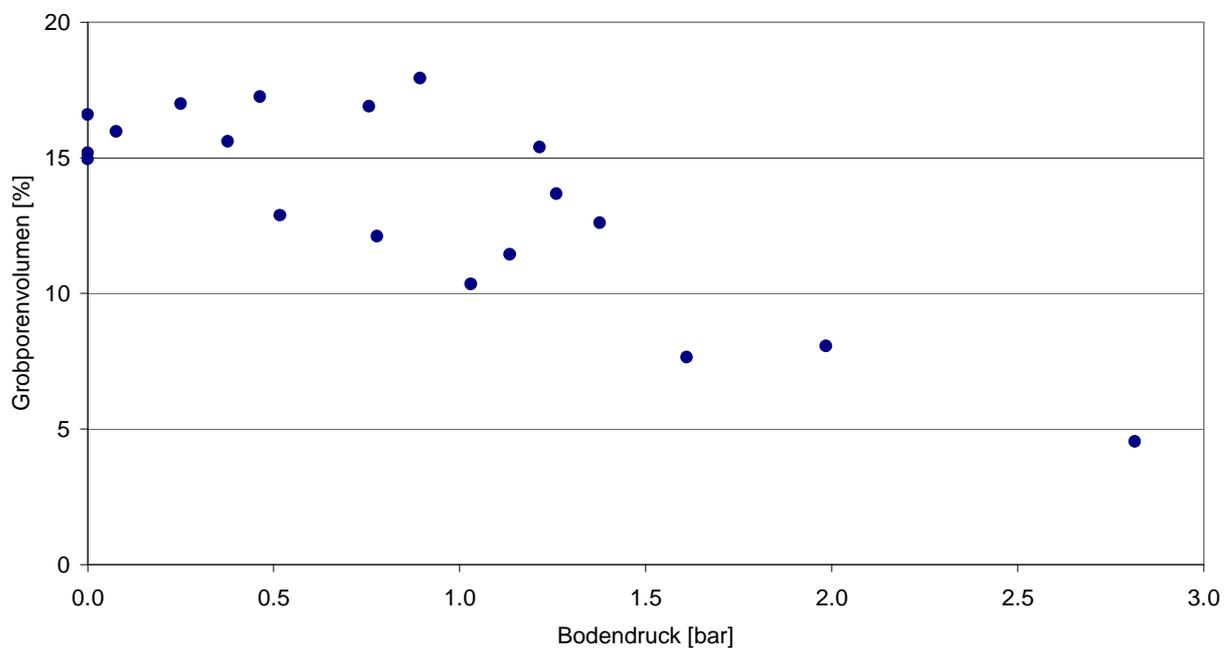
Das Befahren des Bodens mit hohem Luftdruck führt hingegen zu einer deutlichen Reduktion des Porenraumes bis in den Unterboden.

Deutlich sensibler reagiert das Grobporenvolumen auf Belastung.

Der geringe aufgebrachte Druck des 2-Achсers verändert den Grobporenanteil nicht, der des 3-Achсers nur geringfügig. Hingegen reduziert die Variante mit hohem Luftdruck die Werte stark, in der Krume um die Hälfte, im Unterboden um 40 %. Das ist die Folge aus dem hohen aufgebrachten Druck und der mehrfachen Überrollung.

Die Werten des Bodendruckes und der Bodenparameter speziell des Grobporenvolumens stehen im engen Zusammenhang. Bleibt der Druck unter 1,5 bar, wird die Eigenstabilität des Bodens, also dessen Vorbelastung nicht überschritten (Abb. 36). Erst bei hohen Drücken reagiert der Boden.

Bleibt der Druck unter 1,5 bar, wirkt sich ebenfalls die Anzahl der Überrollungen nicht verdichtend aus.



**Abb. 36:** Bodendruck und Grobporenvolumen

## Fazit

**Die hohen Transportmassen in der Gülleausbringung können über moderne Fahrwerke bodenschonend abgestützt werden. Eine zentrale Rolle nimmt der Luftdruck ein. Hohe Last bei abgesenktem Reifeninnendruck und mehrfacher Überrollung müssen nicht zu nachhaltigen Schäden im Boden führen.**

**Für den kombinierten Einsatz auf dem Feld und der Straße ist eine Reifendruckregelanlage erforderlich.**

## 6 Wirkung hoher Radlasten von Erntemaschinen

Mit der Kapazität von Erntemaschinen steigen deren Eigen- und Nutzmasse (vgl. Kap. 2). Dementsprechend müssen hohe Radlasten von 8 – 10 t auf den Boden abgestützt werden. Die Fahrzeuge sind mit großvolumigen Reifen ausgestattet. Um eine Überbeanspruchung der Reifen zu vermeiden, ist bei einer Radlast von über 10 t ein Luftdruck von über 2 bar erforderlich.

Spezifisch für Erntemaschinen sind entsprechend der Bunkerbefüllung zyklische Radlasten. Nur ein Teil der Fahrstrecke wird mit der hohen Radlast überrollt. Der Luftdruck jedoch bleibt konstant. Der Boden selbst wird je nach Anzahl der Achsen mehrfach mit hoher Radlast überrollt. Alternativ dazu steht das spurversetzte Fahren, um den Boden nur einfach aber dafür ganzflächig zu befahren.

