



Das Lebensministerium



Bodendruck und Bodenbelastbarkeit

Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft

Heft 15 - 10. Jahrgang 2005

Freistaat  Sachsen

Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft

Bodendruck und Bodenbelastbarkeit

**Abschlussbericht zum Projekt
„Risikomanagement Bodengefüge“**

Inhaltsverzeichnis

1	<u>Einleitung</u>	1
2	<u>Thematische Einführung</u>	3
2.1	<u>Druckstabilität von Böden</u>	3
2.2	<u>Mechanische Beanspruchung des Bodens</u>	4
2.3	<u>Erfassung und Bewertung schädlicher Bodenverdichtungen</u>	6
2.4	<u>Vorsorgekonzepte</u>	8
3.	<u>Material und Methoden</u>	10
3.1	<u>Standorte</u>	10
3.2	<u>Laboruntersuchungen</u>	14
3.2.1	<u>Bodenphysikalische Kenngrößen und Humus</u>	14
3.2.2	<u>Bodenmechanische Kenngrößen</u>	18
3.3	<u>Felduntersuchungen</u>	19
3.3.1	<u>Dynamische Bodendruckmessungen</u>	19
3.3.2	<u>Guelph-Permeameter</u>	21
4.	<u>Ergebnisse und Diskussion</u>	22
4.1	<u>Erhebungen zur Maschinenausstattung in sächsischen Landwirtschaftsbetrieben</u>	22
4.1.1	<u>Grundlagen</u>	22
4.1.2	<u>Ergebnisse</u>	25
4.1.3	<u>Fazit</u>	38
4.2	<u>Bodenphysikalische und –chemische Eigenschaften der Standorte bei konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung</u>	39
4.2.1	<u>Trockenrohdichte</u>	41
4.2.2	<u>Luftkapazität</u>	41
4.2.3	<u>Nutzbare Feldkapazität</u>	42
4.2.4	<u>Totwasser</u>	42
4.2.5	<u>Wasserleitfähigkeit</u>	42
4.2.5.1	<u>Gesättigte Wasserleitfähigkeit</u>	42
4.2.5.2	<u>Gesättigte Wasserleitfähigkeit der Feldmessung</u>	43
4.2.6	<u>Humusgehalt</u>	43
4.2.7	<u>Diskussion</u>	44
4.3	<u>Bodenmechanische Kennwerte der Standorte bei konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung sowie auf Grünland</u>	46
4.3.1	<u>Vorbelastung</u>	46
4.3.2	<u>Scherwiderstände</u>	51
4.3.3	<u>Diskussion</u>	53

4.4	<u>Zusammenhänge zwischen bodenphysikalischen und –mechanischen Kenngrößen</u>	54
4.4.1	<u>Vorbelastung und Trockenrohdichte</u>	54
4.4.2	<u>Vorbelastung und Luftkapazität</u>	55
4.4.3	<u>Vorbelastung und gesättigte Wasserleitfähigkeit</u>	56
4.4.4	<u>Diskussion</u>	56
4.5	<u>Vertikale Bodendrucke bei dynamischer Belastung</u>	59
4.5.1	<u>Überblick</u>	59
4.5.2	<u>Maschinengruppen</u>	67
4.5.2.1	<u>Grundbodenbearbeitung</u>	67
4.5.2.2	<u>Düngung und Pflanzenschutz</u>	69
4.5.2.3	<u>Mähdrusch</u>	73
4.5.2.4	<u>Kartoffelproduktion</u>	75
4.5.2.5	<u>Zuckerrübenernte</u>	77
4.5.2.6	<u>Erntetransport</u>	79
4.5.2.7	<u>Zugmaschinen</u>	81
4.5.2.8	<u>Absenkung Reifeninnendruck</u>	83
4.5.2.9	<u>Gleisbänder</u>	85
4.5.3	<u>Diskussion</u>	87
4.6	<u>Schätzung des Bodendrucks</u>	95
4.6.1	<u>Schätzung nach der Newmark-Formel im Vergleich zur Messung</u>	95
4.6.2	<u>Diskussion</u>	100
4.7	<u>Schätzmodelle für die Vorbelastung</u>	103
4.7.1	<u>Vergleich der Mess- mit Schätzwerten</u>	103
4.7.2	<u>Diskussion</u>	106
4.8	<u>Entscheidungshilfe Bodendruck</u>	108
4.8.1	<u>Grundlagen</u>	108
4.8.2	<u>Ziel der „Entscheidungshilfe Bodendruck“</u>	111
4.8.3	<u>Vorgehen</u>	112
5.	<u>Zusammenfassung</u>	115
6.	<u>Literatur</u>	117
7.	<u>Anhang</u>	123

1 [Einleitung](#)

Seit etwa 40 Jahren wird weltweit in der agrarwissenschaftlichen Literatur über eine langsam fortschreitende Zunahme der Bodenverdichtung durch den Einsatz schwerer Landtechnik berichtet (u.a. SÖHNE, 1953; GILL & VANDENBERG, 1967; KTBL, 1986; PETELKAU et al., 1988; LARSON et al. (Hrsg.), 1989; SOANE & VAN OUWERKERK (Hrsg.), 1994; DÜRR et al., 1994), welche die Bodenfunktionen beeinträchtigt. Betroffen ist vor allem der Boden unterhalb der Krume. Die steigenden Radlasten führen hier in Verbindung mit zunehmenden Kontaktflächen und -drücken zum Ansteigen und zur tieferen Einwirkung der Druckspannungen. Trotz längst erkannter Gefahr ist es aber bisher nur ansatzweise gelungen, die Zunahme dieser Bodenbeanspruchung großflächig durch bodenschonende Maßnahmen zu stoppen.

Die Hauptgründe dafür sind fehlende bzw. nicht standardisierte Diagnosemethoden für die Bodenverdichtung. Die quantitativen Möglichkeiten zur Erfassung der Verdichtung durch einzelne Überfahrten anhand von einfachen bodenphysikalischen Kenngrößen, wie z.B. der Lagerungsdichte, sind im Unterboden beschränkt. Die Verdichtung stellt sich dort durch die kurze Einwirkdauer der Belastung und die starke Spannungsreduktion durch Verformungen im oberen Boden oft erst nach regelmäßig wiederkehrenden Belastungsimpulsen in messbarer Form ein (HORN und LEBERT, 1994). Dann kann sie aber keinem bestimmten Verfahren mehr zugeordnet werden. 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 diesen Gründen kann die Verdichtung als Prozess im Einzelfall mit herkömmlichen Methoden oft nicht nachgewiesen werden. Eine bodenphysikalische und -mechanische Datenbasis für Bodenschutzmaßnahmen fehlt fast völlig.

Aus der Sicht der mechanischen Beanspruchung des Bodens bietet die Landtechnik zwar ein breites Spektrum an vermeintlich bodenschonenden Maßnahmen an, wie z.B. Breitreifen, Niederdruckreifen, Luftdruckregelanlagen und Verfahren der nichtwendenden konservierenden Bodenbearbeitung. Der Landwirt weiß aber im konkreten Fall nicht, wie wirksam diese Verfahren und Maßnahmen sind, weil er die Wirkungen auf den Unterboden nicht erfassen kann. Auch aus der Sicht der Beratung und der Landtechnik bestehen kaum geeignete Ansätze zur standort- und situationsspezifischen Einschätzung der mechanischen Beanspruchung des Bodens durch unterschiedliche Maschinen.

Bodenmechanische Messungen haben jedoch gezeigt, dass z.B. die Spannungseinträge in den Unterboden beim Pflügen die bodeneigene Festigkeit weit übersteigen können und damit stetig zu einer Verformung der Bodenstruktur in Richtung einer höheren Dichtlagerung beitragen (LEBERT & SPRINGOB, 1994). Zu einer effektiven, langfristigen Vorbeugung gegen Bodenverdichtungen werden daher oft Mulchsaatverfahren der konservierenden Bodenbearbeitung vorgeschlagen, welche durch den Pflugverzicht den Belastungseintrag drastisch reduzieren (SOMMER, 1998) und zur

Ausbildung eines stabileren, verdichtungsresistenteren Bodengefüges beitragen sollen (SEMMELE, 1993; WIERMANN, 1998).

Derartige Stabilisierungsprozesse können mit Hilfe bodenmechanischer Verfahren nachgewiesen werden, welche sensibler und zuverlässiger sind als herkömmliche bodenphysikalische Methoden (LEBERT & HORN, 1992). Der methodische Ansatz berücksichtigt als Maß für die Verdichtbarkeit die mechanische, vertikale Druckstabilität im Boden, die im Labor unter dem Begriff "Vorbelastung" für bestimmte Stufen der Bodenfeuchte ermittelt werden kann (DVWK, 1995). Die Vorbelastung gibt an, welche Belastung der Boden maximal kompensieren kann, ohne dass es zu einer weiteren Verdichtung kommt. Da die Vorbelastung als innere Bodenstabilität die gleiche Dimension (kPa) wie der Kontaktflächendruck von Fahrzeugreifen hat, kann anhand der Vorbelastung eine Vorhersage des Bodenverhaltens für einzelne Überfahrten erfolgen. Stellt man die Vorbelastung den allgemein üblichen Bodenbelastungen eines bestimmten Bewirtschaftungsverfahrens gegenüber, kann daraus eine Prognose erfolgen, bei welchen Bewirtschaftungsweisen zukünftig eine weitere Zunahme der Bodenverdichtung zu erwarten ist.

Bezüglich der Druckstabilität der Böden sowie hinsichtlich ihrer tatsächlichen mechanischen Beanspruchung existieren in Sachsen bisher keine Erkenntnisse.

Ziel des Vorhabens war daher die Quantifizierung der mechanischen Belastbarkeit typischer, sächsischer Ackerböden und der mechanischen Belastung der Böden durch die üblicherweise in den Betrieben eingesetzte Technik. Hierbei wurde insbesondere darauf Wert gelegt, die mechanische Beanspruchung in situ unter fahrenden Maschinen zu erfassen. Aufbauend auf diese Erkenntnisse sollte zudem eine Entscheidungshilfe zum bodengefügeschonenden Maschineneinsatz entwickelt werden. Dies stellt die Grundlage zur Konkretisierung der Grundsätze der guten fachlichen Praxis gemäß § 17 Bundesbodenschutzgesetz BBodSchG dar (BML, 1999).

2 [Thematische Einführung](#)

2.1 **Druckstabilität von Böden**

Eine bodenschonende Befahrung des Bodens erfordert Kenntnisse über dessen Tragfähigkeit bzw. Verdichtungsempfindlichkeit. Ein geeignetes Maß für die mechanische Belastbarkeit von Böden ist die sogenannte Vorbelastung, die sich aus dem Drucksetzungsverhalten eines Bodens ableiten lässt (CASAGRANDE 1936; HORN 1981; LEBERT & HORN 1991). 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, weil 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.

Die Messung der Vorbelastung erfolgt zumeist an ungestörten Stechzylinderproben (auch Feldmessungen sind möglich), die im einaxialen Druckversuch verschiedenen vertikalen Drücken ausgesetzt werden. Aus der Drucksetzungskurve wird nach einem Verfahren von CASAGRANDE (1936) oder alternativ auch nach anderen Verfahren (z.B. OHDE 1949, zitiert in BÖLLING 1971) die Vorbelastung bestimmt und als metrische Größe in der Einheit kPa angegeben.

Die Vorbelastung aus dem einaxialen Druckversuch gibt das Druckkompensationsvermögen gegen vertikale Krafteinwirkungen an.

Um flächenhaft Aussagen über die Belastbarkeit von Ackerböden machen zu können, wurden von verschiedenen Autoren Pedotransferfunktionen ermittelt, die aus Bodenkennwerten die Vorbelastung schätzen (LEBERT 1989, NISSEN 1999, DVWK 234, 1995; ATV-DVWK 901, 2002; DIN 19688, 2000).

Die Bodenstabilität ist im Wesentlichen von der Bodenart, der Lagerungsdichte, dem Aggregierungsgrad, dem Wassergehalt/-spannung und dem Gehalt an organischer Substanz des Bodens abhängig. Diese Eigenschaften bestimmen, wie stark die Bodenteilchen zusammenhängen und vertikalen und horizontalen Krafteinwirkungen Widerstand leisten können. Ein beispielsweise hoher Wassergehalt des Bodens wirkt stabilitätsmindernd, weil Wasser einen Gleitfilm zwischen den Bodenteilchen bildet und damit die Verschiebung der Bodenteilchen untereinander stark erleichtert. Der Widerstand des Bodens gegen horizontale Krafteinwirkungen z.B. durch Reifenantriebskräfte bzw. Schlupf sowie Bremskräfte, kann anhand der Messung seiner Scherfestigkeit eingeschätzt werden. Die Scherfestigkeit hängt von der Auflast (entspricht der vertikalen Normalspannung) und den Bodenparametern Kohäsion und Winkel der inneren Reibung ab. Die Kohäsion beschreibt den Scherwiderstand bei unbelastetem Boden und der Winkel gibt an, wie stark der Scherwiderstand mit der Auflast zunimmt. Für die Messung der Scherfestigkeit gibt es verschiedene Labor- und Feldmethoden, die vor allem in der Baugrundforschung entwickelt wurden (z.B. DIN 18136, DIN 18137/2 oder DIN 4096).

Reicht bei einer Belastung des Bodens durch Befahrung dessen Druckkompensationsvermögen nicht aus, so sinken die Reifen soweit in den Boden ein, bis der Boden durch Verdichtung und damit Erhöhung der Kornkontaktzahl, die Last abstützen kann. Damit erhöht sich gewöhnlich neben der Dichte auch die Vorbelastung in diesem Bodenbereich. Nach (PAUL 2004) spiegelt sich in der Vorbelastung des Bodens die Gesamtheit der bodeneigenen Kräfte und Einflussfaktoren wider, welche das Ergebnis der bisher erfahrenen Belastungen, der mechanischen und natürlichen Auflockerungen sowie der Verfestigungen durch Saugspannungen und Aggregation sind. Weil der Boden je nach Bodenfeuchte eine unterschiedliche Stabilität aufweist, sind die Kennwerte Vorbelastung und Schwerwiderstand immer feuchteabhängig zu betrachten.

2.2 Mechanische Beanspruchung des Bodens

Um einer technogen bedingten schädlichen Verdichtung des Bodens vorbeugen zu können, muss neben der Druckstabilität des Bodens auch das Ausmaß seiner mechanischen Beanspruchung bekannt sein.

Von außen auf den Boden einwirkende Kräfte werden bei Bezug auf eine Fläche allgemein als Drücke bezeichnet. Als Reaktionskraft rufen sie im Inneren des Bodenkörpers Spannungen hervor (HARTGE & HORN 1991). Der Begriff „Spannung“ beschreibt die Kraft, die im Inneren eines durch eine äußere Kraft belasteten, elastischen Körpers je Flächeneinheit auftritt (KEZDI 1969) zitiert in DVWK 1998). Eine Belastung des Bodens tritt in Form äußerer Kräfte, z.B. Kontaktflächendruck, auf (siehe Abb. 2.2-1). Eine Bodenbeanspruchung stellt das Auftreten von Spannungen im Boden dar (Bodendruck), worauf eine Verdichtung und Spurbildung folgen kann (SOMMER 1985). Spannungen im Boden werden durch das Einwirken von Kräften und Drehmomenten bei der Befahrung erzeugt. Vertikal wirken vor allem Gewicht-, Stütz- und Schwingungskräfte, horizontal sind es unter anderem Antriebs- und Bremskräfte.

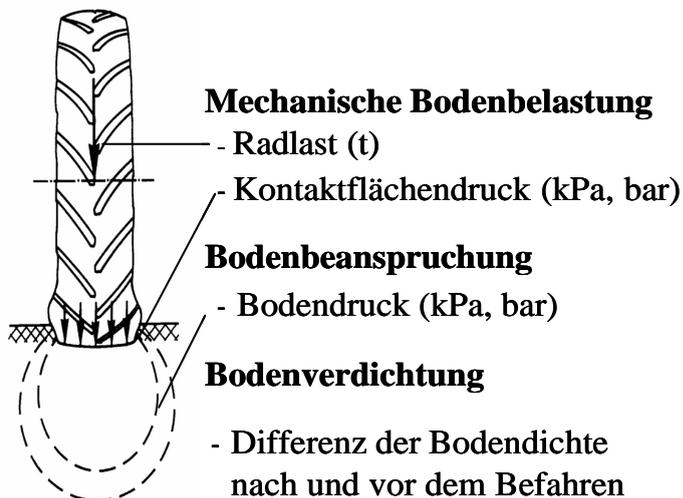


Abbildung 2.2-1: Belastung, Beanspruchung und Verdichtung des Bodens nach SOMMER (1985)

Weil der Vorgang der Bodenbelastung durch die verschiedenen vertikal und horizontal wirkenden Kräfte (Druck und Schubspannungen) sehr komplex ist, wird in der Bodenmechanik auf einfache Kenngrößen zurückgegriffen, die jedoch die Haupteinflussfaktoren erfassen.

Die Belastung wird mit der **Radlast** oder mit dem **Kontaktflächendruck** in der Berührungsfläche Reifen (bzw. Gleisband) und Boden angegeben. Der mittlere Kontaktflächendruck stellt den Quotienten aus Gewichtskraft und der Kontaktfläche dar. Er ist somit die über die Berührungsfläche Reifen-Boden wirksam werdende mechanische Belastung des Bodens (DVWK 1998).

Infolge des aufgebrauchten Kontaktflächendrucks treten im Boden mechanische Spannungen auf, deren Verlauf mit Linien gleichen **Bodendruckes** (Druckzwiebeln) angegeben werden können (BMVEL 2002).

Neben der Radlast und dem Kontaktflächendruck gibt es weitere Belastungsfaktoren des Bodens:

- die Belastungsdauer z.B. in Form der Fahrtgeschwindigkeit,
- die Häufigkeit der Belastung in Form der Überrollungsanzahl und
- dynamische Effekte z.B. Schlupf, Eigenschwingungen des Fahrzeuges und Lenkbewegungen (DVWK 1998).

Die statische Radlast ist leicht zu bestimmen. Sie entscheidet über die Tiefenwirkung des Druckes. So wird z.B. bei steigender Radlast und gleichzeitigem Konstanthalten des Kontaktflächendrucks durch Vergrößerung der Aufstandsfläche, das durch Spannungen belastete Bodenvolumen größer und die Beanspruchung reicht tiefer in den Boden. Zur Beurteilung der Wirkung der Radlast ist daher die Kenntnis der Kontaktfläche nötig. Ableitungen von Maßnahmen, die allein auf der gegebenen Höhe der Radlast beruhen, sind daher ungenügend.

Der Kontaktflächendruck bestimmt die Ausgangsbeanspruchung des Bodens. Die Kontaktfläche des Reifens kann im Feld durch Umstäuben des Reifens mit Kalk bestimmt werden. Ferner gibt es verschiedene empirische „Faustformeln“, mit denen sich anhand der Reifendimension, der Reifenart und/oder des Reifeninnendrucks die mittlere Kontaktfläche bzw. der mittlere Kontaktflächendruck schätzen lassen (z.B. INNS & KILGOUR 1976, MC KYES 1985, KOOLEN & KUIPERS 1983, DISERENS 2002, CHAMEN 2003). Allerdings stimmen die aus den mittleren Kontaktflächen errechneten Drücke häufig nicht mit den tatsächlichen, im Boden gemessenen Spannungen überein. Die Spannungen im Boden unmittelbar unter der Kontaktfläche sind häufig größer als die mittleren Kontaktflächendrücke (KÜHNER 1997). Dies liegt daran, dass die Belastung des Bodens innerhalb der Kontaktfläche nicht gleichmäßig ist. Die Bodenbelastung unter den Stollen ist aufgrund deren weiteren Entfernung vom Achsmittelpunkt des Rades und deren kleinen Flächen oft um ein vielfaches höher als unter den Stollenzwischenräumen (HORN et al. 1987, zitiert in DVWK 1998). Des Weiteren gibt es aufgrund der Bauart des Reifens und des Reifeninnendrucks Zonen unterschiedlicher Druckübertragung auf den Boden. Bei Standardreifen, die mit höheren Drücken gefahren werden, hinterlässt die Mitte der Lauffläche durch sich überlappende Stollen die Zone höchster Belastung. Bei Breitreifen und Terrareifen, welche weniger profiliert sind und mit niedrigeren Reifeninnendrücken betrieben werden, kann der Randbereich mit den festeren Flanken stärker pressen (KÜHNER 1997). Auch innerhalb der Aufstandsfläche von Gummigleisbändern ist die Spannungs-

verteilung häufig ungleichmäßig. Hier treten unter den Antriebsrollen meist die höchsten Spannungen auf (KELLER 2004).

Weil die Stolleneffekte überwiegend auf den Oberboden beschränkt bleiben, kann der „mittlere“ Kontaktflächendruck bei relativ gleichmäßiger Lastabstützung im Fahrwerk als brauchbare Größe zur Beurteilung von Belastungen im Unterboden dienen (DVWK 1998).

Der Bodendruck in verschiedenen Tiefen kann anhand von Bodendrucksonden gemessen werden. Hierbei kommen Schlauchsonden (BOLLING), Sonden mit Dehnungsmessstreifen oder Sonden mit hydraulischem Prinzip zum Einsatz. Der Unterschied liegt darin, dass Schlauchsonden mittlere (Normal-)Spannungen messen, während die beiden anderen Systeme eine gerichtete (Normal)Spannung erfassen, und daher zur Ermittlung der vertikalen Spannung geeignet sind (SEM-MEL et al. 1993; WIERMANN 1998, VAN DEN AKKER & CARSJENS 1989). Um die Spannungen möglichst in ungestörtem Boden messen zu können, werden die Sensoren von der Seite in den Bodenkörper eingebracht.

Theoretische Betrachtungen und daraus abgeleitete mathematischen Lösungen zur Berechnung der räumlichen Spannungsausbreitung wurden von BOUSSINESQ (1885, zitiert in KOOLEN & KUIPERS 1983) erstellt. Der Boden wird dabei als homogen, linear-elastisch, isotrop und gewichtslos angesehen. Die Lösung von BOUSSINESQ spiegelt das Verhalten von natürlichen Böden nur unzureichend wider, weil weder Elastizität noch Volumenkonstanz vorausgesetzt werden können. Dennoch diente sie als Grundlage für die Weiterentwicklung realitätsnäherer Lösungen. FRÖHLICH (1934; zitiert in PETH 2004) modifizierte die Gleichung BOUSSINESQs dadurch, dass er dem Einfluss der unterschiedlichen „Steifigkeit“ von Böden auf die Spannungsverteilung Rechnung tragen wollte und einen „Konzentrationsfaktor“ ν_k einführte. Der Konzentrationsfaktor basiert auf der Annahme, dass die Spannungen sich stärker um die Lotrechte der Last konzentrieren und sich tiefer in den Boden fortpflanzen, je feuchter und weicher ein Boden ist (hoher Konzentrationsfaktor). HORN et al. (1991) machen die Wahl des Konzentrationsfaktors neben den Bodeneigenschaften auch von der Größe der Kontaktfläche und des Kontaktflächendrucks abhängig.

