

Verringerung der mechanischen Bodenbeanspruchung durch angepasste Landtechnik

Karin Marschall, Fachbereich 4 – Pflanzliche Erzeugung

Zusammenfassung

Bodendruckmessungen zeigen, dass die mechanische Bodenbeanspruchung durch Befahrung mit Landmaschinen häufig größer ist, als die Tragfähigkeit des feuchten Bodens. Langfristig sind daher zunehmende Verdichtungen des Bodens nicht sicher auszuschließen. Gleichzeitig verdeutlichen aber die Ergebnisse auch, dass gefügeschonende Maßnahmen, wie die Verbreiterung der Aufstandsflächen mit Zwillingsreifen oder Gleisbändern, Verminderung der Radlast, Einsatz von Überladewagen oder Onland-Pflügen, eine schonende Lastabstützung auch bei lastintensiven Arbeitsgängen ermöglichen.

1. Einleitung und Problemstellung

In der agrarwissenschaftlichen Literatur wird schon seit vielen Jahren über eine weltweit langsam fortschreitende Zunahme der Bodenverdichtung durch den Einsatz schwerer Landtechnik berichtet, welche die Bodenfunktionen beeinträchtigt (u. a. SÖHNE 1953, KTBL 1986, LARSON et al. (Hrsg.) 1989, SOANE & VAN OUWERKERK (Hrsg.) 1994, DÜRR et al. 1995, HORN et al. (Hrsg.) 2001). Betroffen ist vor allem der Boden unterhalb der Krume. Pflugeinsatz bei feuchten Bodenbedingungen und die Befahrung des Bodens mit immer höheren Maschinenlasten vergrößern das Risiko von schädlichen Gefügeveränderungen bis in Tiefen des Bodens, die mit der üblichen Bearbeitung nicht mehr erreicht werden.

Trotz vielerorts erkannter Risiken stellt sich die Umsetzung bodengefügeschonender Maßnahmen in der Praxis jedoch als schwierig dar. Das Problem liegt darin, dass mögliche Schädigungen des Bodengefüges im Unterboden an der Bodenoberfläche nicht sichtbar sind. Wuchsbeeinträchtigungen und damit verbundene Ertragseinbußen lassen sich bisher nur in aktuellen und ehemaligen Fahrspuren in der Krume sowie auf Vorgewenden beobachten. Die ständig fortschreitende Optimierung pflanzenbaulicher Maßnahmen im Oberboden (z.B. Düngung, Lockerung, Unkrautbekämpfung) überdeckt häufig den Effekt ungünstiger Verhältnisse im Unterboden. Die Folgen von schädlichen Unterbodenverdichtungen (Pflugsohlen und Krumbasisverdichtungen), wie verringerte Durchwurzelbarkeit, gehemmter Wasser- und Lufttransport, schlechtere Düngerverfügbarkeit und –effizienz und inhomogenere Bodenverhältnisse, machen sich daher oft nur in extremen trockenen oder feuchten Jahren im Pflanzenbestand bemerkbar.

Im Unterboden treten die Bodenverdichtungen zudem kaum direkt ereignisbezogen (z.B. Überfahung und Fahrspur), sondern eher als schleichender Prozess auf. So zeigen Langzeitversuche über mehrere Jahre (RUHM zitiert in SOMMER 1985, EHLERS et al. 2002) eine Zunahme der mittleren Lagerungsdichte zahlreicher Ackerunterböden, während nach einmaliger oder auch mehrmaliger Überfahung häufig noch keine oder nur mäßige Änderungen der Dichte im Unterboden nachweisbar sind (SCHÄFER-LANDEFELD et al. 2004, ARVIDSON 2001, BRUNOTTE et al. 2000, GYSI et al. 1999, WEISSKOPF et al. 1997). Dies macht die Zuordnung von Verdichtung zu bestimmten Befahrungen bzw. Arbeitsgängen schwer.

Außerdem ist nicht jede Strukturänderung des Bodens mit einer Dichteveränderung verbunden. Gestaltsänderungen der Bodenstruktur durch Schervorgänge können auch ohne Volumenreduktion zu einer deutlichen Verringerung der Porenkontinuität und der Wasserdurchlässigkeit führen (KIRBY 1994).

Aus der Sicht der mechanischen Beanspruchung des Bodens bietet die Landtechnik ein breites Spektrum an bodenschonenden Maßnahmen an, wie z.B. Breitreifen, Niederdruckreifen, Luftdruckregelanlagen und Verfahren der nichtwendenden konservierenden Bodenbearbeitung. Eine konkrete Bewertung der Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen und Verfahren stellt sich für den Landwirt jedoch als schwierig dar.

Grundsätzlich geht man davon aus, dass eine befahrungsbedingte Verdichtung des Bodens nur eintritt, wenn die mechanische Beanspruchung des Gefüges größer ist als die Tragfähigkeit des Bodens. Die Kenntnis der feuchteabhängigen Bodenstabilität eines Standortes und der mechanischen Bodenbelastung durch maschinelle Befahrung lassen daher eine Prognose der Verdichtungsgefahr zu.