Um der steigenden Bunkergröße entgegen zu wirken, besteht die Möglichkeit, das Erntegut auf dem Feld auf einen Abfahrer zu überladen, meist ein Schlepper mit Muldenkipper. Dann tritt zusätzlich die Belastung des Bodens durch Schlepper-Anhängesystem auf.

### 6.1 Untersuchungen zu typischen Reifen für Erntemaschinen

Für die Untersuchung wurden 5 Reifen für Erntemaschinen gewählt (Tab. 8). Die Radlast von 8,3 t ist sowohl für Mähdrescher als auch für Rübenroder typisch. Der Luftdruck entspricht den Vorgaben des Herstellers für 10 km/h bei zyklischer Radlast.

Der Reifen 800/65R32 wird in zwei unterschiedlichen Tragfähigkeitsklassen angeboten, so dass für diesen Reifen eine weitere Luftdruckvariante mit 1,9 bar in die Untersuchung einfließt.

**Tab. 8:** Parameter der Erntemaschinenreifen für eine Radlast von 8,3 t

Reifen	710/70R34	800/65R32	800/65R32	900/60R32	1000/50R32
Breite [mm]	740	798	819	912	1080
Durchmesser [mm]	1932	1838	1857	1931	1863
Luftdruck [bar]	1,8	1,8	1,5	1,2	1,2
Aufstandsfläche [cm]	6925	7196	8304 <sup>1)</sup>	7628	--

1) nicht voll vergleichbar

Mit der Reifenbreite nimmt die Aufstandsfläche zu.

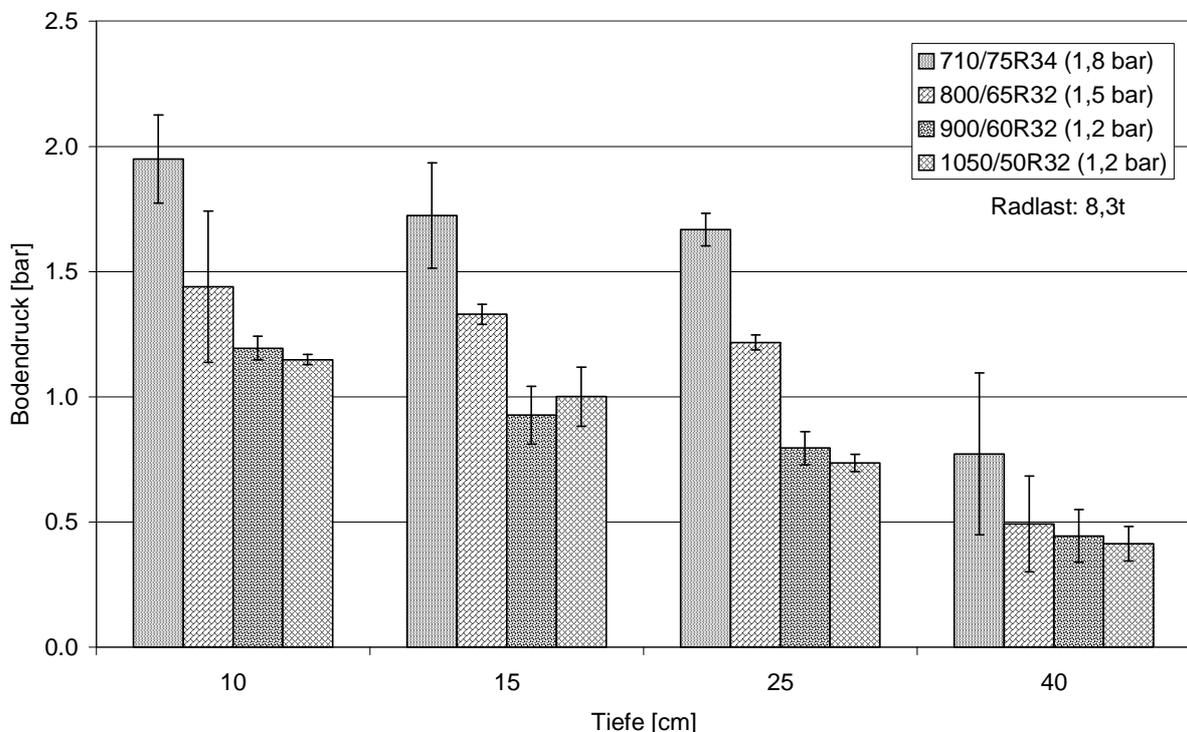
Der 900er und der 1000er Reifen haben trotz unterschiedlicher Breite die gleiche Tragfähigkeit, daher auch den gleichen Luftdruck.

### 6.1.1 Standort

Die Messungen wurden auf dem gleichen unter 5.1.2 beschriebenen Standort durchgeführt. Die Bodenfeuchte betrug 75 % der Feldkapazität. Zum Zeitpunkt der Untersuchung war der Boden in einem abgesetzten Zustand, vergleichbar den Bedingungen zur Ernte. Das Porenvolumen in der Krume schwankte zwischen 42 und 50 %. Im Unterboden war es mit 38 % deutlich niedriger.