2.3 Erfassung und Bewertung schädlicher Bodenverdichtungen

Als schädlich wird eine Verformung des Bodengefüges bezeichnet, wenn Bodenfunktionen, die Produktions-, Ausgleichs- und Regelungs- oder Lebensraumfunktion dauerhaft negativ beeinträchtigt werden. Direkte Auswirkungen einer schädlichen Bodengefügeveränderung sind häufig zunächst bei den physikalischen Ausgleichs- und Regelungsfunktionen sowie der Produktionsfunktion (Ertrag) zu beobachten (LEBERT et al., 2004). So führt eine starke Abnahme des Porenvolumens oder eine Porenumverteilung zu einer Abnahme der Leitfähigkeit für Wasser und Luft sowie des Wasserspeichervermögens. Eine starke Verfestigung des Bodens führt zu einem gehemmten Wurzelwachstum. Die Folgen für den Luft- und Wasserkreislauf sowie auf die Ertragsfähigkeit der Böden sind allgemein bekannt.

Vorsorgemaßnahmen zum Bodengefügeschutz konzentrieren sich vor allem auf schädliche Gefügeveränderungen unterhalb der regelmäßig bearbeiteten Krume, da hier dauerhafte Schäden zu befürchten sind. Saisonal bedingte Verdichtungen in der Ackerkrume (z.B. Fahrspur) können ebenfalls zu starken Schäden führen, z.B. Erosion und Oberflächenabfluss in Fahrspuren oder auf Vorgewenden, jedoch kann hier das Gefüge durch Bodenbearbeitung wieder gelockert werden. Mindestanforderungen an bestimmte Bodenparameter für die Ertragsfähigkeit von Böden wurden von verschiedenen Autoren untersucht und beschrieben (z.B. CZERATZKI 1972, PETELKAU 1984, WERNER & THÄMERT 1989). Nach einer Literaturlauswertung von LEBERT et al. (2004) sind zur Erkennung einer schädlichen Bodenveränderung vor allem für die Bodenparameter effektive Lagerungsdichte, Packungsdichte, Luftkapazität, Sauerstoffdiffusion und gesättigten Wasserleitfähigkeit geeignete Schadensschwellenwerte benannt worden. So definieren WERNER & PAUL (1999) den Gefügestand des Bodens an der Untergrenze ökologischer Funktionsfähigkeit beim Vorliegen einer Luftkapazität von mindestens 8 Vol.-% in der Krume, 5 Vol.-% im Unterboden und einer gesättigten Wasserleitfähigkeit von mindestens 10 cm/d. Diese Schadensschwellen sind auch Bestandteil des Ansatzes „Belastungsquotient“ nach PAUL (1993). PETELKAU et al. (2000) definieren für Böden in Brandenburg funktionale Lagerungsdichtegrenzwerte für die verschiedenen Bodenarten, die im Oberboden mit dem Grad zu erwartender Ertragsausfälle und im Unterboden mit einer bestimmter Mindestluftleitfähigkeit korrelieren. Die Arbeitsgruppe „Physikalischer Bodenschutz“ der Bodenkundlichen Gesellschaft in der Schweiz (BGS) erachtet eine effektive Lagerungsdichte von 1,7 g/cm³ als Richtwert einer schädlichen Bodenverdichtung (DISERENS & SPIESS 2004). Für eine eindeutige Identifikation einer Schadverdichtung müssen nach LEBERT et al. (2004) nicht nur bodenphysikalische Kennwerte, sondern auch eine Feldgefügeansprache durch geschultes Fachpersonal die Kriterien einer Schadverdichtung erfüllen. Sie sehen demnach eine schädliche Bodenveränderung im Unterboden bei dem Vorliegen einer Luftkapazität unter 5 Vol.-%, einer gesättigten Wasserleitfähigkeit von weniger als 10 cm/d und einer Feldgefügeansprache (effektive Lagerungsdichte, Packungsdichte oder Spatendiagnose) in Stufe 4 oder 5 als erwiesen.

Die aktuelle Verbreitung von schadverdichteten Ackerböden in Deutschland ist kaum abzuschätzen. Nachweislich befinden sich Schäden auf Flächen mit besonderen Belastungsbedingungen, wie z.B. Vorgewenden, Kippenflächen oder Flächen aus Bodenbelastungsversuchen (z.B. PETELKAU 1984). Schäden auf Kernproduktionsflächen sind nicht nachgewiesen. Nach LEBERT et al. (2004) liegen hier lediglich Berichte über Veränderungen von Bodenfunktionen vor (z.B. schleichende Zunahme der Lagerungsdichte von 144 niedersächsischen Ackerböden nach RUHM 1984). Für die Bewertung zukünftig zu erwartender Schäden oder negativer Veränderungen von Bodeneigenschaften sind systematische Erhebungen zur Bodengefügeentwicklung auf Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) nötig.

2.4 Vorsorgekonzepte

In der Vergangenheit sind zum Schutz des Bodengefüges vor allem allgemein zu empfehlende Vorsorgemaßnahmen formuliert worden (DÜRR et al. 1994, KTBL 1999). SOMMER (1998) fasste die vorhandenen Handlungsempfehlungen in seinem Konzept „Bodenschonendes Befahren“ zusammen. Demnach sind technische Verbesserungen an den Fahrzeugen, die Anpassung von Arbeitsverfahren, die Begrenzung der mechanischen Belastung sowie die Verbesserung der Belastbarkeit des Bodens möglich. Die Auswahl der Einzelmaßnahmen richtet sich dabei vor allem nach den betrieblichen Möglichkeiten.

Um den Handlungsbedarf zur Vorsorge standörtlich konkretisieren zu können, sind von verschiedenen Institutionen Vorsorgekonzepte entwickelt worden:

- „Vorbelastungskonzept“ nach DVWK (1995)
- „Belastungsquotient“ nach KUL (heute USL) (PAUL 1993)
- „Schadverdichtungsgefährdungsklassen“ nach ZALF (PETELKAU et al. 1998)
- „TASC“ der FAT in der Schweiz (DISERENS & SPIESS 2004)

Sie basieren auf Modellen, welche konkret eine Abschätzung zur potenziellen Verdichtungsgefährdung eines Bodenstandortes durchführen. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Bodenverdichtung nur dann eintreten kann, wenn die Bodenbelastung die vorhandene Bodenbelastbarkeit übersteigt.

Im Vorbelastungskonzept, im Belastungsquotient-Konzept und im Modell TASC erfolgt die horizontspezifische Einschätzung der Bodenstabilität anhand der Vorbelastung. Das Vorbelastungskonzept nach DVWK (1995) orientiert sich dabei am vorhandenen Zustand des Bodengefüges und zielt darauf ab, diesen zu erhalten. Die anderen zwei Konzepte orientieren sich am pflanzenbaulich noch tolerierbaren Gefügestand und richten sich daher nach Vorbelastungswerten, die mit bestimmten Gefügeeigenschaften (bodenphysikalische Schadensschwellen) korrelieren. „Tolerierbare“ Verdichtungen, vor allem auf überlockerten Böden, sind zugelassen.

Die Einschätzung der Belastung des Bodengefüges bei diesen Ansätzen erfolgt durch die Berechnung des Bodendruckes. Im Vorbelastungskonzept werden - orientiert an der Vorbelastung - aus den entsprechend tolerierbaren Kontaktflächendrücken maximal tolerierbare Radlasten abgeleitet. Das Konzept Belastungsquotient richtet sich nach der durchschnittlichen Belastung des Bodens typischer Maschinen innerhalb eines Anbaujahres in einem Betrieb. Im Gegensatz dazu nimmt TASC die Bewertung einzelner Maschinen vor.

Das Konzept Schadverdichtungsgefährdungsklassen basiert auf oberbodenspezifischen Lagerungsdichtegrenzwerten, die mit Ertragseinbußen korrelieren. Es ist in erster Linie ein Krumenschutzkonzept für gepflügte Ackerböden, da die stabilisierende Wirkung der Gefügebildung nicht berücksichtigt ist. Die Belastungsanalyse wird für eine Anbaufrucht mit ihren typischen Arbeitsgängen und technische Ausstattung ermittelt.

Im Vergleich zu den genannten Konzepten führt das Konzept „Befahrbarkeit“ nach FAL (SOMMER et al. 2003) keine Prognose durch, sondern es misst die tatsächliche Bodensetzung im Feld. Über einen Sensor am Fahrwerk, welcher die Spurtiefe misst, und anhand einer modellgestützten Sensorik, wird der reale Kontaktflächendruck ermittelt. Dies dient zur in-situ-Entscheidung über die Befahrbarkeit des Bodens. Die Druckbelastung und Druckbelastbarkeit des Unterbodens können anhand dieser Methode nicht ausreichend abgeschätzt werden.

3 [Material und Methoden](#)

3.1 Standorte

Tabelle 3.1-1: Untersuchungsstandorte zu physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Böden 2000 - 2004 in Sachsen

	Acker		Grünland
	Pflug	Kons.	
Lößhügelland	Lüttewitz Methau Littdorf	Lüttewitz Methau Littdorf Frohburg	Großstolpen Methau
Auen	Köllitsch Wellaune	Köllitsch	Thallwitz Köllitsch
Verwitterungsböden			Christgrün Plauen
Diluvium	Zschortau Seehausen Sprotta Badrina Wildenhain	Zschortau Seehausen Sprotta Doberschütz	Wildenhain

Die Untersuchungen erfolgten schwerpunktmäßig auf Ackerböden im sächsischen Lößhügelland und zwar auf Parabraunerden, z.T. mit Pseudovergleyung, sowie in der sächsischen Teich- und Heidelandschaft auf diluvialen Böden (Sandlöß-Parabraunerde, Braunerde-Podsole, Pseudogley und Sandgley, siehe Tab. 3.1-2). Repräsentativ für Vegen der Auen sind die Standorte Köllitsch in der Elbniederung zwischen Riesa und Torgau sowie Thallwitz und Wellaune in der Muldeniederung südlich und nördlich Eilenburgs. Plauen und Christgrün im sächsischen Vogtland repräsentieren Braunerden der Verwitterungsböden (Abb. 3.1-1). Mit Ausnahme der ackerbaulichen Versuchspartzele in Seehausen wurden ausschließlich Flächen untersucht, die einer praxisüblichen Bewirtschaftung unterliegen. Ferner wurde Wert darauf gelegt, an jedem Standort möglichst immer gleichzeitig gepflügte und langjährig konservierend bearbeitete Flächen zu untersuchen. Am Standort Seehausen wurden drei Bodenbearbeitungsvarianten (Pflug, Pflug flach und konservierend) eines Dauerfeldversuchs der Martin-Luther-Universität Halle hinsichtlich der bodenmechanischen Parameter beprobt.

Die Böden der Lößstandorte sind ausnahmslos tonige Schluffe (siehe Tab. 3.2.1-2). In Frohburg ist der schluffige Oberboden von einem Tonboden unterlagert. Im Auenstandort Köllitsch handelt es sich bei den untersuchten Böden um lehmige Sande oder tonige Lehme. In Thallwitz und Wellaune liegen tonige Schluffe vor. Der Unterboden in Wellaune ist ein schluffiger Ton. Die Böden der sächsischen Teich- und Heidelandschaft, Sprotta, Badrina, Wildenhain und Doberschütz sind Sandböden mit schwachen Ton- und Schluffanteilen. Bei den untersuchten Böden im Vogtland handelt es sich um sandige oder schluffige Lehme bzw. ein schluffig-lehmiger Sand.

Die Bodendruckmessungen fanden zum Teil auf den bodenphysikalisch untersuchten Standorten statt (siehe Tab. 3.1-3).

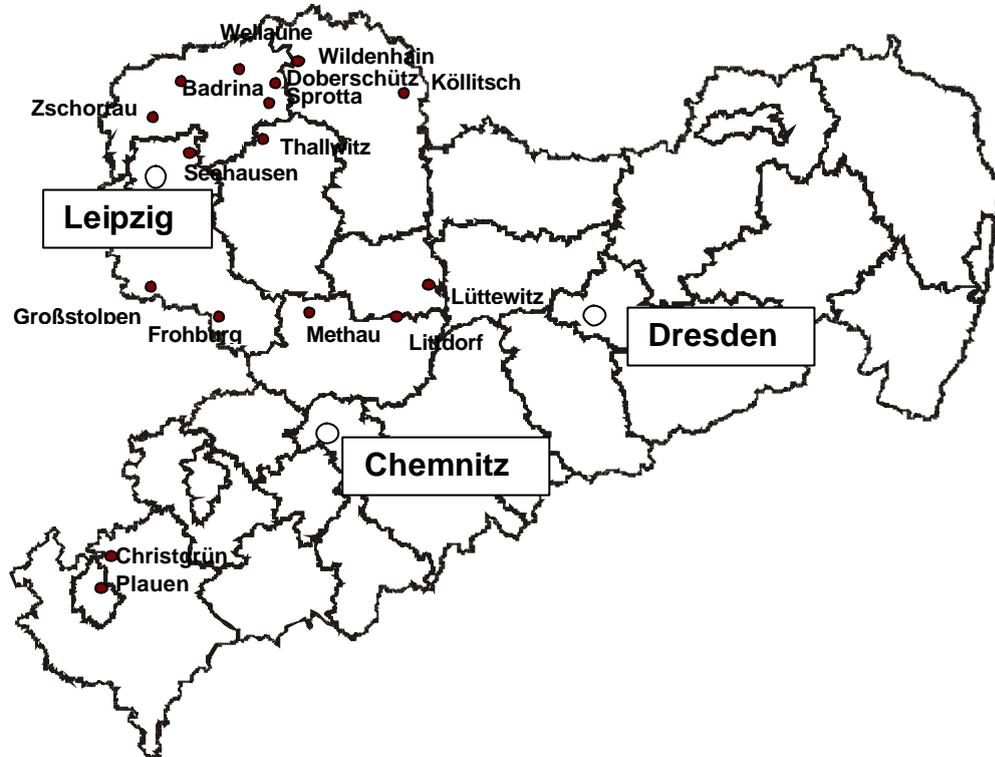


Abbildung 3.1-1: Geografische Lage der bodenmechanischen und -physikalischen Untersuchungen

Tabelle 3.1-2: Standortdaten der bodenmechanischen und -physikalischen Untersuchungsstandorte (Bodentyp nach Bodenansprache; „n.b.“ = nicht bestimmt)

Standort/ Parameter	Bodentyp	Niederschlag langj. Ø [mm]	Beprobung	Vorfrucht/ Fruchtart
Lüttewitz	Parabraunerde	600	09/2000	n.b.
Littdorf	Parabraunerde-Pseudogley	620	05/2001	n.b.
Methau	Parabraunerde-Pseudogley	670	08/2001	n.b.
Zschortau	Parabraunerde Pseudogley-	440	03/2001	n.b.
Seehausen	Parabraunerde-Pseudogley	560	04/2002	n.b.
Sprotta	Braunerde-Podsol	550	04/2002	n.b.
Badrina	Braunerde-Podsol	410	04/2002	n.b.
Köllitsch R	Vega	500	6/2001 u. 3/2002	n.b.
Köllitsch L1		500	11/2001	n.b.
Köllitsch L2		500	6/2002	n.b.
Köllitsch K		500	11/2001	n.b.
Köllitsch F		500	6/2002	n.b.
Frohburg	Lößtieflerhm - Staugley	660	04/2003	W.-Weizen/ Kartoffeln
Wellaune	Auenbraun- erde-Pseudogley	560	04/2003	Mais
Wildenhain	Sand-Braunerde-Sand-Gley	550	09/2003	Roggen/
Doberschütz	Haftnässe-Pseudogley	550	09/2003	Roggen/ Futterroggen
Grünland:				
Wildenhain	Sand-Braunerde	550	09/2003	-
Großstolpen	Lehm-Gley-Pseudogley	580	04/2003	-
Christgrün	Braunerde- Pseudogley	740	10/2003	-
Thallwitz	Auenbraunerde	560	05/2003	-
Methau	Parabraunerde	670	04/2004	-
Plauen	Braunerde	740	04/2004	-
Köllitsch		500	04/2004	-
Köllitsch1		500	04/2004	-

Tabelle 3.1-3: Standorte der dynamischen Bodendruckmessungen (grau hinterlegte Standorte sind identisch mit denen der Bodenuntersuchungen)

	Pflug	Konservierend
Lößhügelland	Kyhna	Threna Glesien
	Großstolpen	Großstolpen Frohburg (Eschefeld)
	Lüttewitz Methau Littdorf	Frohburg (Elbisbach) Lüttewitz Methau Littdorf Oberwinkel
Auen	Köllitsch (Rüsterg.)	Köllitsch (Rüsterg.)
Diluvium	Zschortau	Zschortau
	Sprotta	Sprotta
	Wildenhain	

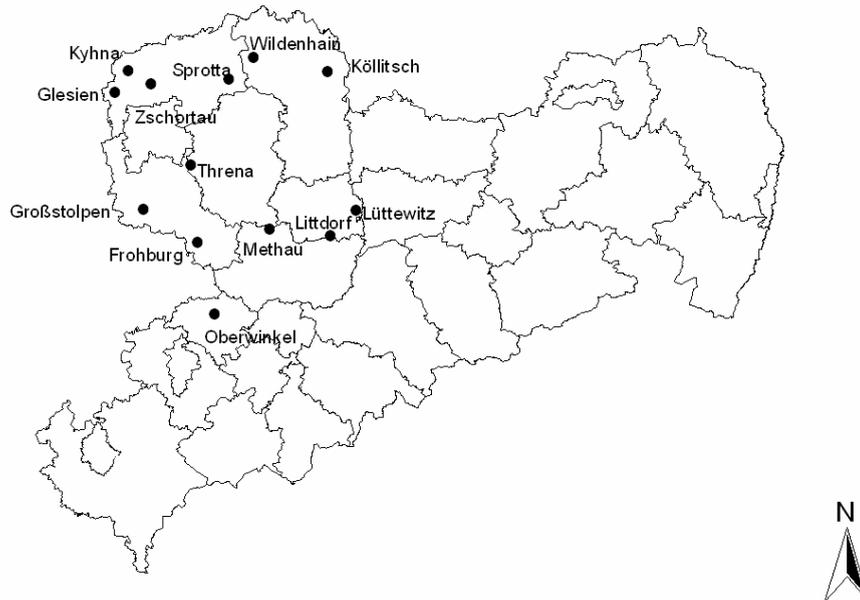


Abbildung 3.1-2: Geografische Lage der dynamischen Bodendruckmessungen in Sachsen

3.2 Laboruntersuchungen

3.2.1 Bodenphysikalische Kenngrößen und Humus

Der Umfang der physikalischen Bodenuntersuchungen war nicht an allen Standorten gleich (siehe Tab. 3.2.1-1).

Tabelle 3.2.1-1: Art der Untersuchungen („Pflug“ = konventionelle Bestellung; „Kons.“ = konservierende Bodenbearbeitung mit meist flacher, d.h. ca. 8-15 cm tiefen Lockerung; „Kons. tief“ = krumentiefe Lockerung)

Acker		Laboruntersuchungen						Felduntersuchungen
in 20 und 40 cm Bodentiefe	Bodenbearbeitungsvarianten	Körnung	Trockenroh-dichte	pF-Kurve	ges. Wasserleitfähigkeit	Vorbelastung	Scherparameter	ges. Wasserleitfähig. (Guelph)
Lüttewitz	Pflug, Direktsaat, Kons.,Kons. tief	x	x	x	x	x		
Methau	Pflug, Kons.	x	x	x	x	x	x	
Littdorf	Pflug, Kons.	x	x	x	x	x	x	
Frohburg	Kons.	x	x	x	x	x		
Köllitsch R	Pflug, Kons.	x	x	x	x	x	x	
Köllitsch K	Pflug	x	x	x	x	x	x	
Köllitsch L1	Pflug	x	x	x	x	x	x	
Köllitsch L2	Pflug	x			x	x		
Köllitsch F	Pflug	x			x	x		
Wellaune	Pflug	x	x	x	x	x		x
Zschortau	Pflug, Kons., Kons. tief	x	x	x	x	x	x	
Seehausen	Pflug, Pflug flach, Kons.	x	x	x	x	x	x	
Sprotta	Pflug, Kons.	x	x	x	x	x	x	
Badrina 1	Pflug	x			x	x		
Badrina 2	Pflug	x			x	x		
Badrina 3	Pflug	x			x	x		
Wildenhain	Pflug	x	x	x	x	x		x
Doberschütz	Kons.	x	x	x	x	x		x
Grünland in 10 und 20 cm Bodentiefe	Grünlandnutzung							
Großstolpen	Mähwiese	x	x	x	x	x		x
Methau	Mähwiese	x	x	x	x	x		x
Thallwitz	Mähweide	x	x	x	x	x		x
Köllitsch	Mähweide	x	x	x	x	x		x
Köllitsch 1	Mähweide	x	x	x	x	x		x
Wildenhain	Mähweide	x	x	x	x	x		x
Plauen	Mähwiese	x	x	x	x	x		x
Christgrün	Mähwiese	x	x	x	x	x		x

Textur

Die Körnungsanalyse erfolgte im Labor nach der KÖHN-Methode, wobei der Feinboden vor der Sedimentation mit Ultraschall vorbehandelt wurde. Die Bodenart wurde nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (1996) bestimmt.

Humusgehalt

Der Gehalt an organischer Substanz in den karbonatfreien Böden wurde über die Gesamt-Kohlenstoff-Bestimmung durch Sauerstoffoxidation bei 1000 °C und der Multiplikation des Gesamt-C-Gehaltes mit dem Faktor 1,724 ermittelt. Bei einigen Standorten wurde kein Humusgehalt bestimmt (siehe Tab.3.2.1-2).

Gefüge

Das Gefüge wurde im Feld nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (1996) bestimmt.