Im Folgenden wird die mechanische Belastbarkeit von typischen, sächsischen Ackerböden dargestellt. Parallel dazu werden Ergebnisse von Bodendruckmessungen unter ausgesuchten, in der Praxis gebräuchlichen Landmaschinen vorgestellt.

2. Methoden

2.1 Untersuchungen zur Druckempfindlichkeit sächsischer Böden

Ein geeignetes Maß für die Beurteilung der vertikalen Druckstabilität eines Bodens ist dessen „Vorbelastung“, die sich aus dem Drucksetzungsverhalten des Bodens ableiten lässt (CASAGRANDE 1936; HORN 1981; LEBERT & HORN 1992). Dabei geht man davon aus, dass bei einer Belastung des Bodens, die entstehende Verformung reversibel ist (elastisches Verhalten), solange die Eigenstabilität des Bodens nicht überschritten wird. Erst bei Überschreitung der Eigenstabilität entstehen irreversible, plastische Verformungen, da zur Einstellung eines neuen Spannungsgleichgewichts eine Erhöhung der Kornkontaktzahl notwendig ist (LEBERT 1989). Der Belastungswert an dem eine Drucksetzungskurve vom elastischen (Wiederverdichtungsbereich) zum plastischen Verformungsbereich (Erstverdichtungsbereich) übergeht, wird als "Vorbelastung" bezeichnet. Sie kann im Labor an ungestörten Stechzylinderproben ermittelt werden und hat als innere Bodenstabilität die gleiche Dimension (kPa) wie der Kontaktflächendruck oder Bodendruck von Fahrzeugreifen. Dies ermöglicht eine Gegenüberstellung dieser Kräfte. Da der Boden bei einem hohen Wassergehalt am druckempfindlichsten reagiert, wurden die Vorbelastungen beim Feuchtegrad p_F 1,8 (d.h. nahe der Feldkapazität) bestimmt.

2.2 Bodendruckmessungen bei dynamischer Belastung

Ziel der Druckmessungen während einer Befahrung war es, die Druckausbreitung im Boden unter den Maschinen in Abhängigkeit der Maschinenparameter (Radlast, Reifenaufstandsfläche, Reifeninnendruck und Überfahungshäufigkeit) und Bodeneigenschaften (Feuchte, Bodenart und Bearbeitung) in die Tiefe festzustellen.

Für die Messungen wurden Druckdosen mit DMS (=Dehnungsmessstreifen) -Sensoren verwendet. Zur Bestimmung der vertikalen Druckausbreitung unter den Reifen wurden die Sensoren unter der geplanten Fahrspurmitte in möglichst „unbefahrenem“ Boden (Kernfläche) in verschiedenen Tiefen des Bodens (20 cm und 40 cm Tiefe) eingebaut (Abbildung 1). Dazu wurden jeweils drei Sensoren pro Tiefe nach Ausheben einer Grube horizontal von der Grubenwand aus mittels kleiner Kanäle in den ungestörten Boden eingebracht und die Grube anschließend

wieder verfüllt. Die Maschinen und Geräte wurden im beladenen Zustand bzw. während des Praxiseinsatzes gemessen.

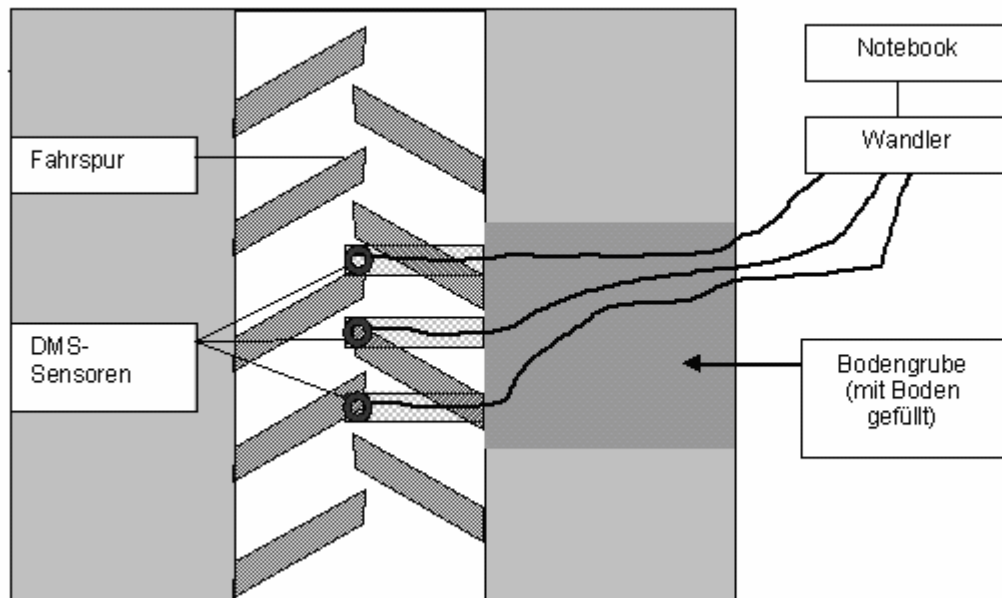


Abbildung 1 Einbauschema der DMS-Sensoren (Ansicht von oben)