### 6.1.2 Bodendruck

Die Reifen führen zu einem spezifischen Druckverlauf im Boden. Unter dem schmalen 710 mm breiten Reifen mit dem höchsten Luftdruck nimmt der Druck in der Krume nur geringfügig um rund 0,2 bar ab (Abb. 37)



**Abb. 37:** Druckverlauf unter Erntemaschinenreifen auf abgesetztem Boden

Das mag an der gelockerten Krume liegen. Unterhalb der Krume geht der Druck zügig bis 40 cm Tiefe auf 0,8 bar zurück. Der Druck des 800er Reifens verläuft

nahezu parallel zum schmaleren 710er nahezu. In der Krume beträgt die Differenz 0,4 bar, im Unterboden 0,3 bar und entspricht annähernd der Differenz im Luftdruck. Deutlich niedriger ist der Bodendruck unter dem 900 und 1000 mm breiten Reifen. Der gleiche Luftdruck im Reifen führt zu einem identischen Druckverlauf. Im Gegensatz zu dem beiden schmaleren Reifen nimmt der Druck über die Tiefe linear ab. Im Unterboden liegen er bei 0,5 bar, auf dem Niveau des 800er Reifens.

Die Werte des Bodendrucks aller Reifen in 10 cm Tiefe nähern dem Luftdruck

### **6.1.3 Einfluß wechselnder Radlast auf den Bodendruck bei gleichem Luftdruck**

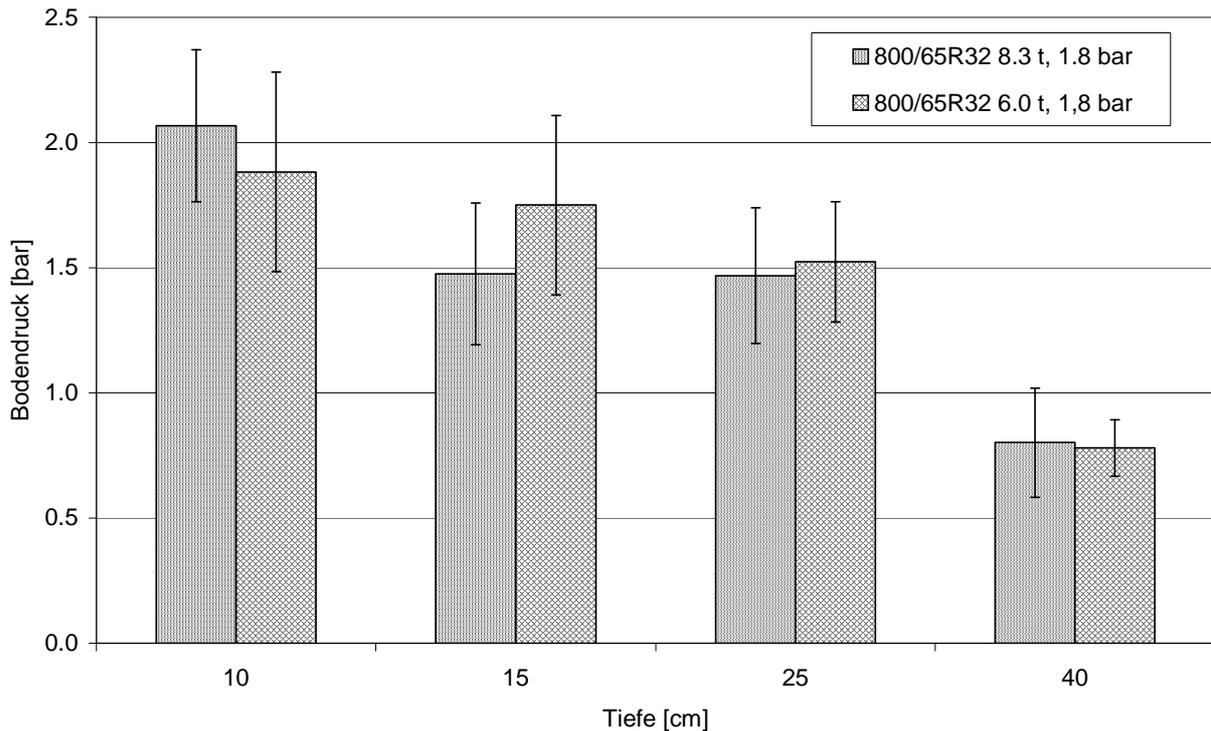
Eine wechselnde Radlast ist typisch für Erntemaschinen mit Bunker. Sie beruht auf der Radlast mit vollem und leeren Bunker und ist abhängig von der Bunkergröße und der Radlastverteilung.

Für die Untersuchungen wurde der in Tabelle 8 beschriebene Reifen 800/65R32 mit 1,8 bar Luftdruck verwendet. Eine Radlast von 8,3 t beschreibt den Zustand mit vollem, die Radlast von 6,0 t den Zustand bei leerem Bunker.