Tabelle 3.2.1-2: Textur und Gefügeeigenschaften der Ackerstandorte („Pflug“ = konventionelle Bestellung; „Kons.“ = konservierende Bodenbearbeitung mit meist flacher, d.h. ca. 8-15 cm tiefen Lockerung; „Kons. tief“ = krumentiefe Lockerung; „n.b.“= nicht bestimmt)

Standort	Bearbeitung	Entnahme- tiefe [cm]	Gefüge	Boden- art nach KA4	Humus [%]	G [%]	S [%]	U [%]	T [%]
Lüttewitz	Pflug	20-25	kru	Ut3	1,9	n.b.	5,4	80,5	14,1
		40-45	pol	Ut4	1,6	n.b.	2,5	79,3	18,2
	Direktsaat	20-25	kru	Ut4	1,6	n.b.	6,5	74,8	18,7
		40-45	pol	Ut4	1,0	n.b.	2,7	77,8	19,5
	Kons.	20-25	pol	Ut4	1,6	n.b.	4,2	76,3	19,5
		40-45	pla	Ut4	0,9	n.b.	2,1	73,9	24,0
	Kons. tief	20-25	koh	Ut4	1,6	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
		40-45	koh	Ut4	1,0	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Methau	Pflug	0-30	kru	Ut3	1,9	1,3	3,4	82,6	13,1
		30-45	koh	Ut3	0,8	4,3	4,5	81,9	12,7
	Kons.	0-25	kruh/koh	Ut3	2,4	1,7	4,8	81,4	12,6
		25-45	koh	Ut3	0,9	0,4	2,6	81,6	15,7
Littdorf	Pflug	0-15	kru	Ut3	n.b.	0,7	3,5	82,2	13,6
		15-30	kru	Ut3	2,0	0,7	3,3	82,3	15,0
		30-45	pla	Ut4	0,8	0,1	2,4	76,2	21,9
	Kons.	0-15	pla	Ut4	n.b.	0,4	2,8	80,8	17,0
		15-30	pla	Ut4	1,7	0,3	2,6	80,1	17,8
		30-45	pla	Ut4	0,7	0,1	2,2	78,1	20,7
Frohburg	Kons.	20-25	pol	Ut4	n.b.	n.b.	10,0	72,0	18,0
		40-45	pla	Tu4	n.b.	n.b.	5,2	68,2	26,6
Köllitsch R	Pflug	0-15	kru	Slu	1,6	0,3	43,5	42,7	12,9
		15-30	kru	Slu	1,7	0,8	43,8	41,2	13,6
		30-45	pol	Sl4	1,2	0,2	47,9	38,0	12,8
	Kons.	0-15	kru	Slu	1,7	0,3	41,0	43,7	14,5
		15-30	kru	Slu	1,6	0,2	40,9	45,2	13,1
		30-45	pol	Slu	1,0	0,3	45,5	41,3	12,5
Köllitsch K	Pflug	0-30	ein	Sl3	1,7	2,0	58,9	31,2	8,7
		30-60	ein	Sl2	1,0	1,8	74,3	18,7	6,2
Köllitsch L1	Pflug	0-30	kru	Lt2	2,3	0,5	21,0	49,0	30,0
		30-60	koh	Lt2	2,1	0,2	22,2	47,7	30,2
Köllitsch L2	Pflug	0-30	n.b.	Lu	2,3	0,7	19,0	54,1	27,7
		30-60	n.b.	Lt3	1,2	0,4	9,8	46,4	43,7
Köllitsch F	Pflug	0-30	n.b.	Lu	2,5	2,5	20,0	53,8	26,1
		30-60	n.b.	Tu3	1,6	0,3	14,3	53,6	32,2
Wellaune	Pflug	20-25	n.b.	Ut4	n.b.	n.b.	7,6	70,7	21,7
		40-45	n.b.	Tu4	n.b.	n.b.	2,1	72,1	25,8
Zschortau	Pflug	0-25	kru	Uls	1,7	0,3	27,6	61,0	10,3
		25-45	pol	Ut3	0,7	0,2	20,9	65,2	14,3
	Kons.	0-25	kru/pol	Uls	1,6	1,6	29,6	59,6	10,4
		25-45	pol	Uls	0,7	1,0	19,3	64,4	17,0
	Kons. tief	0-25	kru	Uls	1,6	1,7	32,7	57,5	9,6
		25-45	pol	Uls	0,7	0,9	26,8	59,9	13,3
Seehausen	Pflug	0-20	n.b.	Slu	1,7	n.b.	44,0	45,0	11,0
		20-30	n.b.	Slu	1,6	n.b.	44,0	45,0	11,0
		40-60	n.b.	Slu	0,7	n.b.	47,0	34,0	19,0
	Pflug flach	0-20	n.b.	Slu	2,1	n.b.	44,0	45,0	11,0
		20-30	n.b.	Slu	1,6	n.b.	44,0	45,0	11,0
		40-60	n.b.	Slu	0,9	n.b.	47,0	34,0	19,0
	Kons.	0-20	n.b.	Slu	2,4	n.b.	44,0	45,0	11,0
		20-30	n.b.	Slu	1,2	n.b.	44,0	45,0	11,0
40-60		n.b.	Slu	0,7	n.b.	47,0	34,0	19,0	
Sprotta		0-30	n.b.	Su2	2,7	n.b.	80,1	15,3	4,6
		30-60	n.b.	Ss	0,5	n.b.	93,0	5,6	1,4
Badrina	Pflug	30-50	n.b.	Su2	0,9	n.b.	81,4	14,2	4,4
Wildenhain	Pflug	20-25	koh	Su2	2,4	n.b.	82,9	13,4	3,7
		40-45	ein/koh	St2	0,3	n.b.	86,3	8,5	5,2
Doberschütz	Kons.	20-25	koh	Sl2	1,7	n.b.	71,8	21,8	6,4
		40-45	ein	Su2	0,6	n.b.	76,9	20,6	2,5

Tabelle 3.2.1-3: Textur und Gefügeeigenschaften der Grünlandstandorte

Standort	Entnahmetiefe [cm]	Gefüge	Bodenart nach KA4	Humus [%]	G [%]	S [%]	U [%]	T [%]
Großstolpen	20-25	kru	Lu	n.b.	n.b.	16,8	59,2	24,0
	40-45	sub	Lu	n.b.	n.b.	15,0	59,7	25,3
Methau	10-15	kru	Ut4	3,4	n.b.	14,1	68,1	17,8
	20-25	kru	Ut4	2,3	n.b.	14,6	67,7	17,7
Thallwitz	7-12	n.b.	Ut4	n.b.	n.b.	10,5	72,1	17,4
	12-17	n.b.	Ut4	n.b.	n.b.	6,8	73,8	19,4
	25-30	n.b.	Ut3	n.b.	n.b.	8,2	75,6	16,2
Köllitsch	10-25	kru	Sl4	2,7	n.b.	68,9	18,7	12,4
	40-45	pol	Sl2	2,0	n.b.	72,5	20,1	7,4
Köllitsch1	10-25	pol	Sl3	2,0	n.b.	58,6	29,4	12,0
	40-45	pol	Sl3	1,3	n.b.	49,9	38,2	11,9
Wildenhain	10-15	koh	Sl3	6,6	n.b.	79,3	10,3	10,4
	40-45	ein	Ss	0,3	n.b.	89,4	7,8	2,8
Plauen	10-25	kru	Ls2	3,3	n.b.	29,0	46,2	24,8
	40-45	kru	Lu	1,8	n.b.	29,1	50,2	20,7
Christgrün	10-15	kru	Slu	1,8	n.b.	41,2	42,7	16,1

Tabelle 3.2.1-4: Textur weiterer Acker- und Grünlandstandorte auf denen nur Bodendruckmessungen stattfanden („Pflug“ = konventionelle Bestellung; „Kons.“ = konservierende Bodenbearbeitung mit meist flacher, d.h. ca. 8-15 cm tiefen Lockerung)

Standort	Arbeitsgang	Acker Bestellung/ Grünland	Entnahmetiefe [cm]	Bodenart nach KA4	Humus [%]	S [%]	U [%]	T [%]
Kyhna	Pflügen	Pflug	20-25	Uls	1,4	26,1	58,3	15,6
			40-45	Uls	1,4	29,5	56,0	14,5
Threna	Grubbern	Kons.	20-25	Uls	2,6	36,6	53,5	9,9
			40-45	Uls	0,6	33,4	53,3	13,3
Threna	Dreschen	Kons.	20-25	Slu	1,9	48,9	41,4	9,7
			40-45	Sl3	0,6	58,0	33,5	8,5
Glesien	Grubbern	Kons.	20-25	Sl4	2,5	49,5	33,8	16,7
Großstolpen	Grubbern	Kons.	20-25	Ut2	3,2	11,6	77,7	10,7
			40-45	Ut4	0,6	12,1	68,8	19,1
Großstolpen	Rübenroden und Transport	Pflug	20-25	Uls	3,1	20,1	63,2	16,7
			40-45	Ut4	1,6	14,3	65,9	19,8
Großstolpen	Spritzen	Kons.	20-25	Ut2	3,5	14,7	75,4	9,9
			40-45	Ut3	0,6	6,6	80,1	13,3
Wildenhain	Spritzen	Pflug	20-25	Sl2	3,3	81,5	10,7	7,8
Frohburg	Dreschen	Kons.	20-25	Uls	2,1	33,4	56,7	9,9
			40-45	Su2	0,3	81,7	13,8	4,5
Frohburg	Kartoffellegen	Kons.	20-25	Ut3	2,7	9,1	76,4	14,5
			40-45	Ut3	0,7	11,6	72,3	16,1
Frohburg (Elbisbach)	Kartoffelroden	Kons.	20-25	Slu	1,5	42,9	43,2	13,9
			40-45	Uls	0,8	36,3	50,1	13,6
Oberwinkel	Dreschen	Kons.	20-25	Ut4	2,5	10,4	70,7	18,9
			40-45	Ut4	0,4	8,7	72,1	19,2
Oberwinkel	Dreschen und Transport	Direktsaat	20-25	Uls	1,8	27,9	58,6	13,5
			40-45	Uls	0,6	27,7	58,4	13,9

Untersuchungen an Stechzylinderproben

Die Porenverteilung und die Trockenrohdichte wurde nach HARTGE & HORN (1992) an Stechzylindern mit einem Volumen von 100 cm³ und die gesättigte Wasserleitfähigkeit an Zylindern mit 250 cm³ Volumen bestimmt. Sie wurden in jeweils 6-maliger Wiederholung aus 20 und 40 cm Bodentiefe den Ackerböden und aus 10 und 20 cm Tiefe den Grünlandböden entnommen. Die Probenahmen erfolgten parallel zu denen für die Vorbelastungsmessungen, d.h. die verschiedenen Stechzylinder entstammen jeweils den gleichen Bodenschürfen.

Für die Ermittlung der **Porengrößenverteilung und Wassergehalts-Saugspannungsbeziehung** wurden die ungestörten Proben mit einem definierten Unterdruck (bis pF 1,8) bzw. einem Überdruck (> pF 1,8) entwässert (HARTGE & HORN 1992) und so auf Wassergehalte eingestellt, die einem pF-Wert von 1,8; 2,0; 2,5; 3,0 und 3,2 entsprechen. Für pF 4,2 wurde die Entwässerung an gestörten Proben durchgeführt. Anhand der Desorptionskurve konnte die Wassergehalts-Saugspannungsbeziehung aufgestellt und die Porenverteilung ermittelt werden. Die Einteilung der Porengrößen- bzw. Saugspannungsbereiche in ökologisch begründete Gruppen (Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität und Totwasser) erfolgte nach MÜLLER et al. (1970) und der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA 4 1996).

Die **Trockenrohdichte** wurde an den ungestörten Proben (HARTGE & HORN 1992) nach E DIN ISO 11272 (DIN 2000) bestimmt.

Die **gesättigte Wasserleitfähigkeit** wurde entsprechend der Methodenbeschreibung bei HARTGE & HORN (1992) durch das Anlegen einer Saugspannung an die Zylinder und das Auffangen der perkolierten Wassermenge in einer definierten Zeit bestimmt.

Die Stechzylinder wurden vertikal dem Boden entnommen. Es wurde jeweils das geometrische Mittel errechnet.

3.2.2 [Bodenmechanische Kenngrößen](#)

Mechanische Vorbelastung

Die mechanische Vorbelastung des Bodens wurde an Stechzylindern mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 30 mm bestimmt. Das eingesetzte Ödometer arbeitete vollautomatisch. Die Setzung wurde mit einer Messgenauigkeit von 0,01 mm aufgezeichnet. Als Belastungsstufen wurden 10, 20, 40, 60, 80, 120, 200, 300 und 500 kPa gewählt, die nacheinander auf die Stechzylinderproben ohne Entlastungspause aufgebracht wurden. Die Belastungsdauer betrug pro Druckstufe 45 min.

Da der Boden bei einem hohen Wassergehalt am druckempfindlichsten reagiert, wurden die Vorbelastungen beim Feuchtegrad pF 1,8 (-60 hPa Wasserspannung) bestimmt, was einer Bodenfeuchte nahe Feldkapazität entspricht.

Auf den Ackerflächen wurden Stechzylinder in 6-maliger Wiederholung aus 20 und 40 cm Bodentiefe entnommen, auf Grünland aus 10 und 20 cm Tiefe. Die Auswertung der Belastung-Setzungskurven erfolgte nach CASAGRANDE (1936). Die Ergebnisse sind als arithmetisches Mittel angegeben.

Die Prüfung von signifikanten Unterschieden erfolgte mit einem zweiseitigen T-Test nach STUDENT.

Scherparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung

Um die Vorbelastung anhand multipler Regressionsgleichungen nach DVWK (1995), DVWK (1997) oder DIN (2000) bestimmen zu können, ist unter anderem die Kenntnis der Parametergrößen „Kohäsion“ c und „Winkel der inneren Reibung“ φ (LEBERT, 1989; NISSEN, 1999) nötig.

An 5 Standorten (siehe Tab. 3.1-3) sind in jeder Bodenbearbeitungsvariante in den Tiefen 20 und 40 cm vier Stechzylinderproben (siehe Stechzylinder „Vorbelastung“) entnommen worden, die erst aufgesättigt und dann auf p_F 1,8 (-60 hPa Wasserspannung) eingestellt wurden. Danach wurden sie in ein Kastenscherggerät eingebaut und bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,2 mm/s dem Schervorgang unterzogen. Der maximale Scherweg war auf 10 mm limitiert. Der vom Weg abhängige Kraftaufwand wurde kontinuierlich mit einem Linearschreiber aufgezeichnet. Da bei keiner der untersuchten Proben ein klassischer Bruch zu verzeichnen war, wurde die maximale Scherkraft nach 10 mm Scherweg der Verlaufskurve entnommen. Die Probe befand sich zu diesem Zeitpunkt immer in einem so genannten Gleitzustand, so dass der Anstieg der Kurve ein Minimum erreichte. Der Scherversuch wurde bei den Auflaststufen 50, 100, 200 und 400 kPa durchgeführt. Die Mohr-Coulomb'sche Bruchgerade konnte somit durch 4 Punkte gelegt werden. Aus Kapazitätsgründen musste auf Wiederholungen der Stichprobe verzichtet werden.

3.3 [Felduntersuchungen](#)

3.3.1 Dynamische Bodendruckmessungen

Für die dynamischen Bodendruckmessungen wurden Einzelsensoren (Fa. Wazau, Berlin) auf der Basis von Dehnungsmessstreifen (DMS) verwendet (LEBERT, 1991; SEMMEL, 1993; KÜHNER, 1997).

Die Sensoren haben ein starres kegelförmiges Gehäuse aus Metall (Höhe: 2,5 cm; Durchmesser: 3,2 cm). Die Messfläche oben hat einen Durchmesser von 2,2 cm.

Die Sensoren können nur uniaxiale Drücke erfassen. Zur Bestimmung der vertikalen Druckausbreitung wurden die Sensoren unter der geplanten Fahrspurmitte in möglichst „unbefahrenem“ Boden (Kernfläche) in verschiedenen Tiefen von der Seite so eingebaut, dass der darüber liegende Boden ungestört blieb. Die Sensoren wurden in 20 und 40 cm Tiefe (Ober- und Unterboden) und im Grünland in 10 und 20 cm Tiefe in den Boden eingebaut. Nach Ausheben einer Grube wurden von der Seite her im ungestörten Boden jeweils 3 Sensoren pro Tiefe eingefügt (Abb. 3.3.1-1). Dazu wurden in der gewählten Messtiefe mittels eines speziell gefertigten Kernbohrers mit ca. 10-15 cm

Abstand, drei horizontale, gleich lange Kanäle, die den Größenabmessungen der Sensoren entsprechen, in den Boden eingetrieben. Die Sensoren wurden mit Bodenschluss eingebaut. Der Abstand zwischen geplanter Spurmittle und Grubenwand betrug 25 cm. Nach dem Einbau der Sensoren wurde die Grube wieder verfüllt und verfestigt, um die Störeinflüsse so gering wie möglich zu halten.

Die Erfassung der Messdaten erfolgte über einen Messwertwandler auf einem Notebook mit entsprechender Software (Fa. Wazau, Berlin).

Die ersten Bodendruckmessungen fanden mit einer Software statt, welche Spannungen bis maximal 330 kPa erfassen konnte. Die anschließend verwendete Software setzte in dieser Hinsicht keine Grenzen.

Die Maschinen führen in arbeitstypischer Geschwindigkeit und, wenn möglich, real arbeitend (z.B. rodend, grubbernd) sowie mit vollen Bunkern bzw. Ladeflächen über die Sensoren.

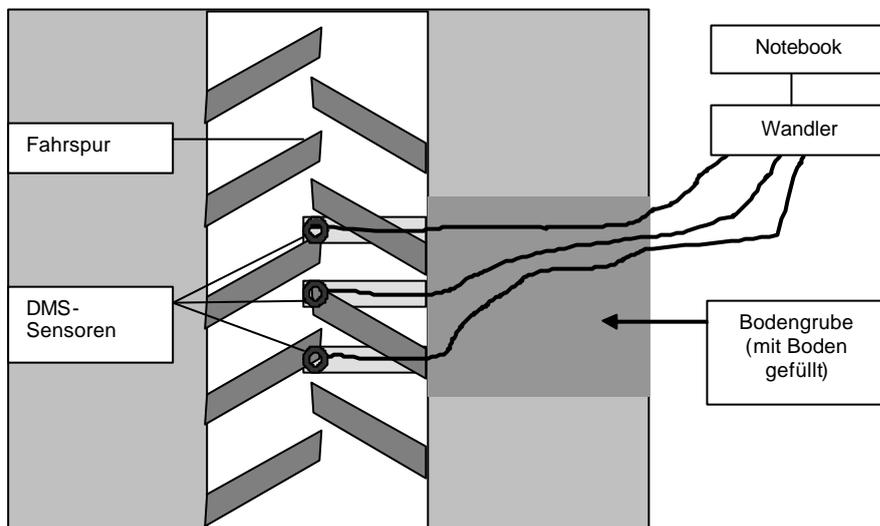


Abbildung 3.3.1-1: Einbauschema der DMS-Sensoren (Ansicht von oben)

Bei jeder Messung wurde die **Bodenfeuchte** des Ober- und Unterbodens mit einer TDR-Sonde gemessen (siehe Anhang Tab. 7-1).

Die **Radlasten** der Maschinen (siehe Anhang Tab. 7-1) wurden anhand der Maschinenangaben ermittelt. Bei angebauten oder aufgesattelten Geräten an Traktoren sowie bei Bodenbearbeitung wurden die Hinterachslasten der Traktoren wie folgt ermittelt:

Anbaugeräte: Maschinengewicht [kg] x 1,3 (WERNER und PAUL, 1993);
auf die Hinterachse des Traktors dazugerechnet

Aufsattelgeräte:	Stützlast [kN] laut Datenblatt der Maschine; auf die Hinterachse des Traktors dazugerechnet
Anhängegeräte:	Bei Anhängegeräten wurde das Gewicht der Zugmaschine nicht erhöht, da eine zusätzliche Achslast von sehr vielen Einflussfaktoren abhängt (z.B. Bodenart, Bodenfeuchte, Anzahl der Einzelwerkzeuge, Arbeitsbreite, Arbeitstiefe und nicht zuletzt die Höhe des Anhängepunktes an der Zugmaschine). Bei optimaler Wahl des Anhängepunktes (resultierende Zugkraftlinie geht parallel zur Bodenoberfläche durch die Hinterachse des Traktors) dürfte sich laut Hebelgesetz die zusätzliche Hinterachslast nicht wesentlich ändern. Abweichungen von dieser Ideallinie und dem Aspekt des Drehmomentanstiegs bei entsprechenden Feldarbeiten wird in der Praxis durch einen angepassten Reifenluftdruck Rechnung getragen. Hinweise dazu sind in den Reifenkatalogen der Reifenhersteller zu finden.
Bodenbearbeitung:	Achslast der Hinterachse des Traktors [kg] x 1,4

Die **mittleren Reifenkontaktflächen** wurden nach INNS & KILGOUR (1978) mit $A = \text{Reifenbreite} \times \text{Reifendurchmesser} \times 0,27$ berechnet. Bei zwei Traktorhinterreifen wurde exemplarisch die Reifenkontaktfläche (Aufstandsfläche) auf dem Feld bestimmt. Dazu wurden die Reifen mit Kalk umstäubt und anschließend die Gesamtflächen und Stollenflächen der Reifenabdrücke auf einer durchsichtigen Folie nachgezeichnet. Die Flächeninhalte wurden mittels eines Planimeters bestimmt.

3.3.2 [Guelph-Permeameter](#)

Die gesättigte Wasser- und Luftleitfähigkeit wird von der Porengrößenverteilung und der Kontinuität der Bodenporen bestimmt. Da die Stechzylinderproben nur 5 cm hoch sind, kann der Einfluss der Porenkontinuität vor allem von Makroporen nicht erfasst werden. Bei in-situ-Messungen im ungestörten Bodenprofil wird ein vielfach größeres Bodenvolumens durchflossen.

Daher wurde auf ausgewählten Standorten (s. Tab. 3.2.1-1) auch die gesättigte Wasserleitfähigkeit mit dem Guelph-Permeameter bestimmt (siehe REYNOLDS & ELRICK, 1986; XIANG et al., 1997; AKKERMANN et al., 1999).

Das Guelph-Permeameter ist ein Bohrlochinfiltrometer, bei dem ein konstanter Wasserspiegel (Druckhöhe) im Bohrloch erhalten wird. Gemessen wird die Menge des infiltrierenden Wassers bei einer konstanten Infiltrationsrate für die eingestellte Druckhöhe. Die Mindestbodenmesstiefe beträgt 15 cm. Die Messungen wurden bei zwei Druckhöhen (5 und 10 cm) durchgeführt. Aus den ermittelten Werten für die Infiltrationsrate wurde die hydraulische Leitfähigkeit bei Feldsättigung errechnet. Die Anzahl der Messwiederholungen war unterschiedlich. Aus den Wiederholungen wurde das geometrische Mittel gewonnen.