3. Ergebnisse

3.1 Mechanische Vorbelastung

Insgesamt wurden die Vorbelastungen von 31 repräsentativen Ackerschlägen in Sachsen gemessen. Die Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse bei einem Bodenfeuchtegehalt von pF 1,8 (nahe Feldkapazität). Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte der untersuchten Sand-, Lehm-, Schluff- und Tonböden der Oberböden bei unterschiedlicher Bearbeitung und der Unterböden.

Die Sand- und Tonböden zeigen im Schnitt niedrigere Vorbelastungen als die Schluff- und Lehm Böden. Die Druckstabilität dieser Böden ist somit im Mittel kleiner, als die der meisten Schluff- und Lehm Böden.

Vergleicht man die Mittelwerte der Vorbelastungen der Ober- und Unterböden bei gleicher Hauptbodenart miteinander, dann fällt auf, dass die Vorbelastungen von Schluff- und Lehm Böden konservierend bearbeiteter Oberböden im Mittel den Vorbelastungen der Unterböden entsprechen. Die Mittelwerte der Vorbelastungen der gepflügten Oberböden sind erwartungsgemäß niedriger als die der konservierend bearbeiteten Oberböden und im Mittel auch niedriger als die der Unterböden. Mehrjährige Bodenruhe durch nur flache konservierende Bodenbearbeitung oder Direktsaat führt offensichtlich schnell zu einer Stabilisierung des Bodens in den nicht mehr (oder selten) bearbeiteten Tiefen (hier 20 - 25 cm Bodentiefe).

Bei Sandböden sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bearbeitungssystemen und Tiefen zu finden. Die beobachtete, relativ geringe Stabilität dieser untersuchten Böden, tritt bei hoher Bodenfeuchte unabhängig vom Bearbeitungsstatus auf. Die Ursache dürfte hier im wenig stabilen Kohärent- oder Einzelkorngefüge der Böden liegen.

Tabelle 1: Mittelwerte der Vorbelastungen (pF 1,8) sächsischer Ackerböden gruppiert nach Bodenarthauptgruppe, -tiefe und -bearbeitung (n = Anzahl der untersuchten Böden)

Bodenarten-Hauptgruppe und Bodentiefe	Bodenarten	Mittelwert (STAW) [kPa]	n
Sand Pflug-20 cm Kons. flach-20 cm 40 cm	Su2, Sl2	51 (17)	2
	Su2, Sl2	64 (6)	2
	Ss, Su2, St2	52 (17)	6
Lehm Pflug-20 cm Kons. flach-20 cm 40 cm	Slu, Lt2	73 (27)	5
	Slu	93 (19)	3
	Slu, Sl4, Lt2	88 (24)	10
Schluff Pflug-20 cm Kons. flach -20 cm (oder Direktsaat) 40 cm	Ut3, Uls, Ut3, Uls, Ut4	63 (19) 105 (25)	5 6
	Ut3, Uls, Ut4	115 (26)	11
Ton 40 cm	Tu4, Lt3, Tu3	71 (3)	4

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Tragfähigkeiten von sächsischen Schluff- und Lehmböden bei feuchten Bodenverhältnissen im Unterboden im Mittel etwa bei 90 kPa bzw. 115 kPa liegen. Im Folgenden wird daher eine Vorbelastung von 100 kPa als Orientierung zur Einordnung der Ergebnisse der Bodendruckmessungen herangezogen.

3.2 Vertikale Bodendrucke bei dynamischer Belastung

Insgesamt wurden in den vergangenen Jahren über 80 Bodendruck-Messungen unter 33 verschiedenen Maschinen und Maschinengespannen in unterschiedlichen Böden in Sachsen durchgeführt. Im Folgenden werden einige Ergebnisse vorgestellt.