Mit hoher Radlast federt der Reifen weit ein und realisiert eine Aufstandsfläche von 8300 cm<sup>2</sup>. Für die um 2,3 t niedrigere Radlast wäre ein Luftdruck von 1,1 bar richtig. Der um 0,8 bar zu hohe Luftdruck führt dazu, dass der Reifen weniger abplattet, die Kontaktfläche beträgt nur noch 6200 cm<sup>2</sup>. Die Wirkung spiegelt sich im Bodendruck wieder, der über alle Messtiefen gleich verläuft (Abb. 38). Auftretende Unterschiede, speziell in 15 cm Tiefe, sind messtechnisch bedingt.

Die hohe Radlast zeigt keine Wirkung auf den Druckverlauf. Der Vorteil geringerer Radlast wird vom hohen Luftdruck und einer kleineren Kontaktfläche überlagert. Bei überhöhtem Luftdruck plattet der Reifen nicht mehr optimal ab. Ebenfalls ändert sich die Druckverteilung in der Kontaktfläche. Es genügt nicht, die Radlast zu verringern, ohne dabei den Luftdruck entsprechend anzupassen.

Aus Sicht der Bodenbelastung wäre es wünschenswert, eine lastabhängige Reifendruckregelanlage einzuführen, denn die Maschine fährt nur einen geringen Teil der Strecke mit hoher Last und folglich mit hohem Druck.

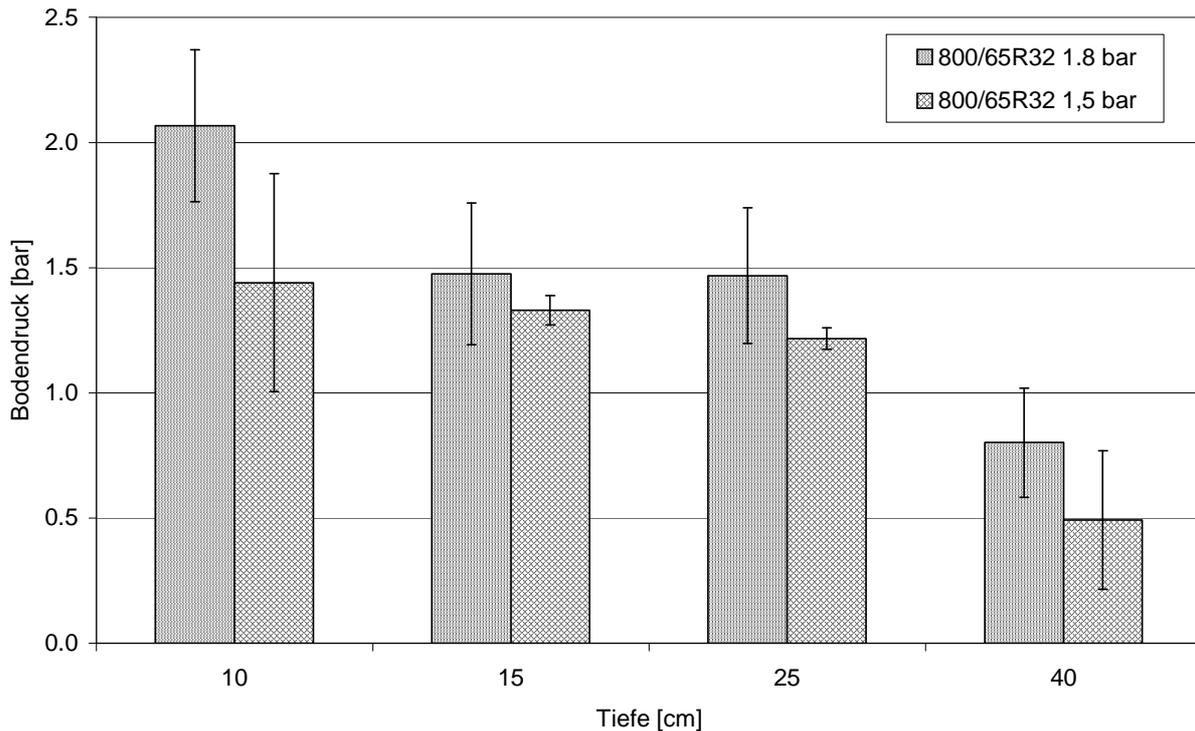


**Abb. 38:** Bodendruck bei unterschiedlicher Radlast und gleichem Luftdruck auf einem abgesetzten Boden

#### 6.1.4 Einfluß des Luftdrucks bei gleicher Radlast

Angesichts der Bedeutung des Luftdruckes für den Bodendruck erhält die Konstruktion des Reifens den Vorzug, der bei gleicher Tragfähigkeit einen niedrigeren Luftdruck braucht. Diese Alternative besteht bei den 800er Reifen mit 1,8 und 1,5 bar.

Die Werte des Bodendruckes in 10 cm Tiefe zeigen, dass der Bodendruck sich sehr stark dem Luftdruck in beiden Varianten annähert. Im weiteren Verlauf bleibt der Abstand im Druck zwischen beiden Reifen in etwa erhalten, bis in den Unterboden (Abb. 39). Im Mittel liegt die Differenz zwischen beiden Varianten über den gesamten Messbereich bei 0,35 bar. Das entspricht in etwa dem Luftdruckunterschied.