4 [Ergebnisse und Diskussion](#)

4.1 Erhebung zur Maschinenausstattung in sächsischen Landwirtschaftsbetrieben

4.1.1 Grundlagen

Um die Wettbewerbsfähigkeit in der Landwirtschaft zu erhalten, wurden in den letzten Jahren umfangreiche landtechnische Neu- und Weiterentwicklungen an den Maschinen und Geräten vorgenommen.

Gesteigerte Flächenleistungen, höhere Bunker- und Ladekapazitäten an der Bodenbearbeitungs-, Ernte- und Transporttechnik gingen zu meist mit dem Anstieg des Gesamtgewichtes der eingesetzten Technik einher. Folglich sind auch die auf den Boden abzustützenden Lasten je Rad angestiegen (ISENSEE et. al., 2001). Demnach sind heutzutage Radlasten von 5 t bis maximal 12 t häufiger in der Praxis anzutreffen. Allerdings ist zu betonen, dass aus Sicht der Bodenbeanspruchung auch die Kontaktfläche bzw. der resultierende Kontaktflächendruck von entscheidender Bedeutung sind. Bei zunehmenden Radlasten ist aber potenziell damit zu rechnen, dass gleichzeitig auch die Gefahr der mechanischen Überbeanspruchung des Bodengefüges steigt.

Tabelle 4.1.1-1: Radlasten, Bunker- und Ladekapazitäten moderner Landtechnik

	Radlast [t]	Bunker- und Ladekapazitäten [t]
Schlepper [100 kW]	2,5 ¹⁾	
Schlepper [170 kW]	3,5 ¹⁾	
Schlepper [196 kW]	4,5 ¹⁾	
Mähdrescher	8,0 ¹⁾	7,0
Häcksler	6,1 ¹⁾	
Rübenroder	12,0 ¹⁾	27,4
Gülewagen	4,9	23,0
Transporthänger	5,0	23,0

1) nach Isensee et al. (2001)

Bisher existiert in Sachsen kein repräsentativer Überblick zur Maschinenausstattung in den Landwirtschaftsbetrieben. Da dies eine wichtige Grundlage zur Beurteilung der mechanischen Beanspruchung von Böden in Sachsen ist, wurden 22 Betriebe im Rahmen einer Erhebung näher analysiert (Abb. 4.1.1-1).

Das Ziel der Erhebung war es daher einerseits, einen aktuellen Überblick zur Maschinenausstattung zu erhalten. Andererseits sollte auf der Grundlage der fahrwerksbezogenen Angaben ein Überblick zu den belastungsrelevanten Größen Radlast und Kontaktflächendruck entstehen.

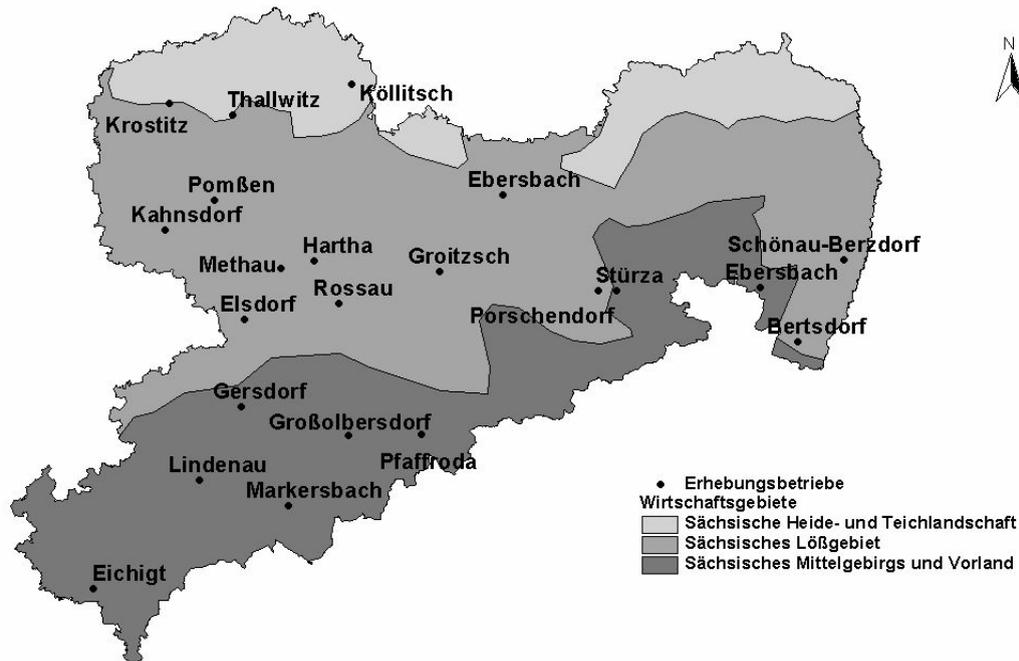


Abbildung 4.1.1-1: Erhebungsbetriebe in Sachsen

Die Datenerhebungen wurden im Zeitraum Januar / Februar 2001 auf der Grundlage speziell erarbeiteter Fragebögen durchgeführt. Die Auswahl der Betriebe orientierte sich an der praxisüblichen Maschinenausstattung in Sachsen, die in Tabelle 4.1.1-2 dargestellt ist. Ferner wurde darauf geachtet, dass die Betriebe für die 3 sächsischen Wirtschaftsgebiete repräsentativ sind (Abbildung 4.1.1-1).

Bei Betrachtung der landwirtschaftlichen Unternehmen in Sachsen, gegliedert nach Rechtsformen (Tabelle 4.1.1-2), fällt auf, dass der zahlenmäßig größte Anteil durch die Neben- und Haupterwerbsbetriebe gestellt wird, die Juristischen Personen dagegen ihrer Anzahl nach den kleinsten Anteil stellen.

Nach der durchschnittlichen Flächenausstattung sind die Juristischen Personen allerdings die bedeutendste Betriebsgruppe (durchschnittlich 1.228 ha LF/Betrieb), gefolgt von den Natürlichen Personen (durchschnittlich 333 ha LF/Betrieb) und den Gesellschaften des bürgerlichen Rechts (durchschnittlich 245 ha LF/Betrieb). Die Haupterwerbsbetriebe (durchschnittlich 105 ha LF/Betrieb) und die Nebenerwerbsbetriebe (durchschnittlich 15 ha LF/Betrieb) haben die kleinsten Flächenausstattungen (ohne: Maschinengenossenschaften und Lohnunternehmer) in Sachsen.

Daraus erklärt sich auch, dass insbesondere die leistungsstarken Schlepper, Mähdrescher und anderen selbstfahrenden Erntemaschinen anzahlmäßig am stärksten in den Betriebsgruppen mit Betriebsflächen von mehr als 1.000 ha LF/Betrieb, wie den juristischen Personen, weniger in den Haupterwerbsbetrieben und kaum in den Nebenerwerbsbetrieben vorkommen. In diesen Betrieben dominieren die mittleren bis schwächeren Leistungsklassen der Traktoren und Maschinen, wobei die kleineren Betriebe leistungsstarke Maschinen zunehmend auch überbetrieblich nutzen.

Tabelle 4.1.1-2:

Maschinenausstattung in Sachsen in den Jahren 1998 und 1999

Bezeichnung	Leistung [kW]	Rechtsformen											Summe Sachsen		
		Haupterwerb		Nebenerwerb		GbR		Jurist. Personen		Nat. Personen		Maschgenoss./LU			
		1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999
Anzahl der Betriebe		1689	1703	2601	2636	323	330	482	488	12	14	153	165	5260	5336
LF absolut	[ha]	180912	183798	38351	39560	97161	98761	556708	550264	8171	8227	1150	1087	882453	881697
durchschnittliche LF	[ha]	105,42	107,93	14,74	15,01	264,54	249,88	1155,00	1127,59	474,67	333,13	7,52	6,58	167,77	165,24
nach Leistungsklassen	[Stück]														
Schlepper	bis 17	568	558	784	742	92	95	560	478	10	9	9	7	2023	1889
Schlepper	18 - 25	362	363	680	698	66	68	425	386	10	9	2	2	1545	1526
Schlepper	26 - 37	1139	1132	1903	1860	283	269	1500	1368	12	15	23	23	4860	4667
Schlepper	38 - 59	1562	1557	1681	1724	415	387	2373	2233	18	19	77	84	6126	6004
Schlepper	60 - 74	1288	1266	646	684	371	364	2508	2331	21	19	92	105	4926	4769
Schlepper	75 - 89	437	462	108	142	151	159	544	490	2	4	44	42	1286	1299
Schlepper	90 - 110	364	423	50	56	189	187	608	654	12	13	71	66	1294	1399
Schlepper	über 110	398	434	29	31	249	274	1364	1453	22	27	131	130	2193	2349
Schlepper insgesamt		6118	6195	5881	5937	1816	1803	9882	9393	107	115	449	459	24253	23902
Mähdrescher	bis 59	89	79	185	175	5	10	81	26	0	1	2	0	362	291
Mähdrescher	60 - 89	314	305	243	201	53	50	109	111	3	4	13	9	735	680
Mähdrescher	über 90	378	389	70	70	212	168	844	827	9	9	156	147	1669	1610
Mähdrescher insgesamt		781	773	498	446	270	228	1034	964	12	14	171	156	2766	2581
selbstfahrende Feldhäcksler		98	111	28	23	65	62	651	529	3	3	56	59	901	787
selbstfahrende Schwadmäher		118	112	42	28	57	56	665	578	4	4	7	12	893	790
Grünfüttererntemaschinen		216	223	70	51	122	118	1316	1107	7	7	63	71	1794	1577
selbstfahrende Köpf- und Rodelader		38	33	32	25	11	11	85	74	0	0	19	22	185	165
stationäre Dieselmotoren		174	168	52	47	81	75	519	503	10	6	17	16	853	815
sonstige Fahrzeuge		754	638	451	383	249	240	1608	1407	23	19	257	272	3342	2959
Maschinenausstattung	[Stück]	8081	8030	6984	6889	2549	2475	14444	13448	159	161	976	996	33193	31999

Quelle: Anträge auf Gasölverbilligung 1998 und 1999, LfL

In Tabelle 4.1.1-3 ist die Anbaustruktur in Sachsen im Vergleich zu den untersuchten Betrieben veranschaulicht. Die betriebliche Ausrichtung (Marktfrucht-, Gemischtbetrieb) bedingt hierbei die teilweise hohen Schwankungen im Anbauverhältnis. Während in den Ackerbaubetrieben der Druschfruchtanteil überwiegt, ist das Anbauverhältnis in den viehhaltenden Betrieben zu Gunsten des Futterbaus (Silomais, Futterpflanzen) verschoben. Insgesamt wird deutlich, dass in den untersuchten Betrieben der Anbau von Druschfrüchten dominierend ist. Daneben spielt flächenmäßig der Futterbau eine wichtige Rolle.

Tabelle 4.1.1-3: Fruchtartenanteile und Anbauumfänge der untersuchten Betriebe im Vergleich zur Anbaufläche in Sachsen bezogen auf die dargestellten Fruchtarten

Fruchtart	Anteil an der Ackerfläche [%]			Sachsen (2000)	Anbauumfang der Fruchtarten [ha]		Anteil der Erhebungsfläche nach Fruchtarten am Anbauumfang in Sachsen [%]
	Erhebungsbetriebe MW	MIN	MAX		Erhebungsbetriebe	Sachsen (2000)	
Druschfrüchte	85,4	68,5	100,0	76,8	7.521	557.940	1,3
Kartoffeln	1,6	0,1	3,6	1,2	88	8.810	1,0
Zuckerrüben	3,9	0,2	7,9	2,3	244	16.981	1,4
Silomais	6,8	1,6	18,6	7,7	470	54.954	0,9
Futterpflanzen	9,6	0,3	29,4	5,4	726	39.034	1,9
Gesamt					9.049	677.719	1,3

Quelle: LfL, UL-Datenbank

Tabelle 4.1.1-4: Einteilung der Erhebungsbetriebe nach der Flächenausstattung

Betriebsgröße	Anzahl der Betriebe (gesamt 22)
≤ 100 ha	1
101 bis 500 ha	10
501 bis 1000 ha	7
> 1000 ha	4

4.1.2 [Ergebnisse](#)

Die Tabelle 4.1.2-1 zeigt hinsichtlich der Radlasten und Kontaktflächendrücke der einzelnen Maschinengruppen in den Erhebungsbetrieben z. T. eine relativ starke Streuung. Die Ursache dafür ist hauptsächlich in der starken Differenziertheit der eingesetzten Technik, kombiniert mit den unterschiedlichsten Bereifungsmöglichkeiten, zu finden.

Insbesondere die Erntemaschinen, die Transporttechnik und die Pflanzenschutzmaschinen verursachen hohe Werte bei den Radlasten (58 – 89 kN) und Kontaktflächendrücken (115 – 460 kPa). Zum Kontaktflächendruck der Kartoffellegemaschinen muss angemerkt werden, dass es sich hier ausnahmslos um Alttechnik handelt, die auf Grund ihrer Bauart eine völlig unzureichende Fahrwerks- und Reifenausstattung aufweist.

Bezüglich der Kontaktflächendrücke der Traktoren ergeben sich in den größeren Betrieben sowohl für den Vorderachs- als auch für den Hinterachsbereich relativ ausgeglichene Werte (Abb. 4.1.2-1). Mit Ausnahme der Vorderachse des kleinsten Traktors (Kontaktflächendruck: 136 kPa) liegen die Werte zwischen 77 und 104 kPa.

Tabelle 4.1.2-1: Radlasten und mittlere berechnete Kontaktflächendrücke gebräuchlicher Landmaschinen in Sachsen (Mittelwerte MW und Standardabweichung STABW)

Maschinengruppen (n= Anz. Betriebe)	Radlast		Kontaktflächen- druck		Radlast		Kontaktflächen- druck	
	1. Achse MW [kN]	STABW	1. Achse MW [kPa]	STABW	2. Achse MW [kN]	STABW	2. Achse MW [kPa]	STABW
Traktoren 35-100 kW (n=22)	9	1,6	98	21,7	14	1,5	81	9,9
Traktoren 101- 150 kW (n=15)	14	2,4	77	13,2	23	3,2	83	12,6
Traktoren >150 kW (n=12)	25	10,7	86	25,5	24	2,8	76	13,3
Mähdrescher (n=22)	58	15,0	213	41,2	16	5,4	141	43,6
Rübenroder (n=13)	61	13,8	211	40,5	89	31,4	175	61,1
Kartoffelroder (n=11)	21	3,0	238	13,2				
Kartoffellegemasch. (n=10)	28	7,6	460	124,1				
Feldhäcksler (n=12)	25	7,8	115	40,8	17	7,6	166	42,2
Pflanzenschutztech- nik (n=20)	22	5,3	224	107,3	24	1,4	161	14,4
Transporttechnik (n=22)	26	3,8	254	27,7	26	4,8	260	21,7

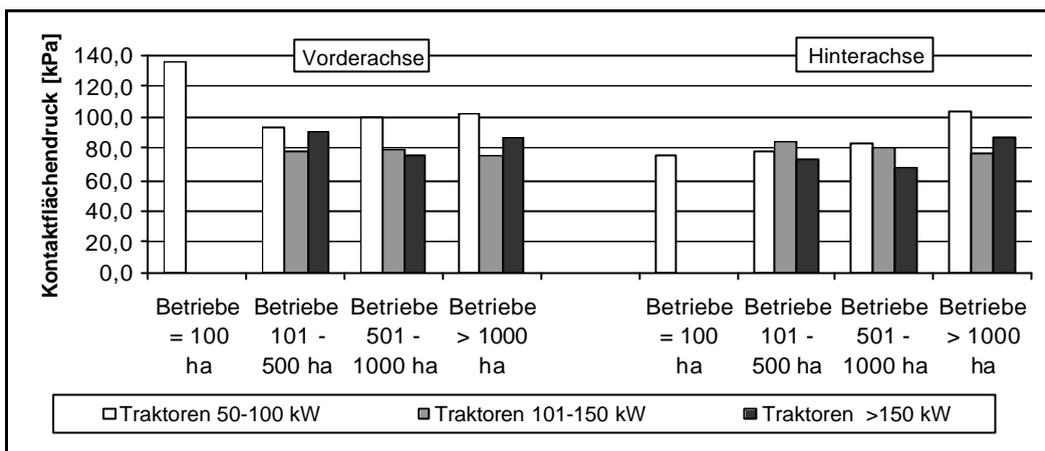


Abbildung 4.1.2-1: Berechneter Kontaktflächendruck der Traktoren (n = 148) in den Erhebungsbetrieben gruppiert nach Flächenausstattung

Bei den Mähdreschern (Abb. 4.1.2-2) sind die Werte des Kontaktflächendruckes der Vorderräder in den mittleren Betriebsgruppen am höchsten und die Werte der Hinterräder fast ausgeglichen. In den Betrieben über 1.000 ha unterscheiden sich die Werte kaum zwischen Vorder- und Hinterachsbereich. Zurückzuführen ist das auf den hohen Ausstattungsgrad (s. Abb. 4.1.2-8) an Breitreifen (Vorderachse: 88 %; Hinterachse: 50 %).

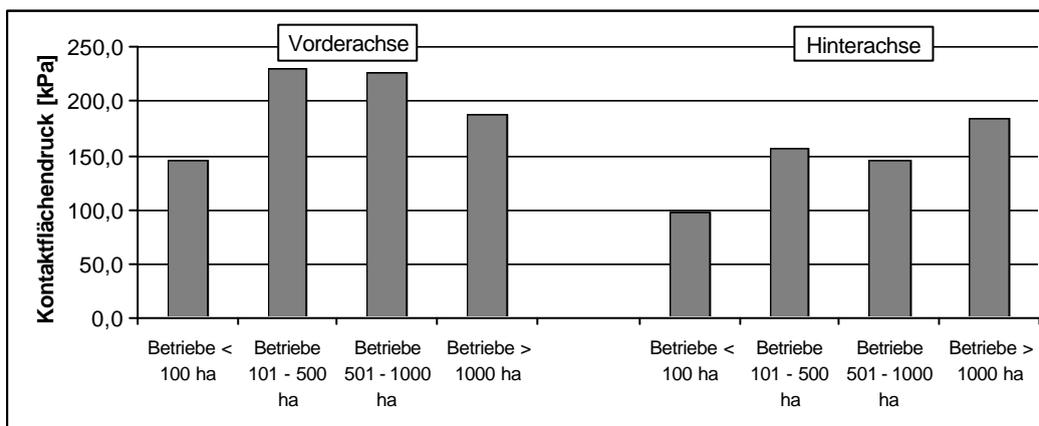


Abbildung 4.1.2-2: Berechneter Kontaktflächendruck der Mähdrescher (n = 32) in den Erhebungsbetrieben gruppiert nach Flächenausstattung

Die mittleren Kontaktflächendrücke bei den Rübenrodern (Abb. 4.1.2-3) sind in den untersuchten Betriebsgruppen im Vorderachsbereich (218 kPa bis 230 kPa) geringfügig höher als im Hinterachsbereich (187 kPa bis 196 kPa), insgesamt zwischen Vorder- und Hinterachse aber relativ ausgeglichen.

Bei den Feldhäckslern schwanken die Kontaktflächendrücke zwischen den einzelnen Betriebsgruppen im Bereich der Vorderachse zwischen 91 kPa und 124 kPa. Im Hinterachsbereich gibt es bei den Werten keine wesentlichen Unterschiede zwischen den untersuchten Betriebsgruppen (163 kPa bis 170 kPa).

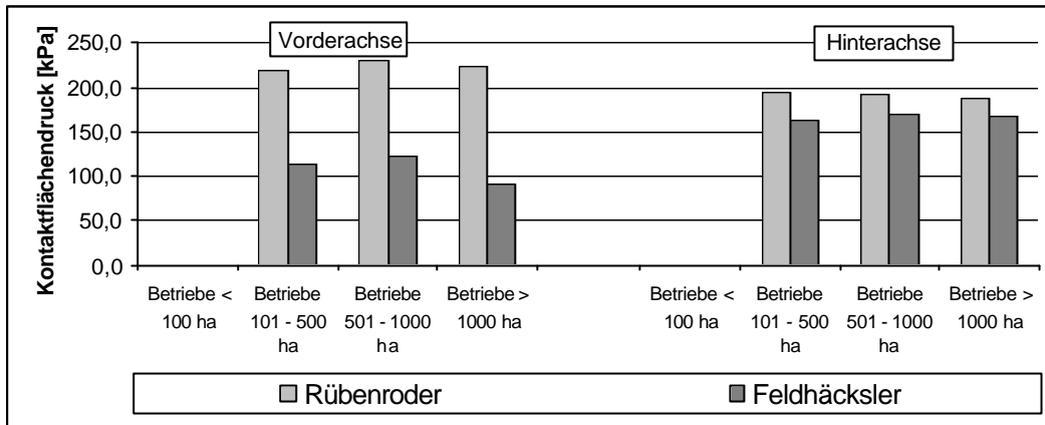


Abbildung 4.1.2-3: Berechneter Kontaktflächendruck der Rübenroder (n = 14) und Feldhäcksler (n = 13) in den Erhebungsbetrieben gruppiert nach Flächenausstattung

Die berechneten Kontaktflächendrücke der Transporteinheiten (Abb. 4.1.2-4) liegen sowohl im Vorderachsbereich als auch im Hinterachsbereich in den untersuchten Betriebsgruppen relativ nahe beieinander (247 kPa bis 269 kPa). Lediglich der Betrieb mit < 100 ha weicht mit 300 kPa davon ab.

Bei den Pflanzenschutzspritzen wurden in die Erhebung auch mehrachsige selbstfahrende Maschinen mit einbezogen. Angaben zur Spritztechnik aus der kleinsten Betriebsgruppe lagen nicht vor. Im Vorderachsbereich liegen die gemittelten Werte des Kontaktflächendruckes (183 kPa bis 232 kPa) der anderen Betriebsgruppen leicht über den Werten des Hinterachsbereiches (165 kPa bis 174 kPa).