Ernteanhänger

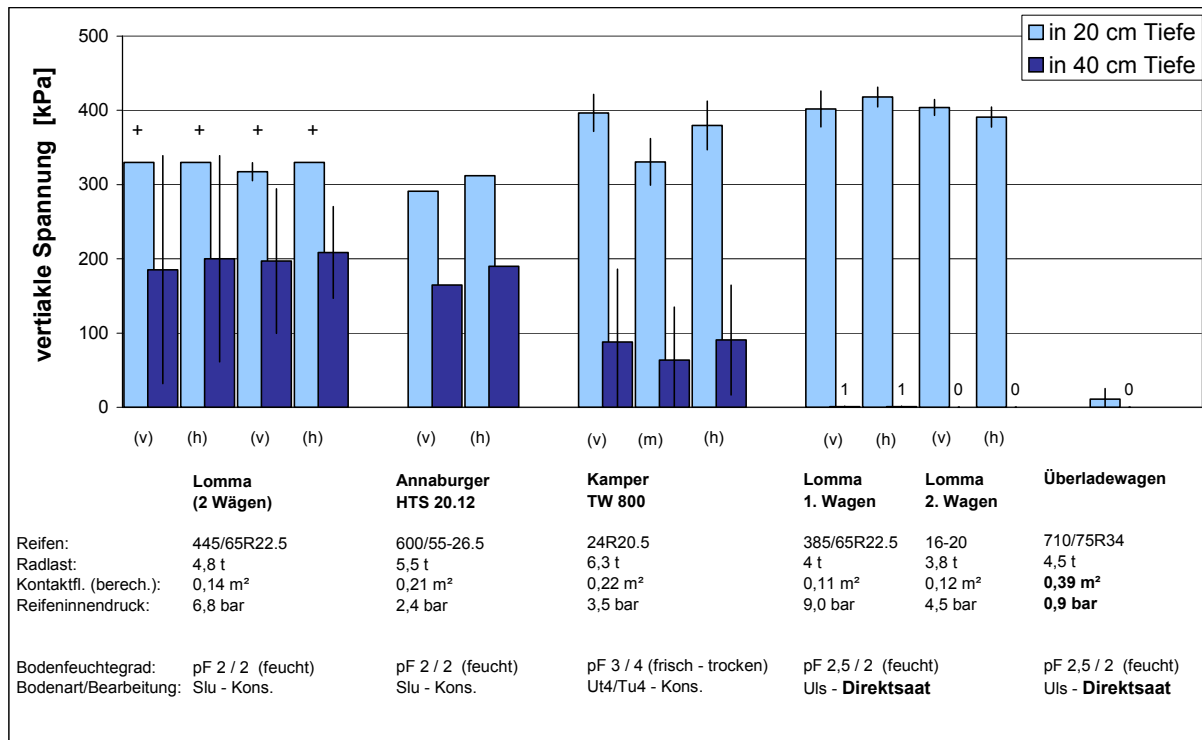


Abbildung 2 Vertikale Spannungen (DMS-Sensor; n = 3) in 20 cm und 40 cm Bodentiefe unter Ernteanhängern bei pflugloser Bodenbearbeitung (Kons. = konservierend, Direktsaat) und verschiedenen Bodenfeuchten (pF-Wert = Bodenwasserspannung, in 20 cm / 40 cm Tiefe); (v): Vorder- / (m): Mittel- (h): Hinterrad, +: Spannungen überschreiten Messbereich des älteren Messprogramms

Die Bodendrücke der Anhänger (Radlasten 3.800 kg – 6.300 kg) liegen im Oberboden überwiegend im Bereich von 300 – 400 kPa (Abbildung 2). Eine Ausnahme bildete der Überladewagen, der mit breiten Reifen und geringem Reifeninnendruck (Pi: 0,9 bar) gefahren wurde, so dass im tragfähigen Oberboden (Direktsaat) trotz der hohen Radlast (4.500 kg) nur geringste Drücke in 20 cm Tiefe festzustellen waren. Im Gegensatz dazu konnte der stabile Boden (Direktsaat) bei den Lomma-Anhängern mit geringerer Radlast und kleineren Kontaktflächen eine hohe Druckbelastung von ca. 400 kPa in 20 cm Tiefe nicht verhindern. Im Unterboden der konservierend bearbeiteten Böden sind bei feuchten Verhältnissen noch Bodendrücke von ca. 200 kPa gemessen worden (Lomma und Annaburger). Bei trockenen Bedingungen (Kamper) nur etwa 80 kPa. Der Boden der Direktsaatfläche war so fest, dass im Unterboden keine Drücke mehr ankamen.

Die vorliegenden Ergebnisse machen deutlich, dass die Bodendrücke unter vollen Anhängern die Bodentragfähigkeit (ca. 100 kPa) im Oberboden (hier bereits unter der Bearbeitungsgrenze) und bei feuchteren Bedingungen auch im Unterboden weit überschreiten, so dass die Gefahr von langsamer Setzung des Bodens besteht. Der Überladewagen ist mit einem Reifen ausgerüstet, dessen Kontaktfläche doppelt so groß ist, wie die der breiten Anhängerreifen (Breitreifen). Die vorliegende Bodendruckmessung zeigt, dass die größere Reifenaufstandsfläche

und der niedrige Reifeninnendruck (durch die großen Reifen ermöglicht) zu einer deutlich bodenschonenderen Lastabstützung führen.