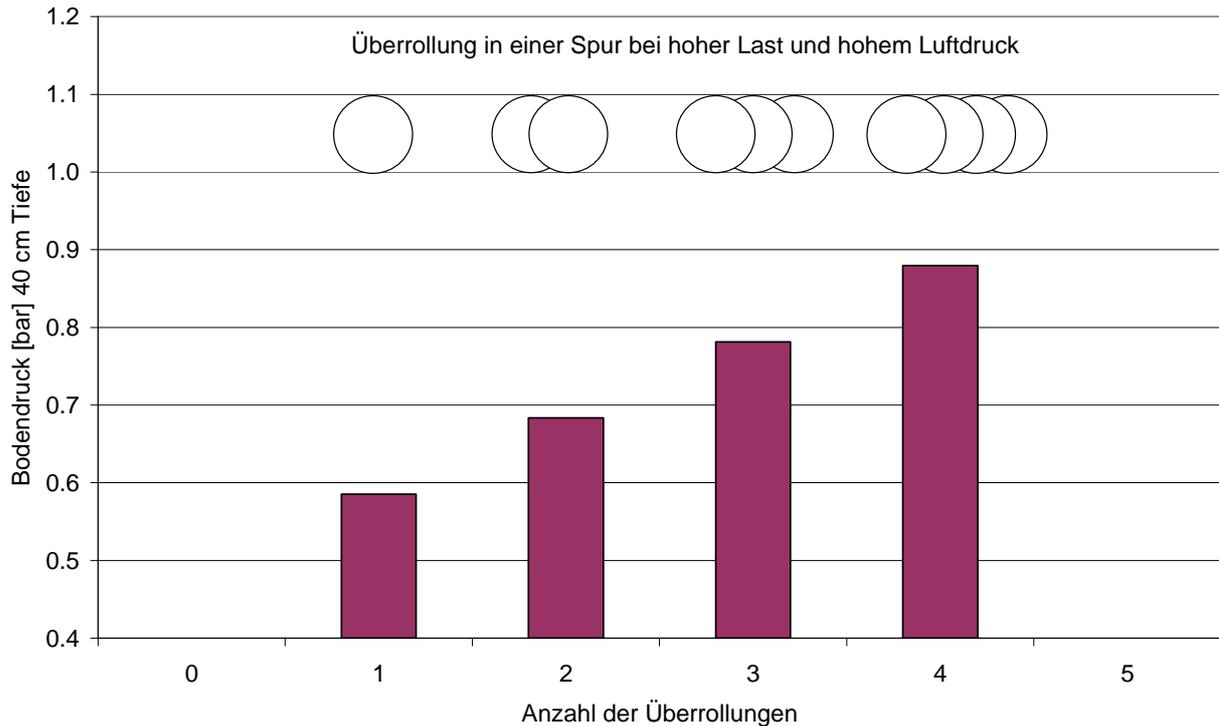
**Abb. 39:** Bodendruck von zwei Reifentypen gleicher Radlast aber unterschiedlichem Luftdruck auf einem abgesetzten Boden

Somit sollte immer der Reifen gewählt werden, der bei dem niedrigsten Luftdruck die hohe Last tragen kann.

### 6.1.5 Mehrfachüberrollung bei hoher Radlast und hohem Luftdruck

Die Betrachtung bezog sich bis jetzt auf eine einmalige Überrollung. Im Maschinensystem laufen mehrere Räder hintereinander in der gleichen Spur. Für die Versuchsanstellung wurde die gleiche Spur mit dem Reifen 800/65R32, montiert am uniweehler, einer Einzelradmessvorrichtung des Institutes, bei hoher Last von 8,3 t und einem Luftdruck von 1,8 bar 4 mal hintereinander überfahren. Zur Quantifizierung der Auswirkung wurden der Bodendruck sowie die Reaktion des Bodens anhand des Porenvolumens gemessen.

Der generelle Verlauf des Bodendrucks entspricht dem aus Abbildung 38. Während jeder zusätzlichen Überrollung ändern sich die Werte des Bodendrucks in der Krume nicht. Der Boden hat hier bereits nach der ersten Überrollung eine hohe Eigenfestigkeit erreicht. Das entspricht der Beobachtung aus Kapitel 4. Jedoch steigt der Druck im Unterboden stetig (Abb. 40), pro Überrollung um rund 0,1 bar. In den Untersuchungen aus Kapitel 4 war der Druckanstieg doppelt so hoch. Dort betrug der Luftdruck am Güllewagen 3,0 bar.



**Abb. 40:** Wirkung der Mehrfachüberrollung auf den Bodendruck im Unterboden

### Auswirkung auf die Bodenparameter

Die Änderung des Porenvolumens beschreibt die Reaktion des Bodens auf eine Belastung. Das Porenvolumen in der Krume speziell in 10 und 15 cm war mit 48-50 % relativ hoch und ist auf die vorangegangene Stoppelbearbeitung zurückzuführen (Tab. 9).