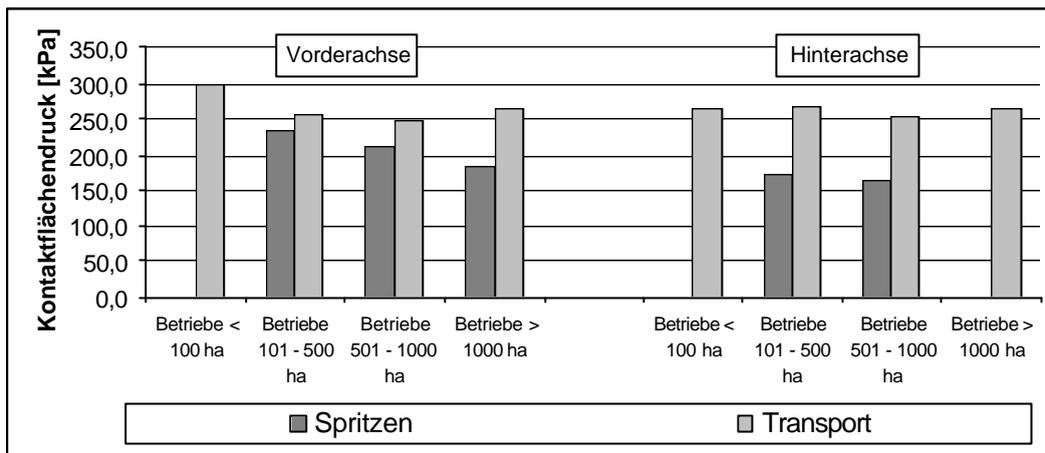


Abbildung 4.1.2.4: Berechneter Kontaktflächendruck der Pflanzenschutzspritzen (n = 24) und Transporteinheiten in den Erhebungsbetrieben gruppiert nach Flächenausstattung

Reifenausstattung von Maschinen in sächsischen Landwirtschaftsbetrieben

Bei der Analyse der Reifenausstattung wurde davon ausgegangen, dass sich die Varianten Normal-, Breit-, Terra- und Zwillingsreifen zu 100 % ergänzen. Die Tatsache, dass es bei den Zwillingsreifen und in wenigen Fällen auch bei den Terrareifen Betriebe gibt, die ihre Traktoren nicht ganzjährig damit ausrüsten, wurde aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit vernachlässigt.

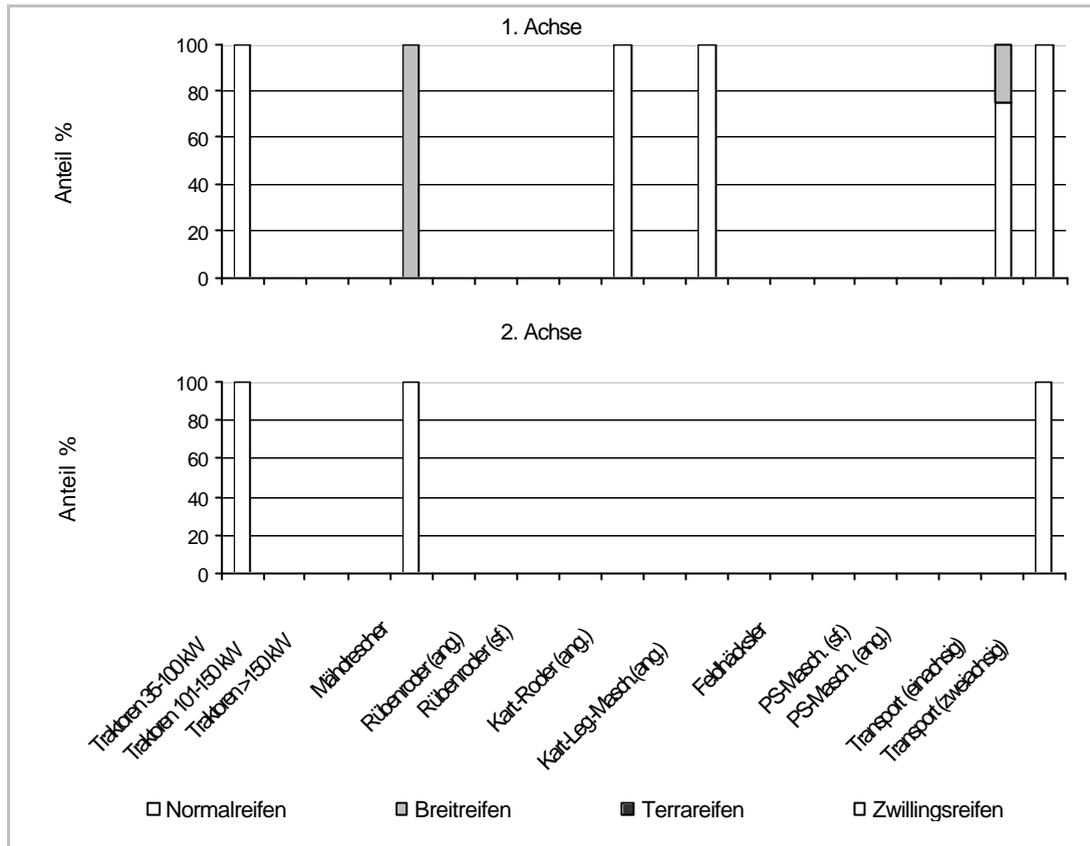
Die Reifenausstattung in sächsischen Landwirtschaftsbetrieben ist in den Abbildungen 4.1.2-5 bis 4.1.2-8 dargestellt.

In der Betriebsgruppe < 100 ha (Abb. 4.1.2-5; nur ein Betrieb) sind die vorhandenen Traktoren, die Kartoffeltechnik und die meisten Transporteinheiten mit Normalreifen ausgestattet.

Lediglich die Vorderräder des Mähdreschers und ein einachsiger Anhänger sind mit den für den Bodengefügeschutz günstigeren Breitreifen versehen.

In der Betriebsgruppe 101 bis 500 ha Flächenausstattung (Abb. 4.1.2-6) ist bei den Traktoren bis 100 kW der Anteil eingesetzter Normalreifen an beiden Achsen hoch (1. Achse: 77 %; 2. Achse: 97 %). Breitreifen kommen in dieser Traktorklasse nur selten vor. Die leistungsstärkeren Traktorklassen (101 kW bis 150 kW und >150 kW) werden dagegen an beiden Achsen verstärkt mit Breitreifen ausgestattet. Der Anteil beträgt an der Vorderachse 45 % bis 50 % und an der Hinterachse (einschließlich Terrabereifung) 27 % bis 50 %.

Die Vorderräder der Mähdrescher werden zu 82 % und die Hinterräder zu 36 % mit Breitreifen ausgestattet.



(ang.): angehängt; (sf.): selbst fahrend

Abbildung 4.1.2-5: Reifenausstattung in sächsischen Landwirtschaftsbetrieben bis 100 ha

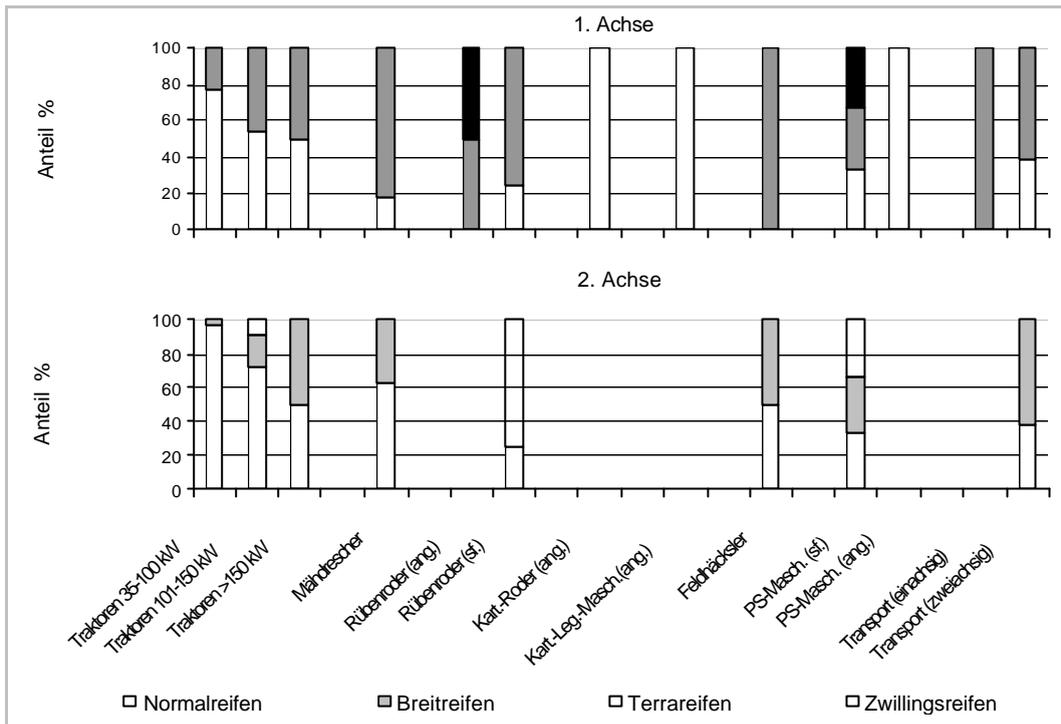
Bei der eingesetzten Rübenerntetechnik kommt Normalbereifung nur noch selten vor. Hohe Anteile von Breit- oder Terrabereifung (bis 75 %) sind zu verzeichnen.

Die Kartoffellege- und Rodetechnik ist zu 100 % mit Normalbereifung ausgestattet.

Eine aus Bodenschutz-Gesichtspunkten wahrscheinlich unzureichende Reifenausstattung (100 % Normalbereifung) ist auch bei den angehängten Pflanzenschutzmaschinen zu finden. Bei den selbstfahrenden Pflanzenschutzmaschinen werden außer der Normalbereifung auch Breit- oder Terrareifen zu jeweils einem Anteil von 33 % eingesetzt.

Die Feldhäcksler wurden an den Vorderrädern zu 100 % und an den Hinterrädern zu 50 % mit Breitreifen ausgerüstet.

In dieser Betriebsgruppe kommen Normalbereifungen an den Transporteinheiten nur noch bei 38 % der Fälle vor.



(ang.): angehängt; (sf.): selbst fahrend

Abbildung 4.1.2-6: Reifenausstattung in sächsischen Landwirtschaftsbetrieben von 101 ha bis 500 ha

In den Betrieben von 501 ha bis 1.000 ha Flächenausstattung (Abb. 4.1.2-7) waren die leistungsschwächeren Traktoren (bis 100 kW) an den Hinterrädern noch zu 100 % mit Normalbereifungen und an den Vorderrädern zu 74 % mit Normalbereifungen ausgestattet. Mit dem Anstieg der Traktorleistung geht der Anteil an mit Normalreifen ausgerüsteten Traktoren zurück. Insbesondere die starken Traktoren mit >150 kW Motorleistung sind durchweg mit Breitreifen und zumindest zeitweise (zu 13 %) mit Zwillingsbereifungen ausgerüstet.

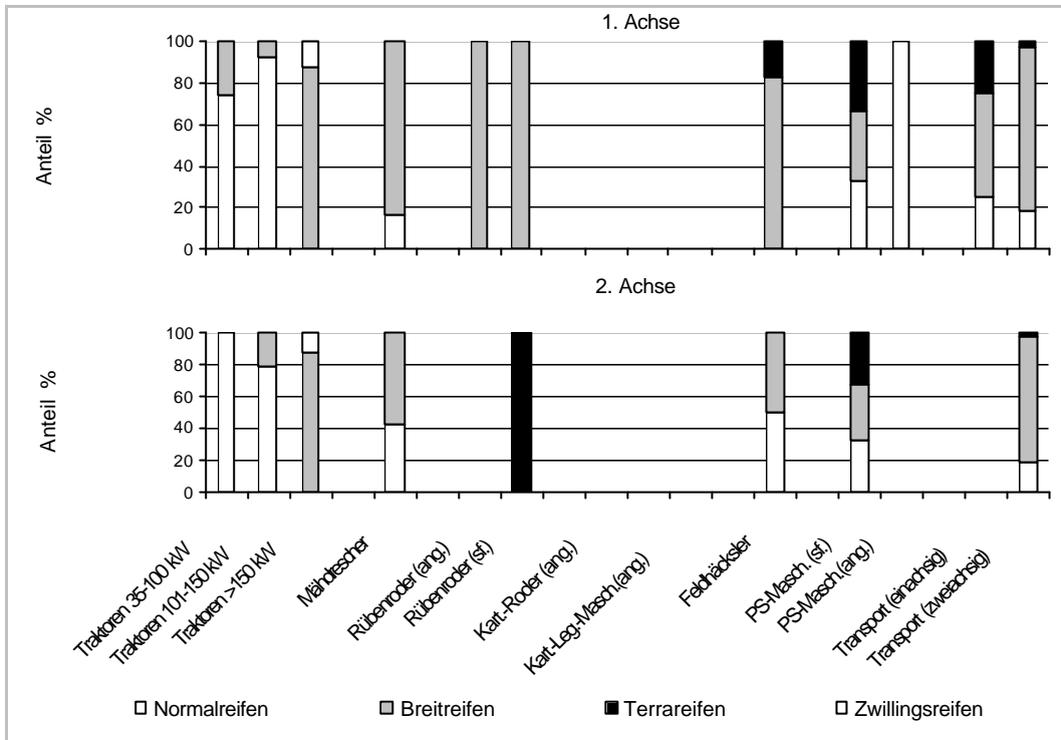
Die Mähdrescher sind zwar hauptsächlich mit Breitreifen ausgestattet, dennoch sind 17 % der erfassten Vorderräder und 42 % der erfassten Hinterräder mit Normalbereifung versehen.

Die angehängten Rübenroder und die Vorderräder der selbstfahrenden Rübenroder sind zu 100 % mit Breitreifen ausgestattet. Die Hinterräder der selbstfahrenden Rübenroder sind zu 100 % mit Terrareifen ausgerüstet.

Die Vorderräder der Feldhäcksler an der 1. Achse sind zu 83 % mit Breitreifen und zu 17 % mit Terrareifen ausgestattet. Dagegen beträgt der mit Breitreifen ausgerüstete Anteil der Hinterräder an der 2. Achse lediglich 50 %.

Während die selbstfahrenden Pflanzenschutzmaschinen an beiden Achsen zunehmend mit bodenschonender Bereifung ausgestattet werden (Breitreifen: 33 %; Terrareifen: 33 %; Normalreifen: 33 %), wurde bei den angehängten Pflanzenschutzmaschinen zu 100 % Normalreifenausstattung festgestellt.

Bei den einachsigen Transporteinheiten sind nur noch 25 % der Räder mit Normalbereifung, aber bereits 50 % aller Räder mit Breitreifen und weitere 25 % aller Räder mit Terrareifen ausgerüstet. Bei den zweiachsigen Transporteinheiten beträgt der Anteil Normalreifen 19 %, der Anteil Breitreifen 79 % und Terrabereifungen kommen zu 2 % vor.



(ang.): angehängt; (sf.): selbst fahrend

Abbildung 4.1.2-7: Reifenausstattung in sächsischen Landwirtschaftsbetrieben von 501 ha bis 1000 ha

In der Betriebsgruppe mit mehr als 1000 ha Flächenausstattung (Abb. 4.1.2-8) werden die leistungsschwächeren Traktoren (35 kW bis 100 kW) zu fast 100 % mit Normalbereifung eingesetzt. Die Traktoren der Leistungsklasse 101 kW bis 150 kW sind an beiden Achsen noch zu ca. 60 % mit Normalreifen ausgerüstet. Der Breitreifenanteil beträgt an der Vorderachse 26 % und an der Hinterachse 18 %. Weiterhin finden sich bei diesen Traktoren an beiden Achsen Räderausstattungen jeweils zu 6 % mit Terrabereifung und zu 12 % mit Zwillingsbereifung. Bei den leistungsstärksten Traktoren (> 150 kW) wurden 27 % mit Normalreifenausstattung, 55 % mit Breitreifenausstattung und 18 % mit Zwillingsbereifung vorgefunden.

Die Mähdrescher sind auf der Vorderachse zu 88 % mit Breitreifen und auf der Hinterachse zu 50 % mit Breitreifen ausgerüstet.

Bei den angehängten Rübenrodern wurde 100%ige Breitreifenausstattung festgestellt.

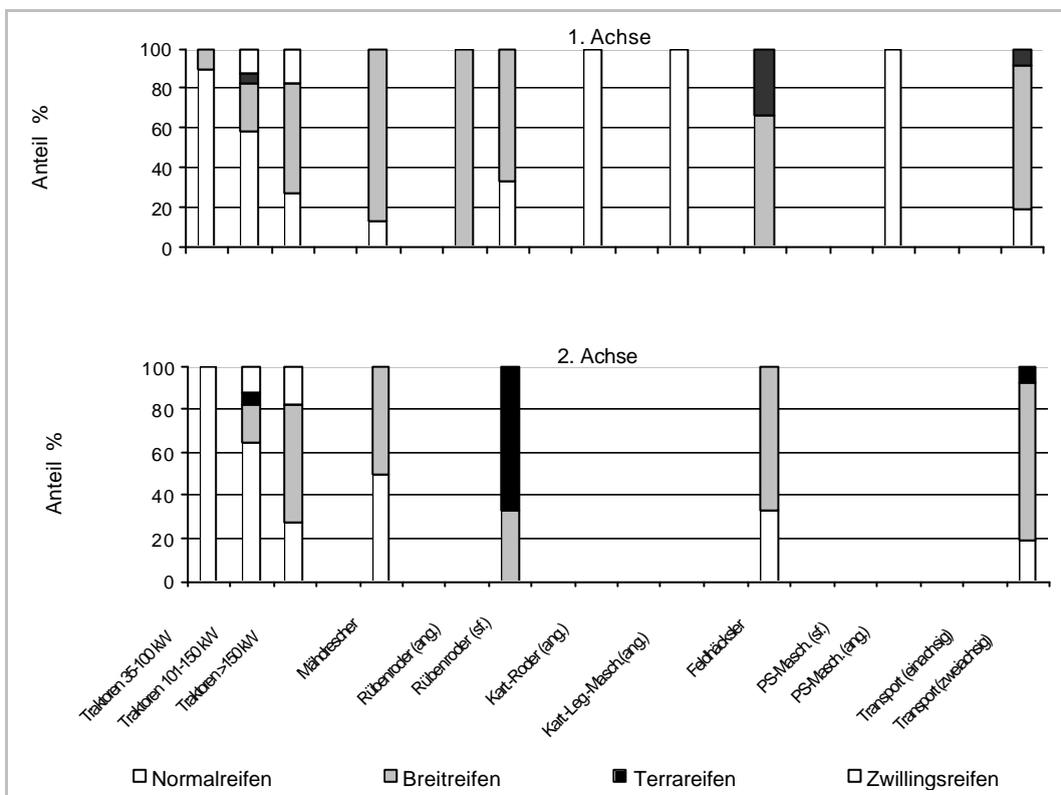
Bei den selbst fahrenden Rübenrodern sind 33 % der erfassten Räder auf der 1. Achse mit Normalbereifung und 67 % mit Breitreifen ausgestattet. Auf der stärker belasteten 2. Achse sind 33 % der erfassten Räder mit Breitreifen und 67 % mit Terrareifen ausgerüstet.

Bei der Kartoffellege- und Rodetechnik konnten zu 100 % Normalreifen festgestellt werden.

Die untersuchten Feldhäcksler haben an den Rädern der 1. Achse bei Breitreifen einen Anteil von 67 % und bei Terrareifen einen Anteil 33 %. Die Räder der 2. Achse sind zu 67 % mit Breitreifen und zu 33 % mit Normalreifen versehen.

Die in dieser Betriebsgruppe untersuchten Pflanzenschutzmaschinen (angehängt) sind zu 100 % mit Normalbereifung ausgerüstet.

An den zweiachsigen Transporteinheiten wurden achsweise zum Anteil von 19 % Normalreifen, zu 73 % Breitreifen und zu 8 % Terrareifen montiert.



(ang.): angehängt; (sf.): selbst fahrend

Abbildung 4.1.2-8: Reifenausstattung in sächsischen Landwirtschaftsbetrieben über 1000 ha

Betriebsbeispiel zum Spurflächenanteil

Je nach Produktionsverfahren bzw. angebaute Fruchtart sind unterschiedlich viele Arbeitsgänge durchzuführen. Demzufolge kann die Beanspruchung des Bodens sehr unterschiedlich bezüglich der Verteilung der eingetragenen Lasten auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen und der

Häufigkeit der Überrollungen sein. Zur Einschätzung dieses differenzierten Lasteintrages wurde in zwei häufigen Anbauverfahren (Getreide- und Futterbau) die Spurverteilung und Überrollhäufigkeit in einem Beispielbetrieb näher analysiert.

Stellvertretend für den Getreidebau und den Futterbau sind die Produktionsverfahren Winterweizen- und Silomaisanbau bezüglich der Spurenposition und der Überrollhäufigkeit genauer analysiert worden (Abb. 4.1.2-9 u. 4.1.2-10).

Im Verfahren Winterweizen gibt es entsprechend der eingesetzten Technik und der Anzahl der Arbeitsgänge Flächenanteile, die nicht bzw. andere, die bis zu 27 mal (hier ca. 1,7 % der Schlagfläche) überrollt werden (Abb. 16).

Der Spurflächenanteil beträgt 69 %, d.h. auf 31 % dieser Fläche sind keine Fahrspuren zu verzeichnen. Die summierte Spurfläche beträgt 368 %. Das heißt, unter der Voraussetzung einer theoretisch gleichmäßigen Verteilung aller Fahrspuren über die Fläche würde der Schlag flächendeckend von der Aussaat bis zur Ernte 3,7 mal überfahren.

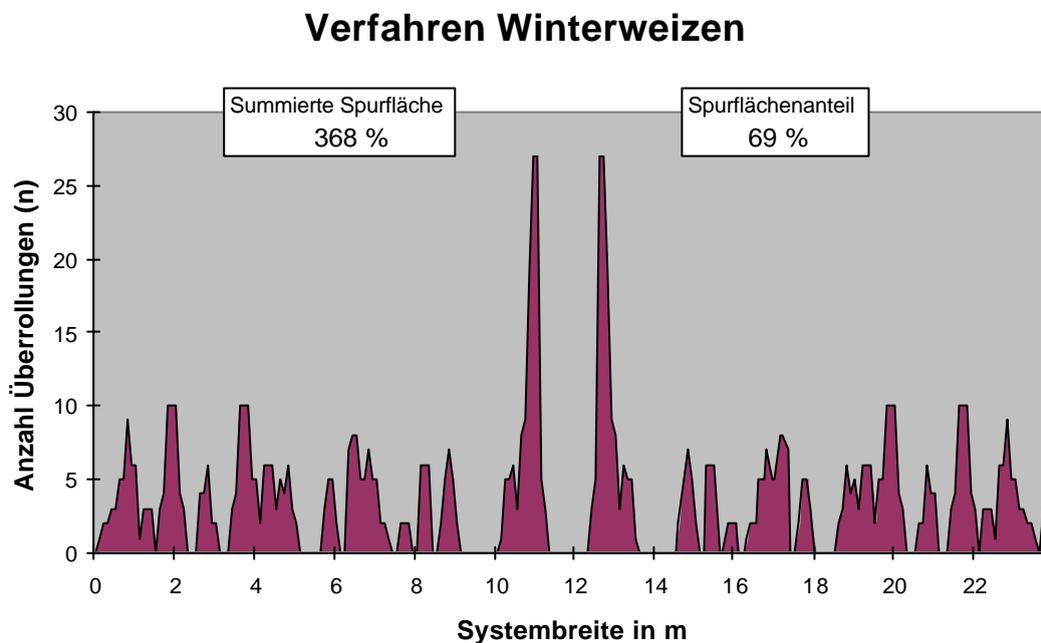


Abbildung 4.1.2-10: Spurenverteilung und Überrollhäufigkeit im Winterweizenanbau (LVG Köllitsch)

In Tabelle 4.1.2-2 sind die für Winterweizenanbau berechneten Werte der Radlasten und Kontaktflächendrücke nach Arbeitsgängen (Mehrfachüberfahrten nicht berücksichtigt) dargestellt.