Mähdrescher

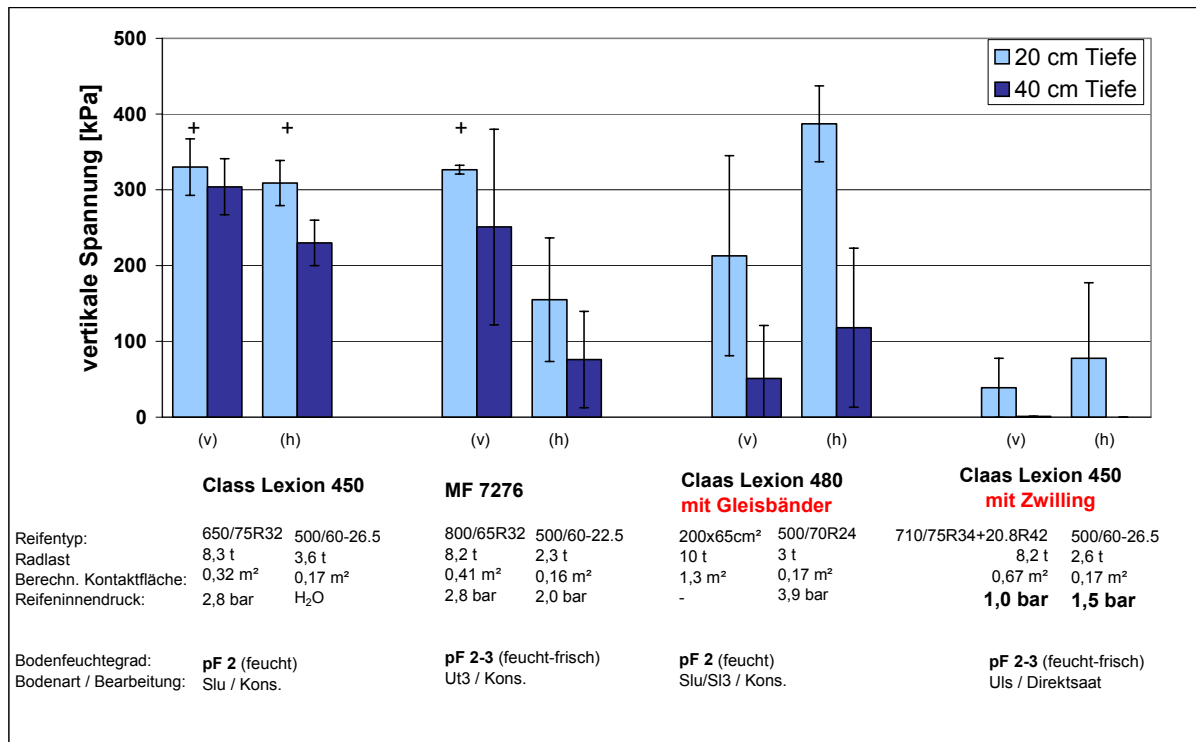


Abbildung 3 Vertikale Spannungen (DMS-Sensor; n = 3) in 20 cm und 40 cm Bodentiefe unter Mähdreschern mit unterschiedlicher Bereifung bei pflugloser Bodenbearbeitung (Kons. = konservierend, Direktsaat); pF – Wert = Bodenwasserspannung; (v): Vorder-/ (h): Hinterrad, +:Spannungen überschreiten Messbereich des älteren Messprogramms

Die Bodendrücke der untersuchten Mähdrescher (Getreide- und Körnermaisernte) liegen im Oberboden überwiegend im Bereich von 150 – 400 kPa (Abbildung 3). Dabei ist ebenfalls ein Einfluss der Fahrwerksausstattung und der Bodenfeuchte feststellbar. Bei praxisüblicher Reifenausstattung der Vorderachsen mit 650er und 800er Reifen lagen die Drücke unter den Vorderachsen hier bei mindestens 300 kPa und im Unterboden noch bei 200 – 300 kPa. Mit bodenschonender Ausrüstung der Vorderachsen (Zwillinge mit niedrigem Reifeninnendruck oder Gleisbänder) sind hingegen 40 – 215 kPa im Oberboden und nur noch 0 – 50 kPa im Unterboden bei gleicher Bodenfeuchte gemessen worden. Der unveränderte Hinterreifen des Claas 480 verursachte im Oberboden einen unvermindert hohen Druck (über 350 kPa bei hoher Bodenfeuchte).

Folglich wird auch hier deutlich, dass durch die Vergrößerung der Reifenaufstandsfläche durch Zwillingreifen oder Gleisband und durch Reifeninnendruckabsenkung eine stark bodendruckmindernde Wirkung erzielt wird. Die praxisüblichen Breitreifen (650er und 800er Reifen an den Vorder- und 500er an den Hinterachsen) können hingegen sehr hohe Bodendrücke bis in den Unterboden verursachen, welche die Bodentragfähigkeit im Mittel weit überschreiten.

Pflügen

Der direkte Bodendruckvergleich eines Traktors mit einem 12-Schar-Pflug onland und eines Traktors mit 5-Schar-Pflug in der Furche (Messung nebeneinander auf einem relativ trockenen Boden) ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Bodendrücke sind aufgrund der geringen Bodenfeuchtigkeit insgesamt gering, dennoch zeigt sich im direkten Vergleich der Bodenbelastung, die von den Hinterrädern der Traktoren ausgeht, dass der weit leichtere Traktor in der Furche, einen vielfach höheren Bodendruck im Unterboden verursacht, als der Gleisbandtraktor, welcher auf der Bodenoberfläche fährt. Durch Onlandpflügen wird die Sohlenverdichtung durch die Furchenräder verhindert und die Bodenbelastung unter der Bearbeitungstiefe minimiert.