**Tab. 9:** Porenvolumen (n = 5)

	10 cm		15 cm		25 cm		40 cm	
	PV [%]	GP [%]	PV [%]	GP [%]	PV [%]	GP [%]	PV [%]	GP [%]
unbefahren	50,6 a	22,2 a	48,1 a	19,4 a	42,9 a	13,1 a	38,0 a	6,2 a
1 Überrollung	46,0 b	15,8 b	43,5 b	11,9 b	42,1 a	11,8 a	37,6 a	6,4 a
2 Überrollungen	43,9 c	14,8 b	40,2 bc	10,9 b	42,4 a	11,4 a	36,7 a	6,1 a
4 Überrollungen	43,9 c	10,6 c	40,6 c	8,4 b	38,0 b	6,1 b	35,4 a	6,2 a

PV – Gesamtporenvolumen

GP - Grobporenanteil

Der Wert von 42% in 25 cm Tiefe ist hingegen charakteristisch für einen abgesetzten Boden. Der naturbelassene Unterboden hat ein geringes Porenvolumen von 37 %.

Das einmalige Befahren verringert das gesamte Porenvolumen wie auch die Grobporen in 10 und 15 cm Tiefe deutlich und zwar auf das Niveau in 25 cm Tiefe.

Sowohl in 25 als auch in 40 cm Tiefe tritt keine Änderung ein. Das zweite Befahren ändert das Porenvolumen in 10 cm nicht. In 15 und 25 cm geht es tendenziell mit jeder weiteren Überrollung zurück. Die vierte Überrollung führt zu einer Abnahme in 25 cm auf 37 % und erreicht das Ausgangsniveau des unbearbeiteten Unterbodens. Im Unterboden selbst ist trotz des geringen Ausgangsporenvolumens von 38 % ein stetiger Rückgang bis auf 35 % zu erkennen, allerdings innerhalb der Streuung.

Das Grobporenvolumen nimmt im gesamten Bereich der Krume mit jeder Überrollung ab. Im Unterboden hingegen bleibt auf einem niedrigen Niveau von rund 6 %. Wahrscheinlich haben sich hier stabile Poren ausgebildet, welche der Belastung standhalten.

## Fazit

**Hohe Lasten von Erntemaschinen können bodenschonend abgestützt werden. Generell sollte immer der Reifen gewählt werden, der mit dem niedrigsten Luftdruck gefahren werden kann. Haupteinflussgröße auf den Bodendruck ist auch bei wechselnder Radlast der Luftdruck. Bei sehr hohen Lasten sollte die Anzahl der Überrollungen verringert werden. Möglichkeiten hierfür bietet das spurversetzte Fahren.**

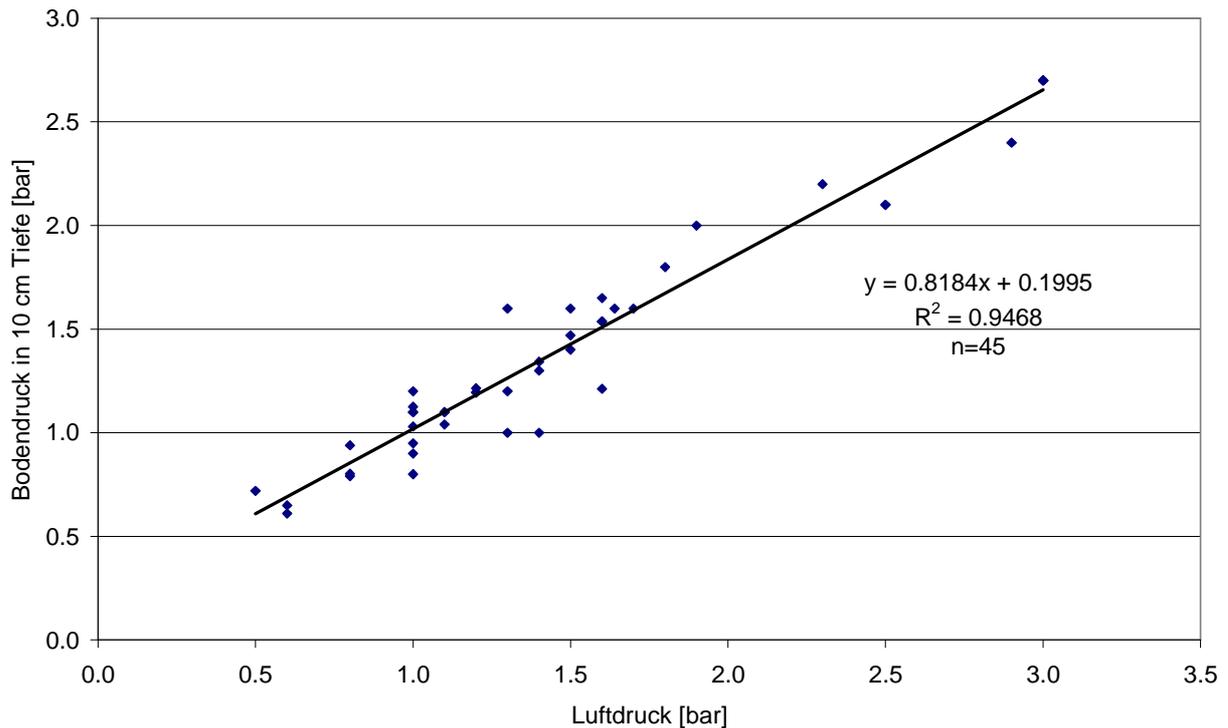
## 7 Allgemeingültige Zusammenhänge

Die einzelnen Reifen und Bodenzustände wirken spezifisch. Jedoch lassen sich aus der Vielzahl von Messungen an unterschiedlichen Reifen und Bodenzuständen allgemeingültige Zusammenhänge ableiten.