Tabelle 4.1.2-2: Errechnete Radlasten und Kontaktflächendrücke im Winterweizenanbau im LVG Köllitsch

Arbeitsgang	Technik	Achse	Reifenmaße	Radlast [kN]	Kontaktflächendruck [kPa]
Stoppelumbruch	Fendt 824 Scheibenegge Raabe Seeadler 48	1	(v)600/65R34	26,7	112
		2	(h)710/70R38	44,1	130
Saatfurche	JD 4755 Lemken Vari- Opal	1	(v)480/70R30	22,1	124
		2	(h)710/70R38	41,5	119
Saatbettvor- bereitung	JD 4455 Zwillin- ge hint. Kuhn Kreiselegge	1	(v)18.4R26	22,1	132
		2	(h)20.8R38	19,1	79
		2	(h)20.8R38	19,1	79
Aussaat	Fendt 824 Zwill- linge hint. Amazone Airstar P1500	1	(v)230/95R36	26,7	112
		2	(h)20.8R38	22,1	89
		2	(h)20.8R38	22,1	89
Güllen	JD 4755	1	(v)480/70R30	22,1	124
		2	(h)710/70R38	41,5	119
	Fuchs PT14T	3	600/55-26.5	40,5	205
		4	600/55-26.5	40,5	205
N-Düngung	JD 6200 Anbaustreuer Amaz. 1500	1	(v)230/95R36	14,7	191
		2	(h)270//95R48	27,5	231
Pflanzenschutz	JD 6200	1	(v)230/95R36	14,7	191
		2	(h)270//95R48	27,5	231
	Rau-Spritze GVZD	3	12.4R46	20,6	153
Ernte	Mährdr. Claas Lexion 450	1	(v)650/75R32	81,4	263
		2	(h)500/60-26.5	34,9	221
Strohpressen	JD 4455	1	(v)18.4R26	22,1	132
		2	(h)20.8R38	38,3	158
	Fortschritt E 530	3	520/50-24	28,6	185
Transport	JD 7710	1	480 / 70 R30	11,3	65
		2	620 / 70 R42 Super 9L	21,0	70
	Lomma HW80	3	18 R 22.5	44,1	337
		4	18 R 22.5	44,1	337

Zwischen den einzelnen Arbeitsgängen im Winterweizenanbau (Tab. 4.1.2-2) variieren die Radlasten sehr stark. Die höchsten Werte erreichen die Vorderräder des Mähdreschers (81,4 kN) bei voll ausgeschöpfter Bunkerkapazität sowie die Anhänger beim Ernteguttransport (44,1 kN). Hohe Kontaktflächendrücke werden durch den Mähdrescher (263 kPa) und den Güllewagen (205 kPa) erzeugt. Diese Arbeitsgänge haben einen hohen Anteil an der Anzahl der Überrollungen sowie am Spurfächenanteil, wie in Abb. 4.1.2-9 dargestellt.

Weiterhin auffallend sind relativ hohe Kontaktflächendrücke bei niedrigen Radlasten in den Arbeitsgängen N-Düngung und Pflanzenschutz (jeweils 231 kPa). Auf Grund der großen Systembreiten werden hier allerdings nur geringe Flächenanteile überrollt. Diese sind aber verantwortlich für die Überrollungs-Peaks in der Mitte von Abbildung 4.1.2-9.

Im Silomaisanbau (Abb. 4.1.2-10) beträgt die summierte Spurfläche 238 %. Setzt man eine gleichmäßige Spurverteilung auf der Fläche voraus, so bedeutet das eine 2,4-fache Überfahung der gesamten Fläche. Allerdings beträgt der Spurflächenanteil 50 %, das heißt die Hälfte der Fläche wird im Verlaufe eines Jahres (LVG Köllitsch) in Wirklichkeit nicht befahren. Auf 1,7 % der untersuchten Fläche gibt es bis zu 17 Radpassagen.

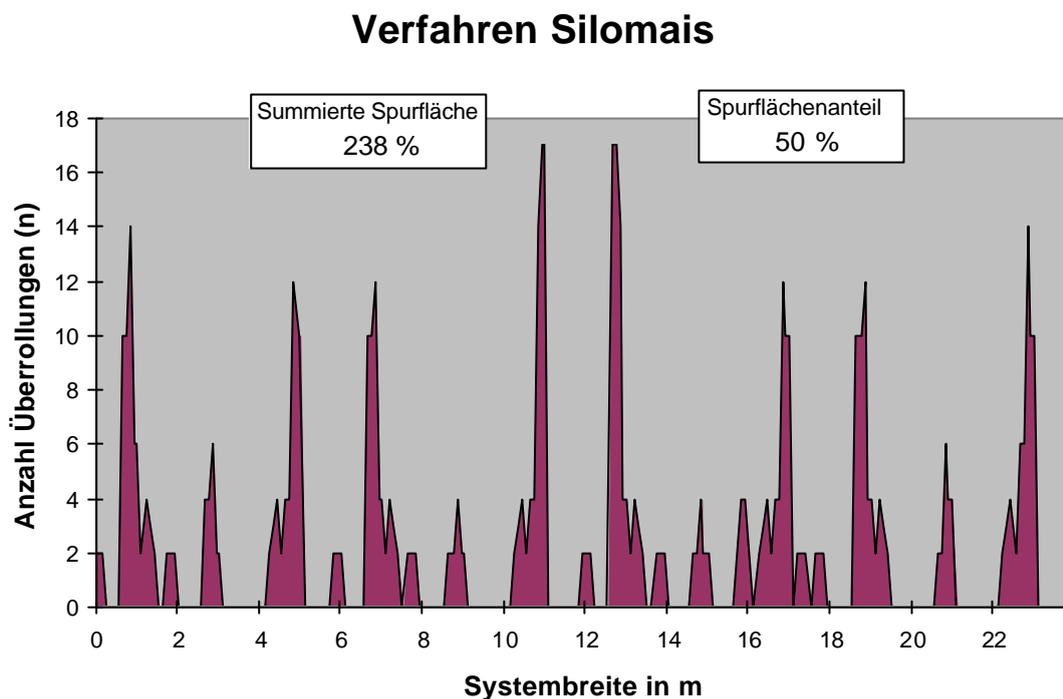


Abbildung 4.1.2-10: Spurenverteilung und Überrollhäufigkeit im Silomaisanbau (LVG Köllitsch)

In Tab. 4.1.2-3 sind die für den Silomaisanbau berechneten Werte der Radlasten und Kontaktflächendrücke nach Arbeitsgängen (Mehrfachüberfahrten nicht berücksichtigt) dargestellt.

Tabelle 4.1.2-3: Errechnete Radlasten und Kontaktflächendrücke im Silomaisanbau im LVG Köllitsch

Arbeitsgang	Technik	Achse	Reifenmaße	Radlast [kN]	Kontaktflächen- druck [kPa]
Stoppelumbruch	JD 7710 Scheibenegge Raabe Seeadler 48	1	(v)480/70R30	23,5	136
		2	(h)620/70R42	49,1	163
Herbstfurche	JD 7710 Lemken Vari- Opal	1	(v)480/70R30	23,5	136
		2	(h)620/70R42	49,1	163
Saatbettvor- bereitung	JD 4455 Zwillin- ge hint. BBG Euro- pack 6000	1	(v)18.4R26	22,1	132
		2	(h)20.8R38	19,1	79
		2	(h)20.8R38	19,1	79
Aussaat	Ford 9610 Pflle- geräder	1	(v)230/95R36	14,0	181
		2	(h)270//95R48	22,6	189
	Rau/Sicam Unisem	3	6.5/80-15	7,6	332
N-Düngung	JD 6200 Anbaustreuer Amaz. 1500	1	(v)230/95R36	14,7	191
		2	(h)270//95R48	27,5	231
Pflege	JD 6200 Rollhacke Hat- zenbichler	1	(v)230/95R36	14,7	191
		2	(h)270//95R48	27,5	231
Pflanzenschutz	JD 6200	1	(v)230/95R36	14,7	191
		2	(h)270//95R48	27,5	231
	Rau-Spritze GVZD	3	12.4R46	20,6	153
Ernte und Abfahren	Häcksler New Holl. FX 28	1	(v)650/75R32	35,4	126
		2	(h)17.5LR24	22,1	153
	LKW L60	1	(v)425/75R20	29,4	232
		2	(h)425/75R20	29,4	232

Die höchsten Radlasten im Silomaisanbau (Tab. 4.1.2-3) erzeugen die Hinterräder der Traktoren beim Stoppelumbruch und dem Anlegen der Herbstfurche (jeweils 49,1 kN) sowie die Vorderräder des Häckslers (35,4 kN) bei der Ernte. Das Transportfahrzeug beim Abfahren des Erntegutes erreicht 29,4 kN.

Bezüglich der aufgetretenen Kontaktflächendrücke wurden bei der Aussaat durch die Drillmaschine die höchsten Werte (332 kPa) erzeugt. Weitere hohe Kontaktflächendrücke entstehen beim Abfahren des Erntegutes (232 kPa) sowie bei der Pflege und N-Düngung (jeweils 191 bzw. 231 kPa) durch den mit Pfliegerädern ausgerüsteten Traktor.

Durch den Einsatz von Zwillingsreifen hinten am Traktor bei der Saatbettbereitung konnte der Kontaktflächendruck auf 79 kPa gesenkt werden.

4.1.3 [Fazit](#)

Auf der Grundlage der Erhebung in 22 sächsischen Betrieben kann ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Betriebsgröße und den eintragsrelevanten Parametern Radlast und Kontaktflächen-druck nicht abgeleitet werden. Zudem streuen die Werte stark, was auf die Vielfalt der eingesetzten Maschinen und Geräte, die darüber hinaus mit vielen Reifenkombinationen versehen werden können, zurückzuführen ist.

Trotz vorkommender Radlasten von bis zu 27 kN bei den Traktoren liegen die durchschnittlichen berechneten Kontaktflächendrücke hier bei maximal 104 kPa. Damit stellen die Traktoren in Bezug auf die mechanische Beanspruchung des Unterbodens, vorbehaltlich genauer Messungen in situ, voraussichtlich ein nachgeordnetes Problem dar.

Dies kann bei den Erntemaschinen, der Pflanzenschutz- und Düngetechnik sowie der Transporttechnik potenziell eher zu erhöhten Bodenbeanspruchungen führen (s. Abb. 4.1.2-1 – 4.1.2-4). Potenziell hohe Belastungen sind insbesondere bei der Ausbringung von Stalldung und Gülle sowie bei der Erntegutübergabe von der Erntemaschine zur Transporttechnik im Parallelverfahren zu erwarten.

Obwohl der Anbauumfang von Zuckerrüben und Kartoffeln in Sachsen (Hackfrüchte: 3,4% d. AF; Sächsischer Agrarbericht 2003) deutlich kleiner ist als der Anbauumfang von Druschfrüchten (75,7% d. AF; Sächsischer Agrarbericht 2003), darf das Verdichtungspotenzial der Rüben- und Kartoffelroder nicht außer Acht gelassen werden. Das gilt insbesondere für die Kartoffellegemaschinen, welche beim Kontaktflächendruck in den Erhebungsbetrieben die höchsten Werte erreichten. Weil es sich dabei ausschließlich um Alttechnik mit unzureichender Reifenausstattung handelt, dürfte sich das Problem im Zuge der Ersatzinvestitionen relativ schnell von selbst lösen.

Vor dem Hintergrund der sächsischen Anbauverhältnisse ist die Druschfruchtproduktion aber potenziell mit der umfangreichsten Beanspruchung des Bodengefüges verbunden. Dieser Produktionsbereich bedarf somit aus der Sicht des Bodengefügeschutzes einer besonderen Aufmerksamkeit. Das hat seine Ursache vor allem darin, dass die Getreideflächen oft bei feuchten Bodenverhältnissen befahren werden müssen (Einhaltung agrotechnischer Termine) und der Boden gegenüber Druckbelastungen in diesem Zustand sehr empfindlich reagiert. Im Kapitel 4.5 wird dieser Aspekt daher näher anhand von Bodendruckmessungen untersucht und überprüft.

4.2 Bodenphysikalische und –chemische Eigenschaften der Standorte bei konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung

Tabelle 4.2-1: **Gesättigte Wasserleitfähigkeit (Kf), Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK), Totwasseranteil (TW) und Trockenrohdichte (TRD) des Oberbodens in 20-25 cm Tiefe sächsischer Ackerböden**; Standardabweichungen in Klammern; grau hinterlegte Zahlen: Kf < 10 cm/d; LK < 5 Vol.-%; Unterschied zur Pflugvariante * = p= 0,01-0,05; ** = p<0,01; n.b. = nicht bestimmt; „Kons.“ = konservierend.

Acker Standort	Oberboden in 20-25 cm Tiefe		Kf n=6 [cm/d]	LK (pF 1,8) n=6 [Vol-%]	nFK n=6 [Vol-%]	TW n=6 [Vol-%]	TRD n=6 [g/cm ³]
	Bodenart	Bodenbearbeitungssystem					
Lüttewitz	Ut3	Pflug	258 (216)	14,0 (3,7)	22,3 (1,2)	13,1 -	1,34 (0,07)
	Ut4	Direktsaat	441 (580)	11,4 (2,5)	18,7 ** (0,8)	13,6 n.b. -	1,49 ** (0,05)
	Ut4	Kons. flach	460 * (1903)	4,5 ** (1,4)	13,8 ** (0,6)	20,1 n.b. -	1,63 ** (0,03)
	Ut4	Kons. tief	843 * (1273)	13,5 (3,8)	15,8 ** (1,0)	15,4 n.b. -	1,46 ** (0,08)
Methau	Ut3	Pflug	642 (547)	12,8 (2,9)	23,8 (1,0)	13,7 (0,1)	1,31 (0,05)
	Ut3	Kons.	429 (1085)	5,8 ** (1,7)	20,0 ** (0,3)	16,9 ** (0,3)	1,52 ** (0,04)
Littdorf	Ut3	Pflug	104 (847)	7,2 (5,7)	20,8 (2,2)	17,3 (0,2)	1,45 (0,11)
	Ut4	Kons.	121 (1055)	5,0 (2,3)	18,6 * (1,6)	17,9 ** (0,4)	1,55 * (0,03)
Frohburg	Ut4	Kons.	203 (136)	5,4 (1,5)	19,8 (0,7)	16,8 -	1,54 (0,03)
Köllitsch R 07/2001	Slu	Pflug	973 (281)	23,0 (1,7)	18,8 (0,5)	9,0 (0,0)	1,30 (0,04)
	Slu	Kons.	11 ** (29)	3,1 ** (2,7)	18,9 (0,4)	14,0 ** (0,1)	1,69 ** (0,07)
Köllitsch R 03/2002	Slu	Pflug	743 (439)	12,5 (2,2)	23,5 (1,0)	9,9 (0,1)	1,43 (0,03)
	Slu	Kons.	34 * (429)	7,8 ** (2,5)	12,2 ** (2,6)	14,4 ** (0,1)	1,74 n.b. -
Köllitsch K	Sl3	Pflug	246 (215)	13,6 (2,8)	23,3 (1,9)	4,2 (0,1)	1,56 (0,05)
Köllitsch L1 11/2001	Lt2	Pflug	12 (72)	4,7 (4,0)	27,8 (3,7)	10,0 (0,4)	1,52 (0,03)
Wellaune	Ut4	Pflug	563 (303)	12,8 (3,8)	22,3 (1,9)	18,2 -	1,24 (0,06)
Zschortau	Uls	Pflug	678 (343)	21,1 (3,3)	17,8 (1,2)	10,1 (0,2)	1,35 (0,06)
	Uls	Kons. flach	2.175 ** (1356)	13,7 ** (1,6)	19,8 ** (0,9)	10,4 ** (0,1)	1,48 ** (0,03)
	Uls	Kons. tief	1.347 * (850)	16,9 ** (2,7)	17,2 (1,0)	10,3 (0,2)	1,47 ** (0,05)
Seehausen	Slu	Pflug	69 (110)	7,9 (2,6)	26,6 (1,0)	9,2 (0,5)	1,46 (0,08)
	Slu	Pflug flach	84 (84)	6,3 (1,6)	23,2 ** (1,2)	9,9 * (0,3)	1,57 * (0,05)
	Slu	Kons.	45 (25)	7,9 (2,5)	23,3 ** (1,0)	9,7 (0,3)	1,54 (0,04)
Sprotta	Su2	Pflug	302 (401)	17,0 (2,6)	20,5 (0,9)	6,6 (0,1)	1,48 (0,05)
	Su2	Kons.	233 (191)	15,8 (2,3)	22,3 (2,8)	4,3 (2,3)	1,53 (0,03)
Wildenhain	Su2	Pflug	910 (201)	26,3 (3,8)	17,3 (1,1)	4,5 (0,6)	1,37 (0,08)
Doberschütz	Sl2	Kons.	1459 (505)	22,4 (3,8)	14,4 (1,1)	5,3 (0,6)	1,53 (0,09)

Tabelle 4.2-2: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (Kf), Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK), Totwasseranteil (TW) und Trockenrohichte (TRD) des Unterbodens in 40-45 cm Tiefe; Standardabweichungen in Klammern; grau hinterlegte Zahlen: Kf < 10 cm/d; LK < 5 Vol.-%; Unterschied zur Pflugvariante * = p= 0,01-0,05; ** = p<0,01; n.b. = nicht bestimmt; „Kons.“ = konservierend.

Acker Standort	Unterboden in 40-45 cm Tiefe		Kf n=6 [cm/d]	LK (pF ^{1,8}) n=6 [Vol.-%]	nFK n=6 [Vol.-%]	TW n=6 [Vol.-%]	TRD n=6 [g/cm ³]
	Bodenart	Bodenbearbeitungssystem					
Lüttewitz	Ut4	Pflug	89 (61)	7,9 (0,9)	24,9 (0,7)	12,5 -	1,45 (0,01)
	Ut4	Direktsaat	628 ** (541)	9,0 (0,2)	13,6 ** (0,9)	20,5 n.b. -	1,51 ** (0,04)
	Ut4	Kons. flach	53 (121)	2,0 ** (1,6)	18,8 ** (1,3)	17,7 n.b. -	1,63 ** (0,02)
	Ut4	Kons. tief	181 (871)	3,2 ** (2,0)	21,9 ** (1,3)	14,6 n.b. -	1,60 ** (0,05)
Methau	Ut3	Pflug	221 (221)	5,5 (1,5)	23,9 (0,9)	13,3 (0,1)	1,52 (0,02)
	Ut3	Kons.	186 (299)	4,5 (1,1)	25,5 ** (0,4)	14,8 ** (0,3)	1,46 ** (0,02)
Littdorf	Ut3	Pflug	1.154 (648)	4,4 (1,1)	15,9 (2,3)	22,2 (2,1)	1,52 (0,02)
	Ut4	Kons.	1.059 (1256)	5,4 (2,2)	16,2 (1,3)	19,6 ** (0,3)	1,56 * (0,03)
Frohburg	Tu4	Kons.	332 (157)	5,9 (1,5)	14,9 (0,6)	22,2 -	1,51 (0,03)
Köllitsch R 07/2001	Sl4	Pflug	89 (819)	3,5 (0,7)	19,4 (0,7)	12,9 (0,1)	1,70 (0,02)
	Slu	Kons.	546 (3682)	10,8 ** (3,8)	22,9 ** (1,4)	8,5 ** (0,5)	1,53 ** (0,08)
Köllitsch R 03/2002	Sl4	Pflug	270 (435)	9,4 (2,4)	17,5 (0,9)	12,2 (0,1)	1,61 (0,05)
	Slu	Kons.	108 (669)	12,0 (3,9)	15,8 (3,9)	9,3 ** (0,6)	1,67 n.b. -
Köllitsch K	Sl2	Pflug	200 (363)	15,2 (1,7)	22,9 (1,5)	3,8 (0,1)	1,54 (0,04)
Köllitsch L1 11/2001	Lt2	Pflug	1 (0,3)	1,7 (1,1)	31,4 (0,6)	11,7 (0,4)	1,46 (0,03)
Köllitsch L1 06/2002	Lt2	Pflug	497 (502)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Köllitsch L2	Lt3	Pflug	128 (65)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Köllitsch F	Tu3	Pflug	693 (466)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wellaune	Tu4	Pflug	11 (626)	5,7 (1,2)	22,3 (0,9)	19,5 -	1,36 (0,01)
Zschortau	Ut3	Pflug	2.293 (1076)	10,9 (3,0)	14,5 (4,5)	14,4 (1,7)	1,59 (0,04)
	Uls	Kons. flach	2.924 (701)	13,1 (1,6)	16,0 (1,1)	13,8 (0,1)	1,51 ** (0,03)
	Uls	Kons. tief	1.989 (740)	12,8 (2,2)	20,3 ** (2,4)	8,2 ** (2,3)	1,56 (0,04)
Sprotta	Ss	Pflug	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
	Ss	Kons.	662 (179)	30,9 (2,7)	5,4 (4,1)	3,8 (2,6)	1,59 (0,01)
Badrina1	Su2	Pflug	505 (248)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Badrina2	Su2	Pflug	216 (48)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Badrina3	Su2	Pflug	276 (138)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Wildenhain	Sl2	Pflug	851 (462)	25,7 (5,6)	12,3 (1,9)	2,4 (0,5)	1,58 (0,10)
Doberschütz	Su2	Kons.	1510 (146)	25,6 (1,5)	11,5 (1,0)	2,6 (0,3)	1,60 (0,05)

4.2.1 Trockenrohdichte

Die Trockenrohdichten im Ober- oder Unterboden (Tab. 4.2-1 und 4.2-2) der untersuchten Ackerböden (20 und 40 cm Bodentiefe) liegen zum großen Teil in den bodenarttypischen Bereichen (Vergleich HARTGE & HORN; 1991). In drei der untersuchten Oberböden (Lüttewitz kons. flach, Littdorf kons. und Frohburg kons.) und sieben der untersuchten Unterböden (Lüttewitz kons. flach und tief; Littdorf kons., Frohburg kons., Wellaune Pflug; Zschortau Pflug und kons.) liegen die Dichten deutlich über den am häufigsten vorkommenden Werten nach HARTGE & HORN (1991).