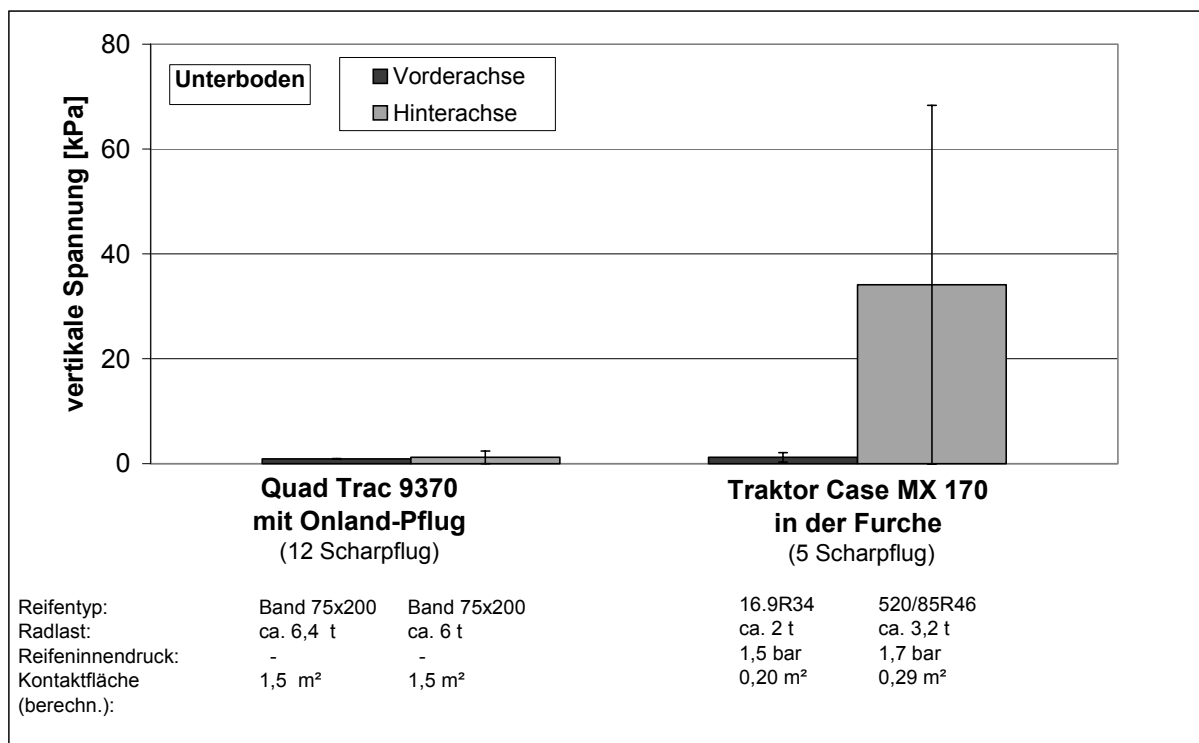


Abbildung 4 Vertikale Spannung (DMS-Sensor; n = 3) in 40 cm Bodentiefe unter einem Gleisbandtraktor mit 12-Scharpflug (onland) und einem Reifentraktor mit 5-Scharpflug (in der Furche) auf einem gut abgetrocknetem Sandlöß-Standort (Wassergehalt: 14 Vol.%, Wasserspannung: pF 3)

Radlast und Bodendruck

Um den Einfluss der Radlast auf die Bodendruckentwicklung im Unterboden in Abhängigkeit der Reifenwahl zu veranschaulichen, wurden in der Abbildung 5 alle gemessenen Bodendrücke, die bei feuchten bis „frischen“ ($p_f \leq 2,5$) Bodenverhältnissen gemessen wurden, in einem Punktediagramm zusammengetragen.

Deutlich zeigt sich, dass die Bodendrücke im Unterboden mit steigender Radlast allgemein ansteigen. Ab ca. 5.000 kg Radlast sind die Bodendrücke überwiegend über 150 kPa hoch. In diesem Radlastbereich sind vor allem Mähdrescher-, Kartoffel- und Rübenroder-, sowie Güllefahrwerke vertreten. Bei bodenschonender Fahrwerksausstattung mit Gleisbändern und Zwillingreifen liegen hingegen die Bodendrücke trotz zum Teil sehr hoher Radlasten bis 13.000 kg unter 100 kPa (siehe Markierung). Damit wird klar, dass bei sehr hohen Radlasten ab ca. 5.000 kg, auch Terra- und Breitreifen häufig nicht mehr in der Lage sind, eine ausreichend schonende Lastabstützung auf den Boden zu gewährleisten. Im Verhältnis zur Last sollte die Reifenaufstandsfläche der Fahrwerke generell überproportional vergrößert werden, wenn man eine schonende Lastabstützung der Maschinen auch bei feuchten bis „frischen“ Bodenverhältnissen erreichen will.