### 7.1 Luftdruck

Die Masse (kg) des Fahrzeuges wird über das Rad auf dessen Kontaktfläche (cm<sup>2</sup>) auf den Boden angestützt. Die Kraft je Fläche (bar) bildet den Kontaktflächendruck und stellt die erste messbare Größe dar. Der mittlere Kontaktflächendruck errechnet sich aus der Gewichtskraft und der Kontaktfläche. Er gibt einen mittleren Wert an und berücksichtigt nicht die Druckverteilung in der Aufstandsfläche.

Ein sehr enger Zusammenhang besteht zwischen dem Luftdruck des Rades und dem gemessenen Bodendruck in 10 cm Tiefe (Abb. 41). Aufgrund der geringen Eigentragsfähigkeit von Landwirtschaftsreifen wird die Radlast fast ausschließlich über den Luftdruck abgestützt.



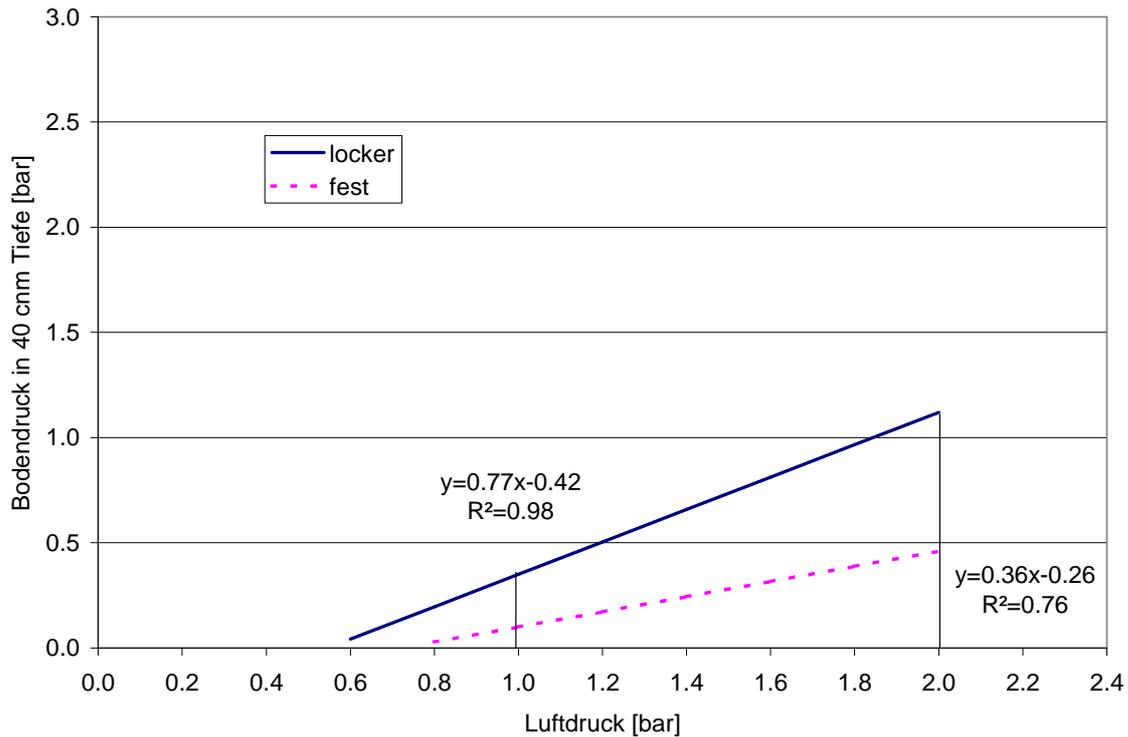
**Abb. 41:** Einfluss des Luftdruckes des Reifens auf den Druck im Boden (10 cm Tiefe)

Diese Auswertung beinhaltet Messwerte von unterschiedlichen Boden, von unterschiedlichen Radialreifen sowie unterschiedlichen Bodenzuständen. Unabhängig von den genannten Parametern gilt der Zusammenhang. Der theoretische Schnittpunkt der Regressionsgerade mit der y-Achse bei 0,2 bar beschreibt die Eigentragfähigkeit des Reifens. Die Steigung von 0,8 entspricht annähernd der Luftdruckzunahme. Die geringe Abweichung ist im Meßsystem Schlauchsonde begründet.

## 7.2 Tiefenwirkung

Die entscheidende Einflußgröße für die Tiefenwirkung ist der Luftdruck. Wie schnell der Druck mit der Tiefe zurückgeht, ist in erster Linie vom Bearbeitungszustand abhängig.