Die gepflügten Oberböden haben erwartungsgemäß oft signifikant niedrigere Trockenrohdichten als die nicht gepflügten Vergleichsvarianten. In den Unterböden gibt es auch signifikante Dichteunterschiede zwischen den gepflügten und nicht gepflügten Varianten, doch lagern hier die Pflugvarianten zum Teil dichter als die nicht gepflügten Vergleichsvarianten.

Teilweise sind die Dichten im Unterboden geringer als im Oberboden. Dies betrifft die konservierend bearbeiteten Varianten in Methau, Frohburg, Köllitsch R und die gepflügten Standorte in Köllitsch K und Köllitsch L1.

4.2.2 Luftkapazität

Die Luftkapazitäten der Ackeroberböden (20 - 25 cm; Tab. 4.2-1) liegen in Abhängigkeit der Bodenart und Lagerungsdichte häufig in zu erwartenden Bereichen (vgl. Tab. 55, Bodenkundliche Kartieranleitung, AG BODEN, 1996). Im konservierend bearbeiteten Oberboden in Köllitsch R (2001) ist die Luftkapazität mit nur 3,1 Vol.-% niedriger als erwartet. Insgesamt wiesen drei untersuchte Oberböden (Lüttewitz „kons.flach“; Köllitsch R 2001 und Köllitsch L1) eine pflanzenbaulich eher ungünstige Luftkapazität unter 5 Vol.-% auf.

In den Unterböden (40 - 45 cm Tiefe; Tab. 4.2-2) fallen die konservierend bearbeiteten Varianten in Lüttewitz und die gepflügten Varianten in Köllitsch R (2001) und Köllitsch L durch niedrige Luftkapazitäten (unter 4 Vol.-%) auf.

Insgesamt sind die Luftkapazitäten in den Unterböden tendenziell niedriger als in den Oberböden. Ein Drittel aller untersuchten bindigen Böden haben im Unterboden eine Luftkapazität unter 5 Vol.-%.

Konservierend bearbeitete Oberböden haben häufig geringere Luftkapazitäten als die gepflügten Oberböden. Für die Unterböden ist kein einheitlicher bearbeitungsbedingter Trend auszumachen.

4.2.3 Nutzbare Feldkapazität

Die nutzbaren Feldkapazitäten der untersuchten Ackerstandorte (siehe Tab. 4.2-1 und 4.2.-2) liegen meist in bodenarttypischen Bereichen zwischen 18 und 27 Vol.-% (vgl. Tab. 55, Bodenkundliche Kartieranleitung, AG BODEN, 1996). Auffallend niedrige nutzbare Feldkapazitäten haben die konservierend bearbeiteten Oberböden in Lüttewitz und Köllitsch R (2002). Im Unterboden weisen die Direktsaatvariante in Lüttewitz, der Standort Littdorf, die konservierend bearbeitete Variante in Köllitsch R (2002), die gepflügte und flach konservierend bearbeitete Variante in Zschortau sowie die Sandstandorte relativ niedrige nutzbare Feldkapazitäten auf.

Häufig haben konservierend bearbeitete Standorte im Oberboden niedrigere nutzbare Feldkapazitäten als die gepflügten Vergleichsvarianten. Für die Unterböden ist, wie bei der Luftkapazität, erwartungsgemäß kein Zusammenhang zur Bodenbearbeitung festzustellen.

4.2.4 Totwasser

Die Totwasseranteile reichen von sehr niedrigen Anteilen auf den Sandstandorten (2,4 Vol.-%) bis sehr hohen Anteilen (über 20 Vol.-%) in einigen Schluff- und Tonböden (z.B. „Lüttewitz Direktsaat“ „Littdorf Pflug“ im Unterboden). Konservierend bearbeitete Oberböden weisen analog zu geringeren Luftkapazitäten und geringeren nutzbaren Feldkapazitäten häufig höhere Totwasseranteile als die gepflügten Vergleichsvarianten auf.

4.2.5 Wasserleitfähigkeit

4.2.5.1 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Die gesättigten Wasserleitfähigkeiten im Ober- und Unterboden der Ackerstandorte sind überwiegend sehr hoch bis äußerst hoch (siehe Einstufung Bodenkundliche Kartieranleitung Tab. 64, AG BODEN, 1996). An wenigen Standorten liegen sie im mittleren Bereich (z.B. Oberboden von Köllitsch L1 oder Köllitsch R in der konservierend bestellten Variante sowie der Unterboden von Köllitsch L1 und Wellaune). Die Standardabweichungen sind dabei häufig extrem hoch. Ursache für die sehr guten Leitfähigkeiten und hohen Streuungen waren die in unterschiedlichem Maße in den Stechzylindern vorzufindenden Makroporen. Da die Stechzylinder innerhalb einer Profilgrube an zufällig ausgewählten Stellen entnommen wurden, charakterisieren die k_f -Werte aber die realen Verhältnisse in den Bearbeitungsvarianten wieder. Ein untersuchter Boden, der Unterboden von Köllitsch L1 (11/2001) hatte eine nur geringe Wasserleitfähigkeit von 1 cm/d bei geringer Streuung. Im Vergleich mit der Pflugvariante haben die konservierend bearbeiteten Böden in Lüttewitz und Zschortau im Oberboden signifikant höhere gesättigte Wasserleitfähigkeiten und in Köllitsch R niedrigere.

4.2.5.2 Gesättigte Wasserleitfähigkeit der Feldmessung

Die Wasserleitfähigkeiten, die im Feld mittels Guelph-Permeameter (Ks) gemessen wurden, sind methodisch bedingt bedeutend kleiner als die Kf-Werte der Labormessungen, wie Tab. 4.2.5.2-1 zu entnehmen ist. Sie sind bis um das 50-fache und mehr niedriger als die im Stechzylinder gemessenen Wasserleitfähigkeiten.

Für die Bewertung der Feld-Werte, gibt es keine gesonderte Klassifizierung. Es gilt hier, wie z.B. auch für die Bohrlochmethode nach HOOGHOUTD (1937), die übliche Klassifizierung der Werte in sechs Stufen nach der KA4 (AG BODEN) bzw. nach DIN 4220, welche identisch sind. Demnach hat der Standort Wellaune (in 40 cm) eine nur sehr geringe gesättigte Wasserleitfähigkeiten (unter 1 cm/d).

Tabelle 4.2.5.2-1: Mit dem Guelph-Permeameter in verschiedenen Tiefen gemessene gesättigte Wasserleitfähigkeiten von Acker und Grünlandstandorten; Standardabweichungen in Klammern; grau unterlegt: Kf = 10 cm/d; n = Anzahl Wiederholungen.

Acker	Bodentiefe [cm]	Kf _{Guelph} [cm/d]	
Wellaune	20	22	n = 1
	40	0,1	(0,1) n = 2
Doberschütz	20	49	(20) n = 3
	40	52	(13) n = 3
Wildenhain	20	41	(38) n = 5
	40	53	(27) n = 4

4.2.6 Humusgehalt

Alle Ackerstandorte haben in der Krume Humusgehalte zwischen 1,2 % und 2,7 % (siehe Tab. 3.2.1-2). Sie liegen in den standort- und bodenarttypischen Bereichen. Mittelhumos im Sinne des Gehalts an organischer Substanz = 2 – 4 % waren zum Untersuchungszeitpunkt die untere Krume (15 - 30 cm Tiefe) in der gepflügten Variante von Littdorf (Oberkrumengehalte nicht bekannt) sowie die Krume an den Standorten Köllitsch L1, Köllitsch L2, Köllitsch F, Sprotta und Wildenhain.

Bedingt durch die tiefere Bearbeitung des Bodens beim Pflügen und damit Durchmischung der Krume bis in 25 cm Tiefe, haben die gepflügten Varianten in 20 cm Tiefe in Lüttewitz, Littdorf, Köllitsch R und Zschortau einen höheren Humusgehalt als die konservierend bearbeiteten Vergleichsvarianten. Differenziertere Untersuchungen der Krume (Oberkrume: 0 - 15 cm und Unterkrume: 15 - 30 cm) auf den Standorten Littdorf und Köllitsch zeigen in den konservierend bestellten Böden eine bearbeitungsbedingte Anreicherung der organischen Substanz in der Oberkrume und Abnahme in der Unterkrume.

Die Unterböden sind außer in Lüttewitz sowie auf allen Standorten in Köllitsch nur sehr schwach humos (org. Substanz < 1 %; siehe Tab. 10; Bodenkundliche Kartieranleitung, AG BODEN, 1996). In Lüttewitz und Köllitsch R zeichnet sich die Pflugvariante im Vergleich zu den pfluglosen Varianten durch einen höheren Humusgehalt aus.

4.2.7 Diskussion

Im Hinblick auf die ökologische Funktionalität des Porensystems weisen die meisten Standorte gute Ergebnisse auf.

In den nicht mehr bearbeiteten unteren Krümen (20 cm Bodentiefe) der konservierend bearbeiteten Standorte zeigt sich, dass die im Vergleich zu den gepflügten Varianten hohen Lagerungsdichten zu Lasten des Grobporenvolumens (siehe Luftkapazität) und zu Gunsten des Feinporenanteils (siehe Totwasseranteil) gingen. Bei den tonigen Schluffen sind damit verbunden die nutzbaren Feldkapazitäten in 20 cm Tiefe kleiner als bei den gepflügten Vergleichstandorten (siehe auch SCHMIDT et al. 2002). Beim schluffigen Sand (Sprotta) und sandig lehmigen Schluff (Zschortau) sind die Mittelporenanteile und damit die nutzbare Feldkapazitäten in den konservierend bearbeiteten Böden erhöht (Ausnahme Köllitsch R 2002).

In den Unterböden (40 cm Tiefe) ist ein Zusammenhang zwischen der Porengrößenverteilung und der Bodenbearbeitung nicht erkennbar.

Über ein Drittel der untersuchten Schluff- und Lehmunterböden weisen nur sehr niedrige Luftkapazitäten unter 5 Vol.-% auf, wobei bei den untersuchten Schluffböden weniger die Lagerungsdichte als vielmehr die Aggregation des Bodens einen Einfluss auf die Luftkapazität hat, da vor allem die Böden mit Platten- oder Kohärentgefüge sehr geringe Luftkapazitäten haben. Dies deckt sich weitgehend auch mit den Ergebnissen von LEBERT (1989) und NISSEN (1999). Nach LEBERT & HORN (1992) weisen Schluffböden häufig nur eine schwache Strukturausbildung auf, so dass auch bei niedriger Lagerungsdichte texturbedingt eine nur geringe Luftkapazität vorliegt.

Eine relativ geringe Luftkapazität des Bodens kann bei hoher vertikaler Kontinuität der verbliebenen Makroporen eine weiterhin ausreichende Funktionalität im Hinblick auf Wasser- und Lufthaushalt gewährleisten. Überwiegend hohe gemessene gesättigte Wasserleitfähigkeiten (Ausnahme Wellaune) bei relativ geringen Grobporenvolumina sprechen für ein ausgeprägtes Sekundärporensystem der untersuchten Böden (z.B. Standorte Lüttewitz, Methau, und Littdorf).

Bei Sekundärporen, meist Regenwurm- oder Wurzelröhren, kann man gewöhnlich von einer guten vertikalen Kontinuität der Poren ausgehen. Die hier dargestellten Wasserleitfähigkeiten, die an Stechzylindern gemessen wurden, können aber kaum etwas über die tatsächliche Porenkontinuität vor allem der Makroporen aussagen, denn es werden nur wenige Zentimeter Bodenkörper durchflossen (hier 5 cm). MÜLLER et al. (1970) weisen darauf hin, dass bei der üblichen Entnahme der Stechzylinder in vertikaler Richtung die vorhandenen, im wesentlichen vertikal verlaufenden Makroporen abgeschnitten und häufig erst durch das Herauslösen der Probe aus dem Bodenverband

für einen unbehinderten Wasserdurchfluss geöffnet werden. Die geringe Fließstrecke im Stechzylinder wirkt sich also förderlich auf die Leitfähigkeit aus. Der Einfluss der Porenkontinuität bei der Wasserleitung wird daher bei Stechzylindermessungen nicht wirklichkeitsgetreu wiedergegeben. Durch Bodenbearbeitung, Scherung und Verdichtungen können Poren auf nur kurzen Abschnitten im Bodenprofil unterbrochen sein, und sie stehen dadurch nur einschränkt für die Wasser- und Luftleitung zur Verfügung.

Bei den Wasserleitfähigkeitsmessungen in-situ (Guelph-Permeameter) wurde ein vielfach größeres Bodenvolumen durchflossen. Die gesättigten Wasserleitfähigkeiten sind im Vergleich zu den Stechzylindermessungen weit geringer. In Köllitsch L1 und Wellaune können die relativ niedrigen Luftkapazitäten im Unterboden in Kombination mit den niedrigen gesättigten Wasserleitfähigkeiten in-situ (unter 1 cm/d) folglich bei ungünstigen Bedingungen zu Wasserstauungen oder Luftmangel führen.

Nach WERNER & PAUL (1999) liegt eine Schadverdichtung des Bodens vor, wenn die Luftkapazität in der Ackerkrume bei bindigen Böden unter 8 Vol.-% und in der Krumbasis unter 5 Vol.-% beträgt und die gesättigte Wasserleitfähigkeit $K_f < 10$ cm/d ist. Dieser Zustand konnte bei den untersuchten Böden nur zum Zeitpunkt 11/2001 in Köllitsch L1 im Unterboden festgestellt werden (die geforderte minimale gesättigte Wasserleitfähigkeit von 10 cm/d bezieht sich auf Werte, die an Stechzylindern im Labor ermittelt wurden). Ein Jahr später (6/2002) wurde auf dem gleichen Schlag eine Wasserleitfähigkeit von $K_f = 497$ cm/d gemessen. Daher wird hier zunächst von einer punktuellen Schadverdichtung ausgegangen.

Auch LEBERT et al. (2004) gehen von einer Schadverdichtung des Bodens aus, wenn die Luftkapazität unter 5 Vol.-% und die gesättigte Wasserleitfähigkeit unter 10 cm/d liegt. Ein zweifelsfreier Nachweis fordert aber ebenfalls eine gleichzeitige Einstufung des Bodens bei der Feldgefügeansprache in die Klassen 4 und 5.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass bei den in Sachsen weit verbreiteten tonreichen Lössböden und lehmigen oder tonigen Auenböden eine Vorsorge gegen Schadverdichtung ratsam ist, auch wenn unter Berücksichtigung aller Indikatoren keine Schadverdichtung festzustellen ist. Häufig lagen die Luftkapazitäten nahe 5 Vol.-%. In einem Drittel aller Fälle unterschritt die Luftkapazität diesen Wert. Es ist für diese Böden daher wichtig, dass eine stabile Aggregatstruktur und ein gut ausgeprägtes Sekundärporennetz vorhanden sind, damit der Wasser- und Luftfluss in diesen Böden gewährleistet ist.

4.3 [Bodenmechanische Kennwerte der Standorte bei konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung sowie auf Grünland](#)

4.3.1 Vorbelastung

Ackerland

Tabelle 4.3.1-1: Gemessene Vorbelastungen (Pv) bei Feldkapazität von sächsischen Ackerböden bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (Mittelwerte: n = 6)
 signifikante Unterschiede zum Pflug am Standort : * (p = 0,05) und ** (p = 0,01),
 signifikante Unterschiede zwischen Ober- und Unterboden pro Variante:
 a (p = 0,05) und b (p = 0,01),
 Unterschiede Ober- zu Unterboden: <, >; n.r.: nicht relevant .

Acker				Oberboden in 20-25 cm Tiefe		Unterboden in 40-45 cm Tiefe		Unterschied
Standort-typ	Standort	Bodenart OB/UB	Bodenbearbeitungssystem	Pv (pF1,8; n=6) [kPa]	STABW	Pv (pF1,8; n=6) [kPa]	STABW	Ober-/Unterboden
Lö	Lüttewitz	Ut4/Ut4	Pflug	83	6,2	157	3,0	a<
			Direktsaat	133**	4,7	140	28,3	-
			Kons.	122**	8,5	137	20,5	-
			Kons. tief	113	17,7	113	19,3	-
Lö	Methau	Ut3/Ut3	Pflug	78	18,6	64	11,1	-
			Kons.	108**	13,7	81	22,7	b>
Lö	Littdorf	Ut3/Ut4	Pflug	61	9,6	104	8,9	a<
			Kons.	64	15,6	115	26,5	a<
Lö	Frohburg	Ut4/Tu4	Kons.	90	62,3	72	15,0	-
AI	Köllitsch R 07/2001	Slu/SI4	Pflug	70	27,6	66	22,6	-
			Kons.	87	14,3	128**	27,5	b<
	Köllitsch R 03/2002	Slu/SI4	Pflug	33	12,6	108	5,2	a<
			Kons.	77**	8,8	111	10,3	a<
AI	Köllitsch K	SI3/SI2	Pflug	92	5,2	69	33,3	-
AI	Köllitsch L1 11/2001	Lt2/Lt2	Pflug	103	13,3	94	13,6	-
			Kons.	-	-	50	19,7	-
AI	Köllitsch L2	Lt3	Pflug	-	-	68	20,7	-
AI	Köllitsch F	Tu3	Pflug	-	-	69	13,6	-
AI	Wellaune	Ut4/Tu4	Pflug	35	6,6	75	32,9	b<
D	Zschortau	Uls/Uls	Pflug	59	7,9	121	20,1	a<
			Kons.	111**	9,7	119	20,3	-
			Kons. tief	114**	13,0	118	19,7	-
D	Seehausen	Slu/Slu	Pflug	67	13,7	71	29,0	-
			Pflug flach	103**	16,5	98	22,8	-
			Kons.	114**	12,0	89	14,6	b>
D	Sprotta	Su2/Ss	Pflug	39	12,4	-	-	-
			Kons.	68**	9,3	27	12,1	b>
D	Badrina1	Su2	Pflug	-	-	50	12,2	-
D	Badrina2	Su2	Pflug	-	-	74	12,5	-
D	Badrina3	Su2	Pflug	-	-	57	9,8	-
D	Wildenhain	Su2/St2	Pflug	63	33,6	39	22,3	-
D	Doberschütz	SI2/Su2	Kons.	60	42,6	62	36,1	-

Tabelle 4.3.1-2: Klassifizierung der Werte der Vorbelastungen Pv aus Tab. 4.1 (gem. Tafel 4, DVWK-Merkblatt 234/1995) für Ober- und Unterboden

Pv-Klasse	Anzahl der Werte					
	< 30 kPa	30-60 kPa	60-90 kPa	90-120 kPa	120-150 kPa	>150 kPa
	1: Sehr gering	2: gering	3: Mittel	4: hoch	5: Sehr hoch	6: Extrem hoch
Oberboden	3	3	12	8	2	0
Unterboden	2	5	12	9	4	1

Die Einstufung der Vorbelastungen aus Tab. 4.3.1-1 ergibt, dass sowohl im Ober- als auch im Unterboden die Werte überwiegend den Klassen 2 bis 4 zuzuordnen sind (Tab. 4.3.1-2).

Ein relativ deutlicher Einfluss ergibt sich aus der Bodenart (Tab. 4.3.1-1). Die sandigen D-Standorte sowie die AI-Standorte sind vor allem in die drei unteren Stabilitätsklassen einzustufen. Auf den lehmigen LÖ- und D-Standorten überwiegen im Unter- und Oberboden die Stufen 3, 4 und 5.

Unterschiede zwischen den Horizonten sind an einigen Standorten bodenbearbeitungsbedingt festzustellen. Die gepflügten Oberböden zeigen hier meist eine geringere Vorbelastung, während an den konservierend bestellten Standorten Methau, Seehausen und Sprotta signifikant höhere Vorbelastungswerte gefunden wurden.

„Extrem hoch“ war die Vorbelastung nur in Lüttewitz im Unterboden der gepflügten Variante. Die niedrigsten Vorbelastungen wurden auf dem Sandstandort Sprotta (27 kPa) gemessen. In Methau, Littdorf, Zschortau und Seehausen bewegen sich die gemessenen Vorbelastungen überwiegend im Bereich „mittel“ bis „hoch“. Die Auenstandorte Köllitsch und Wellaune weisen Vorbelastungen im Bereich „gering“ bis „sehr hoch“ auf (hier: 33 bis 128 kPa) während für die Sandstandorte Badrina, Wildenhain und Doberschütz im Mittel nur „geringe“ bis „mittlere“ Vorbelastungen (39 bis 74 kPa) nachgewiesen wurden.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Vorbelastungswerte sowohl im Ober- als auch im Unterboden häufig einer starken Streuung (10% - 30% des Mittelwertes) unterliegen. Sowohl Bodenarthauptgruppe als auch die Bodenbearbeitung verhalten sich diesbezüglich in gleicher Weise.

Konservierend bearbeitete Böden weisen im Oberboden oft eine höhere Vorbelastung auf, als die gepflügten Vergleichshorizonte. Diese Differenzen sind zumeist hoch signifikant ($p = 0,01$). Flaches Pflügen wie in Seehausen führt zum gleichen Ergebnis.

Dagegen zeigt der variantenbezogene Vergleich von Ober- zu Unterboden in der Hälfte der Fälle keine signifikanten Unterschiede (Tab. 4.3.1-1). Bei ca. einem Drittel sind die Werte der Oberböden signifikant niedriger. In drei Fällen wurden signifikant höhere Werte im Unterboden festgestellt.