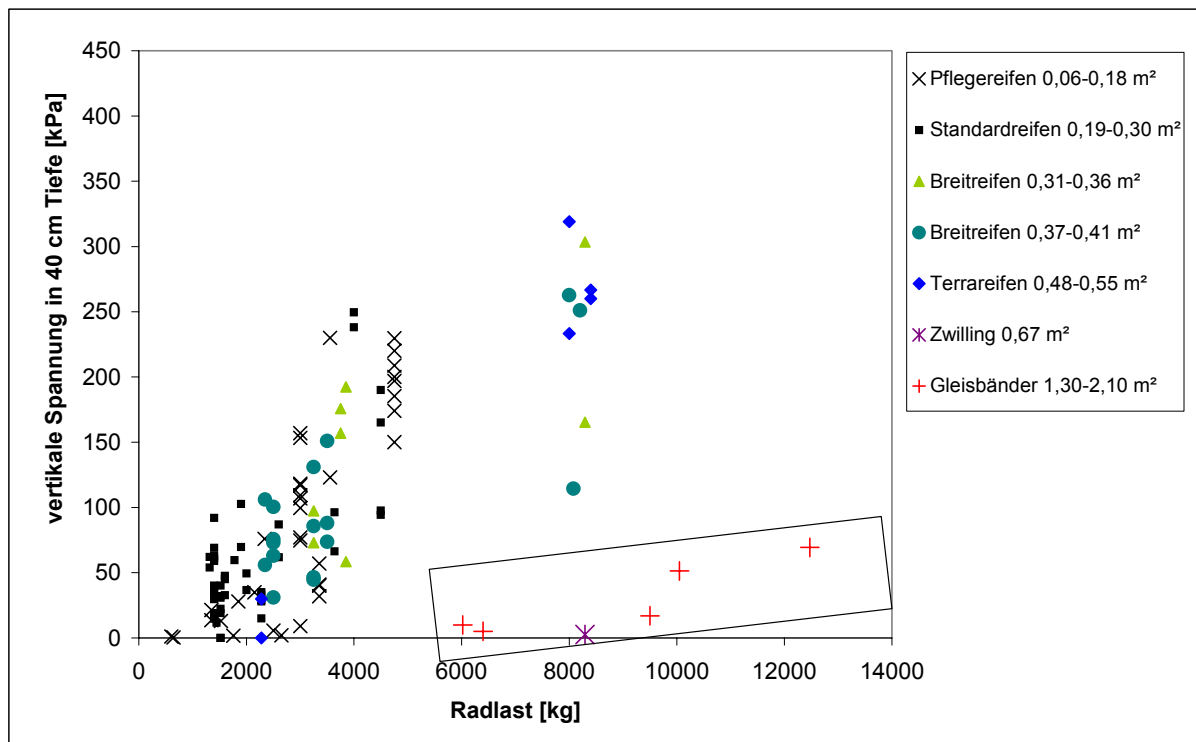


Abbildung 5 Zusammenhang zwischen der Rad-/ Fahrwerkslast (alle Achsen, 1. Überfahrt) und der vertikalen Bodenspannung in 40 cm Bodentiefe (Mittelwerte $n = 3$; DMS-Sensor) mit Kennzeichnung der berechneten Aufstandsflächen; Bodenwasserspannung $p_f \leq 2,5$; gepflügte und konservierend bestellte Böden.

- Kontaktfläche 0,06-0,18 m²: 13 unterschiedliche Reifentypen
- Kontaktfläche 0,19-0,30 m²: 13 unterschiedliche Reifentypen
- Kontaktfläche 0,31-0,36 m²: Reifen 650/75R32, 620/70R42, 650/75R34
- Kontaktfläche 0,37-0,41 m²: Reifen 710/70R38, 800/65R32
- Kontaktfläche 0,48-0,55 m²: Reifen 66x43.00-25, 73x44.00-32
- Kontaktfläche 0,67 m² Zwilling: Reifen 710/75R34+20.8R42

4. Zusammenfassung

Insgesamt zeigen die durchgeführten Bodendruckmessungen, dass durch die Lastabstützung von Maschinen, das Bodengefüge häufig sehr stark beansprucht wird. Die Bodenbeanspruchung übersteigt vor allem bei hohen Radlasten die mittlere Vorbelastung (als Maß für die Bodenstabilität) zum Teil um das Vielfache. Durch die vorliegenden Ergebnisse wird aber auch deutlich, dass gefügeschonende Maßnahmen (Onland-Pflügen, Einsatz von Überladewagen, Zwillingsreifen und Gleisbändern, Reifeninnendruckabsenkung) eine schonende Lastabstützung auch bei feuchteren Bodenverhältnissen ermöglichen.