Auf lockerem Boden ist erst ab einem Luftdruck von 0,5 bar ein Druck im Unterboden (Tiefe 40 cm ) messbar, auf abgesetztem Boden erst ab 0,7 bar (Abb. 42)



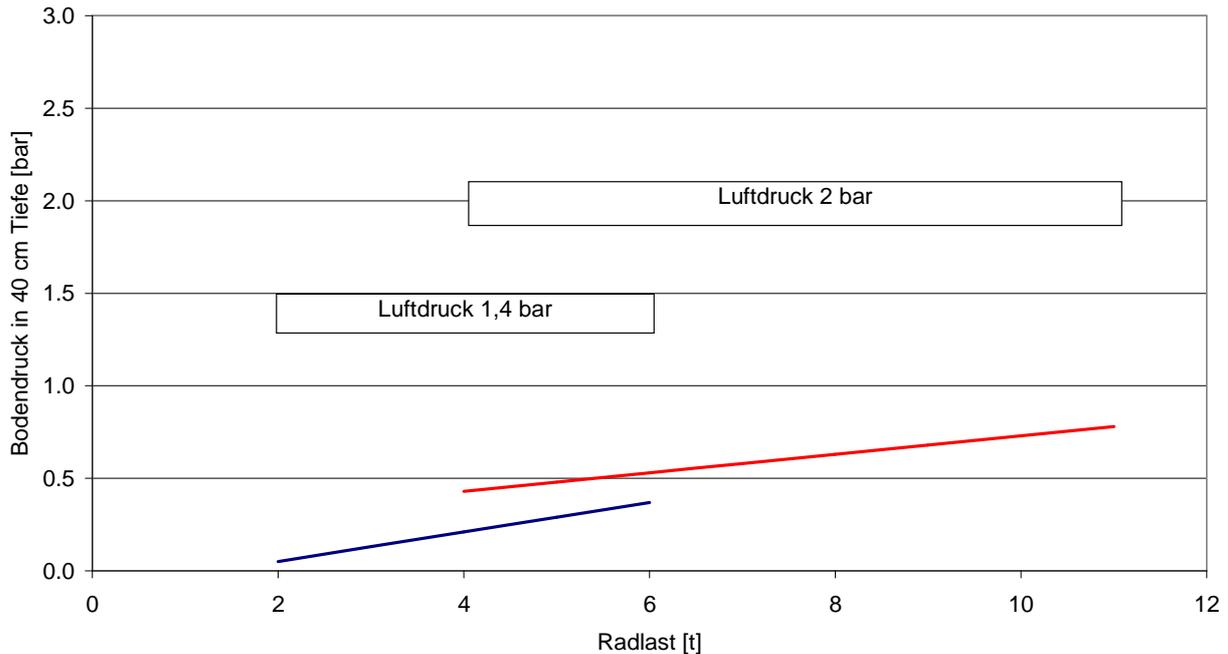
**Abb. 42:** Wirkung des Luftdrucks auf den Druck im Unterboden

Mit dem Luftdruck steigt der Bodendruck im Unterboden bei lockerer Krume doppelt so schnell wie auf festem.

### 7.3 Einfluß der Radlast

Der Radlast wurde immer der Haupteinfluß auf die Tiefenwirkung zugeschrieben. Die tatsächliche Wirkung der Radlast kann abgeleitet werden, wenn diese erhöht aber der Kontaktflächendruck gleichgehalten wird.

Bei einem Kontaktflächendruck von 1,4 bar steigt im Bereich von 1 bis 6 t der Druck im Unterboden pro t Radlast um 0,08 bar an (Abb. 43).



**Abb. 43:** Einfluß steigender Radlast bei gleichem Kontaktflächendruck auf die Tiefenwirkung

Für hohe Radlasten bis 10 t ist ein höherer Luftdruck notwendig und folglich auch der Kontaktflächendruck höher. So nimmt bei einem Luftdruck von 2,0 bar im Untersuchungsbereich von 4 bis 11 t der Bodendruck um 0,05 bar pro t Radlast zu.

## 7.4 Empfehlungen

Moderne großvolumige, Reifen tragen zum Schutz des Boden bei. Sie ermöglichen es, selbst hohe Lasten bei niedrigem Kontaktflächendruck auf den Boden abzustützen. Der entscheidende Faktor für die Druckausbreitung im Boden ist der Kontaktflächendruck. Je nach Bodenzustand sollte er bestimmte Bereiche nicht überschreiten.

Auf lockerem Boden, zum Zeitpunkt der Bestellung muss dieser angesichts der Ansprüche an die Bearbeitbarkeit in einem günstigen Feuchtezustand sein. Der aufgebrachte Druck sollte hier 1,0 bar nicht überschreiten. Dafür sind großvolumig Einzelräder, Zwillingräder oder Bandlaufwerke einzusetzen.

Auf abgesetztem Boden, zum Zeitpunkt der Ernte ist der Boden deutlich tragfähiger. Der Druck sollte unter feuchten 2,0 bar nicht überschreiten, um die Bodenstruktur zu schonen. Bei hohen Drücken trägt das spurversetzte Fahren zur Schonung des Bodens bei. Die hohe, einmalige Belastung wirkt nur im oberen Bereich der Krume und verschont den Unterboden vor Verdichtung.