Konservierende Bodenbearbeitung und Direktsaat erhöhen nachweislich die Bodenstabilität. Dabei ist aber zu beachten, dass auf Grund der reduzierten Bearbeitungstiefe eine schonende Befahrung zum Erhalt eines leistungsfähigen Porengefüges unter dem Bearbeitungshorizont auch hier zwingend notwendig ist.

Da mit steigender Radlast die Tiefenwirkung des Druckes bei gleicher Reifenaufstandsfläche zunimmt und dadurch der Unterboden immer stärker beansprucht wird, sollte bei der Maschinen- bzw. Fahrwerkswahl auf eine im Verhältnis zur Last überproportional große Reifenaufstandsfläche geachtet werden. Reifeninnendruckabsenkung vergrößert die Kontaktfläche zusätzlich und ermöglicht die Dämpfung von Fahrstößen.

Erntefahrten beinhalten bei den meistens Betrieben lange Straßenfahrten, so dass die Fahrwerkseigenschaften eine gute Straßentauglichkeit voraussetzen. Leider sind die Eigenschaften der Fahrwerke häufig im Sinne des Bodengefügeschutzes nicht bodenschonend genug, so dass der Einsatz eines Überladewagens eine sinnvolle Alternative ist.

Beim Pflügen verhindert Onland-Pflügen die direkte Befahrung des Unterbodens, wodurch irreparable oder langjährig beständige Pflugsohlenverdichtungen durch Furchenräder vermieden werden.

Weitere und vertiefende Informationen sind im Internet unter folgendem Link zu finden:

<http://www.landwirtschaft.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/fachinformationen/pflanzenproduktion/bodenbearbeitung/1387.htm>

Literatur:

- ARVIDSON, J. (2001): Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. - Soil & Tillage Res. 60, 67-78.
- BRUNOTTE, J., M. WEISSBACH, H. ROGASIK, E. ISENSEE & C. SOMMER (2000): Zur guten fachlichen Praxis beim Einsatz moderner Zuckerrüben-Erntetechnik. Zuckerrübe 49, 34 – 40.
- CASAGRANDE, A. (1936): The determination of preconsolidation load and its practical significance. Zitiert in: LEBERT, M. (1989): Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Bayreuther Bodenkundl. Ber. 12.
- DÜRR, H.J., H. PETELKAU & C. SOMMER (1995): Literaturstudie Bodenverdichtung. Texte Umweltbundesamt, 55/95, Berlin.
- EHLERS, W., K. SCHMIDTKE & R. RAUBER (2003): Änderung der Dichte und Gefügefunktion südniedersächsischer Lössböden unter Ackernutzung. Landnutzung und Landentwicklung, 44. Jg. H. 1, 9 – 18.
- GYSI, M.; OTT, A.; FLÜHLER, H. (1999): Influence of a single passes with high wheel load on a structured, unploughed sandy loam soil. - Soil & Tillage Res. 52, 141-151.

- HORN, R. (1981): Eine Methode zur Ermittlung der Druckbelastung von Böden anhand von Drucksetzungsversuchen. Z. f. Kulturtechn. u. Flurber., 22, 20 - 26
- HORN, R., J. J. H. van den AKKER & J. ARVIDSSON (Hrsg.) (2001): Subsoil Compaction – Distribution, Processes and Consequences. – Advances in Geocology 32, Catena-Verlag, Reiskirchen.
- KIRBY, J. M., (1994): Simulating soil deformation using a critical-state model. Europ. J. Soil Sci. 45, 239 – 248.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft), Hrsg., (1986): Bodenverdichtungen. KTBL-Schrift 308.
- LARSON, W. E., G. R. BLAKE, R. R. ALLMARAS, W. B. VOOREHEES & S. C. GUPTA (1989): Mechanics and related processes in structured agricultural soils. NATO ASI-Series, E: Applied Sciences 172.
- LEBERT, M. (1989): Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Bayreuther Bodenkundl. Ber. 12.
- LEBERT; M. & R. HORN (1992): Ein Verfahren zur flächendeckenden Erfassung der Bodenstabilität im Hinblick auf die Beurteilung der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Z. Kulturtechnik u. Landentw. 33, 85 – 99.
- RUHM, E., zitiert von SOMMER, C. (1985): Ursachen und Folgen von Bodenverdichtungen sowie Möglichkeiten zu ihrer Verminderung. Landtechnik 40, 9, 378 – 384.
- SCHÄFER-LANDEFELD, L., R. BRANDHUBER, S. FENNER, H.-J. KOCH & N. STOCKFISCH (2004): Effects of agricultural machinery with high axle load on soil Properties of normally managed fields. Soil & Tillage Res. 75, 75-86.
- SOANE, B. D. & C. VAN OUWERKERK, (Hrsg.), 1994: Soil Compaction in Crop Production. Elsevier, Amsterdam
- SÖHNE, W. (1953): Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. Grundlagen der Landtechnik 5, 49 – 63.
- WEISSKOPF, P, U. ZIHMANN, E. DISERENS & T. ANKEN (1997): Zuckerrübensvollernter und Bodenverdichtungen. Schweizer Landtechnik 10, 16-20.