Tabelle 4.3.1-3: Mittelwerte der Vorbelastungen (pF 1,8) sächsischer Ackerböden (s. Tab. 4.3.1-1) gruppiert nach Bodenarthauptgruppe, -tiefe und -bearbeitung (n = Anzahl der untersuchten Böden)

Bodenarten- hauptgruppe und Bodentiefe	Bodenarten	Mittelwert (STAW) [kPa]	n =	Pv-Klasse
Sand Pflug-20 cm Kons. flach-20 cm 40 cm	Su2, SI2	51 (17)	2	2
	Su2, SI2	64 (6)	2	3
	Ss, Su2, St2	52 (17)	6	2
Lehm Pflug-20 cm Kons. flach-20 cm 40 cm	Slu, Lt2	73 (27)	5	3
	Slu	93 (19)	3	4
	Slu, SI4, Lt2	88 (24)	10	3
Schluff Pflug-20 cm Kons. flach -20 cm (oder Direktsaat) 40 cm	Ut3, Uls,	63 (19)	5	3
	Ut3, Uls, Ut4	105 (25)	6	4
	Ut3, Uls, Ut4	115 (26)	11	4
Ton 40 cm	Tu4, Lt3, Tu3	71 (3)	4	3

Um die Unterschiede zwischen den Bodenarten und zwischen Ober- und Unterböden zu verdeutlichen, wurden die einzelnen Vorbelastungswerte verschiedener Standorte horizont- und bodenartbezogen zu Mittelwerten zusammengefasst (Tab. 4.3.1-3). Vergleicht man die Mittelwerte der Vorbelastungen der Ober- und Unterböden bei gleicher Hauptbodenart miteinander, dann fällt auf, dass die Vorbelastungen von Schluff- und Lehmböden 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. Diese Verhältnisse werden durch die Prüfung der Signifikanzen bestätigt. 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 in den wenig stabilen Kohärent- oder Einzelkornggefüge der Böden liegen.

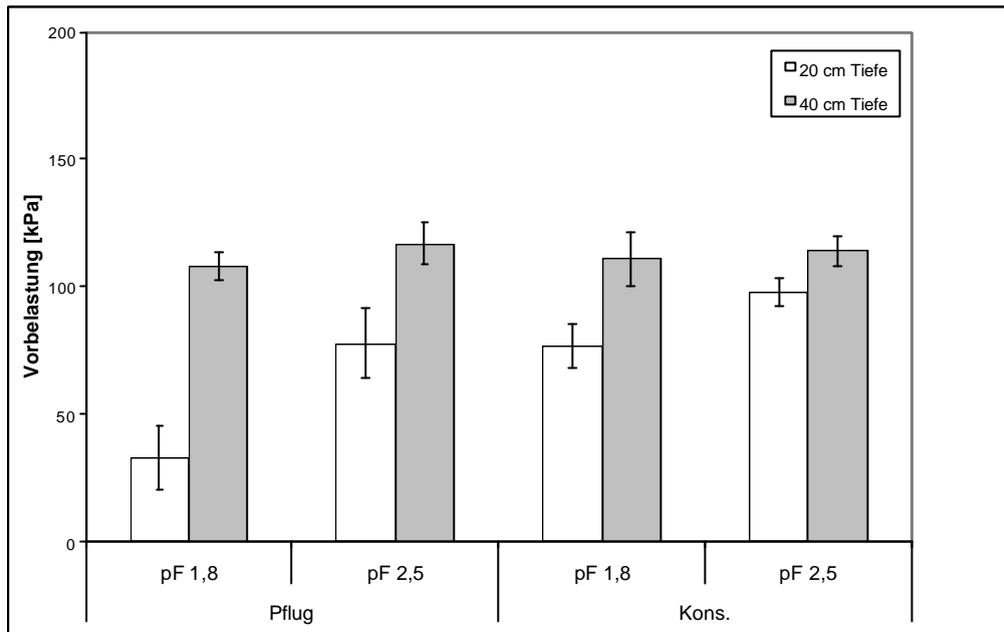


Abbildung 4.3.1-1: Gemessene Vorbelastungen bei pF 1,8 und pF 2,5 im Ober- und Unterboden der Ackerfläche Köllitsch R bei unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung

Am Standort Köllitsch R 03/2003 wurde zusätzlich die Vorbelastung bei pF 1,8 und pF 2,5 gemessen, um beispielhaft den Einfluss einer Bodenabtrocknung mit zu erfassen (Abb. 4.3.1-1). Im gepflügten Oberboden führte die steigende Entwässerung zu einer Verdopplung der Stabilität (von 33 kPa auf 78 kPa). Im stabileren konservierend bearbeiteten Oberboden führte die Entwässerung dagegen zu einer vergleichsweise geringeren Erhöhung der Stabilität (77 kPa auf 98 kPa). Die insgesamt höheren Vorbelastungen des Unterbodens stiegen kaum noch weiter an (108 kPa auf 117 kPa und 111 kPa auf 114 kPa). Dies deckt sich mit dem Befund von HORN & FLEIGE (2001), wonach die gelockerten Oberböden empfindlicher auf eine abnehmende Wasserspannung reagieren als die Unterböden.

Grünland

Grünlandböden werden i.d.R. nicht mechanisch gelockert. Daher ist insbesondere der Oberboden hinsichtlich seiner mechanischen Belastbarkeit zu betrachten. Aus diesem Grund wurden hier die Tiefen 10 cm und 20 cm untersucht. Die Klassifizierung der in Tabelle 4.3.1-4 dargestellten Vorbelastungswerte ergibt, dass sie überwiegend in den Stufen „gering“ und „mittel“ liegen (Tab. 4.3.1-5).

Die Werte streuen in beiden Tiefen z.T. recht stark zwischen 30 % bis 50 % und sind daher bezüglich der Vorbelastung als relativ heterogen anzusprechen. Ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Höhe der Vorbelastung und der Art der Nutzung des Grünlandbodens (Wiese, Weide, Mähwei-

de) ist anhand der Ergebnisse nicht eindeutig feststellbar. In der Tendenz scheint bei Beweidung in 10 cm Tiefe eine höhere Vorbelastung vorzuliegen.

Tabelle 4.3.1-4: Gemessene Vorbelastungen (Pv) von Grünland- (Wiese/ Weide) Oberböden (10 und 20 cm Tiefe) bei pF = 1,8

Grünland Standort-typ	Standort	Bodenart	Nutzung	10 cm Tiefe		20 cm Tiefe	
				Pv (pF1,8) n=6 [kPa]	STABW	Pv (pF1,8) n=6 [kPa]	STABW
Lö	Großstolpen	Lu	Wiese	-		86	58.3
Lö	Methau	Ut4	Wiese	57	15.8	124	44.2
Al	Thallwitz	Ut2/Ut4	Weide	48	12.1	76	36.5
Al	Köllitsch	Sl4	Mähweide	93	50.3	82	57.9
Al	Köllitsch1	Sl3	Mähweide	66	37.2	88	43.3
D	Wildenhain	Sl3	Weide	86	63.6	45	13.2
V	Christgrün	Ls2	Wiese	49	16.1	36	8.1
V	Plauen	Ls2	Wiese	48	26.7	62	11.0

Tabelle 4.3.1-5: Klassifizierung der Vorbelastungswerte aus Tab 4.3.1-4 (gem. Tafel 4, DVWK-Merkblatt 234/1995) für 10 cm und 20 cm Bodentiefe.

Pv-Klasse	Anzahl der Werte					
	< 30 kPa	30-60 kPa	60-90 kPa	90-120 kPa	120-150 kPa	>150 kPa
	1: Sehr gering	2: gering	3: Mittel	4: hoch	5: Sehr hoch	6: Extrem hoch
10 cm	0	4	2	1	0	0
20 cm	0	2	5	0	1	0

Tabelle 4.3.1-6: Vorbelastung (gemessen) sächsischer Grünlandböden in 10 cm und 20 cm Bodentiefe bei einer Wasserspannung von pF 1,8 sowie Einstufung in Pv-Klasse (n= Anzahl der untersuchten Böden)

Bodenarten-hauptgruppe und Bodentiefe	Bodenarten	Mittelwert [kPa]	n =	Pv-Klasse
Sand	10 cm	76	2	3
	20 cm	133	2	5
Lehm	10 cm	63	3	3
	20 cm	60	3	3
Schluff	10 cm	53	2	2
	20 cm	95	3	4

Orientiert an den Pv-Klassen zeigt sich, dass bei den Bodenarthauptgruppen Sand und Schluff in 20 cm Tiefe ein bzw. zwei Stufen höhere Pv-Klassen erreicht werden. Für die Lehmstandorte ist diesbezüglich kein Unterschied festzustellen.

4.3.2 Scherwiderstände

Tabelle 4.3.2-1: Scherparameter (Kohäsion c, Winkel der inneren Reibung f) an ausgewählten Standorten in Sachsen bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (n = 1)

Standort	Variante	Tiefe (cm)	Kohäsion c (kPa) _{pF 1,8}	Winkel der inner. Reib. f (°) _{pF 1,8}
Methau	Pflug	20...25	28,0	18,6
		40...45	13,8	24,4
	Kons.	20...25	46,5	19,7
		40...45	5,3	26,0
Littdorf	Pflug	20...25	14,7	24,0
		40...45	30,9	17,9
	Kons.	20...25	20,8	23,2
		40...45	26,6	17,6
Köllitsch R	Pflug	20...25	11,4	22,6
		40...45	9,8	22,1
	Kons.	20...25	13,7	20,7
		40...45	3,8	24,3
Köllitsch K	Pflug	20...25	32,3	23,9
		40...45	29,6	23,2
Köllitsch L1	Pflug	20...25	35,0	19,8
		40...45	40,0	6,0
Zschortau	Pflug	20...25	7,1	23,0
		40...45	15,6	21,4
	Kons.	20...25	5,6	23,2
		40...45	11,0	21,2
	Kons. tief	20...25	11,3	22,3
		40...45	23,1	19,5
Seehausen	Pflug	20...25	21,5	26,4
		40...45	30,0	26,2
	Pflug flach	20...25	43,2	22,0
		40...45	30,9	22,4
	Kons.	20...25	21,4	27,1
		40...45	37,5	26,6
Sprotta	Pflug	20...25	34,0	31,0
	Kons.	20...25	11,3	25,0
		40...45	21,6	26,4

An ausgewählten Standorten wurden zusätzlich zur Vorbelastung auch die Scherparameter erfasst. Aus Kapazitätsgründen erfolgten die Untersuchungen ohne Wiederholungen, so dass die gefundenen Werte zur Orientierung dienen können, jedoch die Interpretation von Unterschieden nicht eindeutig möglich ist.

Die Kohäsion und der Winkel der inneren Reibung sind Materialkonstanten, welche von der Textur und Aggregation gesteuert werden. Sie beeinflussen maßgeblich die bodeneigene Stabilität (Vorbelastung) (LEBERT, 1989).

Die in Tabelle 4.3.2-1 wiedergegebenen, standortbezogenen Werte zum Winkel der inneren Reibung liegen in dem für Böden üblichen Bereich von 25° bis 36° (HARTGE u. HORN, 1991). Zwischen den Standorten sind keine eindeutigen Unterschiede auszumachen. Eine texturbedingte Zunahme des Winkels der inneren Reibung mit Zunahme des Sandanteils, wie z.B. von LEBERT (1991) gefunden, kann nicht festgestellt werden. Der mit steigendem Tongehalt abnehmende Winkel (LEBERT & HORN, 1992) wird in Köllitsch L1 mit 6° bestätigt. Innerhalb der Standorte bestehen zum Teil deutliche Unterschiede zwischen Ober- und Unterboden (Methau, Littdorf).

Bezüglich der Werte der Kohäsion zeigt sich ein sehr heterogenes Bild. An einigen Standorten deuten sich aber bodenstruktur- und aggregierungsbedingte Unterschiede an.

Am schluffigen Standort Methau wurde im Unterboden (Kohärentgefüge) ein deutlich niedriger Wert der Kohäsion im Unterboden im Vergleich zum Oberboden festgestellt. Dies deckt sich mit dem Befund von LEBERT (1989), dass auf schluffigen Böden mit Kohärentgefüge die Kohäsionswerte deutlich abnehmen können. An dem bezüglich der Bodenart vergleichbaren Standort Littdorf wurden in dieser Bodentiefe hingegen deutlich höhere Werte gefunden, welche durch das dort vorhandene plattige Gefüge erklärbar sind.

Bezüglich des Faktors Bodenbearbeitung stellt sich die Situation der Scherparameter sehr heterogen dar. So liegen die Werte der Kohäsion an den schluffigen Standorten Methau und Littdorf in 20 – 25 cm Tiefe im gepflügten Bereich z.T. deutlich unter denen des konservierend bestellten Bereichs. Die Vermutung, dass die stärker wendende und homogenisierende Wirkung des Pfluges die Kohäsion mindert, liegt nahe.

Auf den sandig-lehmigen Standorten ist dieser Trend nicht so eindeutig zu beobachten. In Köllitsch R, Zschortau und Seehausen unterscheiden sich die konservierend bestellten und gepflügten Böden nicht so klar voneinander. Am Standort Seehausen fällt die deutlich höhere Kohäsion in 20 – 25 cm Tiefe im flach gepflügten Bereich auf. Dieser Befund kann als Folge einer Pflugsohlenbildung gedeutet werden.

4.3.3 Diskussion

Mit der Vorbelastung steht ein Parameter zur Verfügung, der es erlaubt, das Verdichtungsverhalten des Bodens abzuschätzen und in der Dimension eines Druckes zu beziffern.

Gegen die Verwendung des Parameters „Vorbelastung“ gibt es einige theoretische und praktische Einwände. So ist bisher kein einheitliches Verfahren (Standardmessverfahren) für die Ermittlung der Vorbelastung festgelegt worden. Das Messresultat zeigt jedoch eine deutliche Abhängigkeit von Rand- und Anfangsbedingungen des Messvorgangs (GRÄSLE & NISSEN, 1996). Auch bei der Auswertung der Drucksetzungskurven wurde bisher kein Verfahren festgelegt. Am häufigsten wird das auch hier verwendete Verfahren nach CASAGRANDE (1936) angewendet. Dieses hat unbestritten eine bearbeiterabhängige und dadurch subjektive Komponente, dadurch, dass die maximale Krümmung der Kurve nicht immer mit hoher Sicherheit festgelegt werden kann (GRÄSLE & NISSEN, 1996; SCHÄFER-LANDEFELD & BRANDHUBER, 2001). Hervorzuheben ist, dass die vorliegenden Vorbelastungswerte, durch das Aufbringen von Laststufen an einer Probe gewonnen wurden (vgl. NISSEN, 1999 und GRÄSLE & NISSEN, 1996) und der bekanntermaßen hohen Streuung der Ergebnisse durch eine sechsmalige Wiederholung der Messung Rechnung getragen wurde.

Weiter ist zu beachten (SCHÄFER-LANDEFELD & BRANDHUBER, 2001), dass der eindimensionale Drucksetzungsversuch das Verhalten des Bodens im Feld nur unvollständig wiedergeben kann, da im Boden dreidimensionale Verformungen möglich sind. KÜHNER (1997) stellte allerdings in seiner Arbeit schon in 10-15 cm Bodentiefe eine ausschließlich vertikale Bodenbewegung fest.

Ferner ist zu beachten, dass der Vorbelastungswert nach KELLER (2004) ohnehin kein exakter Grenzwert am Übergang von elastischen zum plastischen Bereich ist, sondern eher ein Bereich charakterisiert, in dem plastische Gefügeveränderungen eintreten können.

4.4 Zusammenhänge zwischen bodenphysikalischen und -mechanischen Kenngrößen

4.4.1 Vorbelastung und Trockenrohdichte

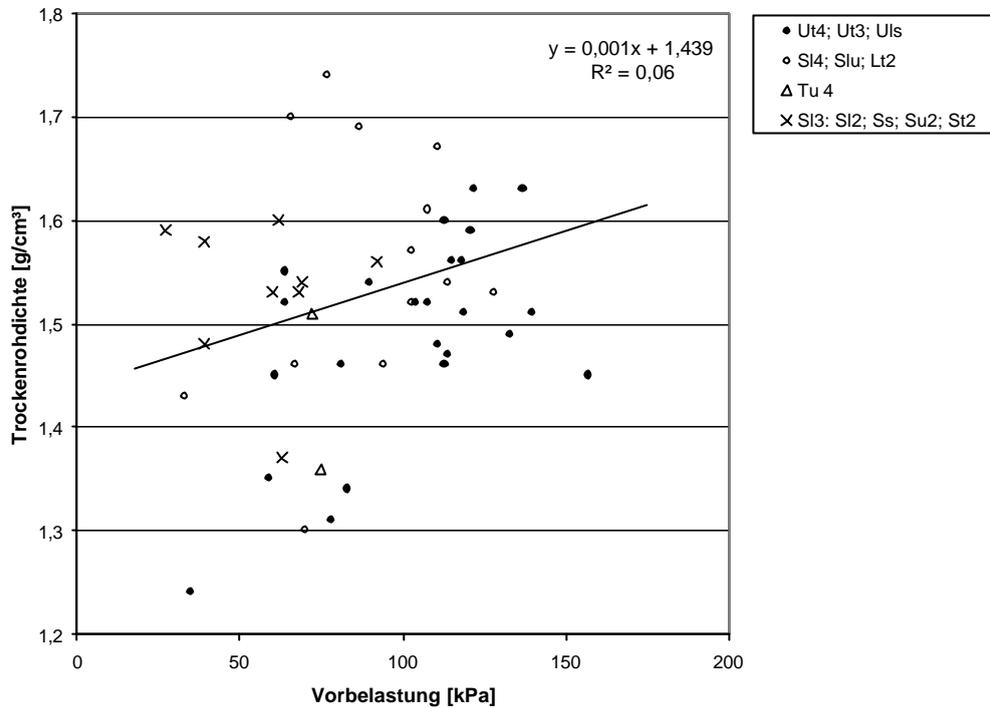


Abbildung 4.4.1-1: Vorbelastung (bei pF 1,8) der untersuchten Ackerböden (20 und 40 cm Tiefe) in Bezug zur Trockenrohdichte und Hauptbodenarten nach KA4

Betrachtet man die auf den verschiedenen Ackerböden gefundenen Werte der Vorbelastung und der Trockenrohdichte in Bezug zueinander, so ist kein eindeutiger Zusammenhang feststellbar (Abb. 4.4.1-1).

Dies bedeutet, dass allein aus der Trockenrohdichte die Vorbelastung nicht ableitbar ist.

Bei genauerer Betrachtung (Tab. 4.2-1 und 4.2-2) ist allerdings an den Standorten mit unterschiedlichen Bodenbearbeitungssystemen im Oberboden festzustellen, dass bei konservierender Bodenbearbeitung höhere Trockenrohdichten mit höheren Vorbelastungen einhergehen. Umgekehrt zeigten gepflügte Böden mit geringeren Trockenrohdichten vergleichsweise niedrigere Vorbelastungen. Eine direkte Ableitung der Vorbelastung durch den Wert der Dichte ist aber auch hier nicht möglich. Bemerkenswert ist, dass bei Direktsaat in Lüttwitz trotz vergleichsweise niedrigerer Trockenrohdichte eine höhere Vorbelastung als bei konservierender Bodenbearbeitung festgestellt wurde.

In den Unterböden gehen höhere Trockenrohdichten verschiedener Bodenbearbeitungsvarianten nicht bzw. nur selten mit höheren Vorbelastungen einher (Tab. 4.2-1 und 4.2-2). So hat z.B. der Unterboden der konservierend bearbeiteten Variante in Köllitsch R 2001 eine signifikant höhere Vorbelastung als die gepflügte Variante bei einer signifikant niedrigeren Trockenrohdichte als diese.

4.4.2 Vorbelastung und Luftkapazität

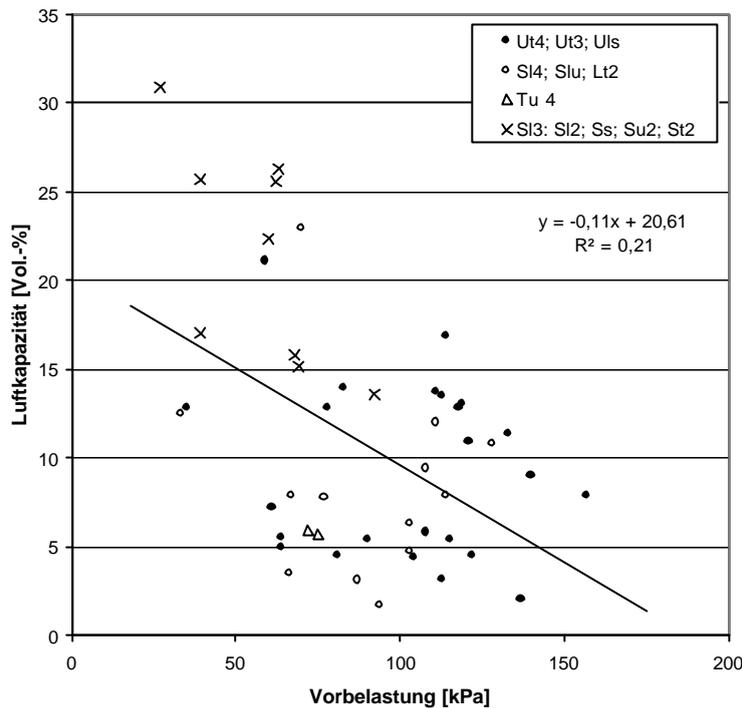


Abbildung 4.4.2-1: Vorbelastung (bei pF 1,8) der untersuchten Ackerböden (20 und 40 cm Tiefe) in Bezug zur Luftkapazität und Hauptbodenarten nach KA4

Stellt man die Vorbelastung und die Luftkapazität in Beziehung zueinander (Abb. 4.4.2-1), so ist für die einzelnen Bodenartenhauptgruppen eine gewisse Tendenz, bei starker Streuung der Werte, dahingehend festzustellen, dass mit zunehmender Vorbelastung die Luftkapazität abnimmt. Dies ist besonders ausgeprägt bei den sandigen Böden, die bei geringer Vorbelastung sehr hohe Luftkapazitäten aufweisen.

Bei den bindigen Böden nimmt die Luftkapazität mit steigender Vorbelastung hingegen tendenziell nur langsam ab. Die Luftkapazität liegt hier in der Nähe von Werten (Oberboden 8 Vol.-%, Unterboden 5 Vol.-%) bzw. unterschreitet diese, die nicht mehr als optimal angesehen werden (vgl. Kap. 4.2).

Insbesondere treten die geringen Luftkapazitäten bei einigen Lehm- und Schluffböden im Unterboden (z.B. Köllitsch R Pflugvariante 2001 und Lüttewitz „kons.“) oder in der nicht mehr gelockerten Unterkrume des konservierend bestellten Oberbodens (z.B. Methau und Littdorf) auf (siehe Kap. 4.2 und Tab. 4.2-1 und 4.2-2).

Einige dieser ungelockerten Schluff- und Lehmböden weisen wiederum eine hohe Luftkapazität und eine hohe Vorbelastung auf (z.B. Lüttewitz Direktsaatvariante 20 und 40 cm oder Köllitsch R Mulchvariante 40 cm). Eine hohe Vorbelastung steht daher nicht im Widerspruch zu einer günstigen Luftkapazität.

4.4.3 Vorbelastung und gesättigte Wasserleitfähigkeit

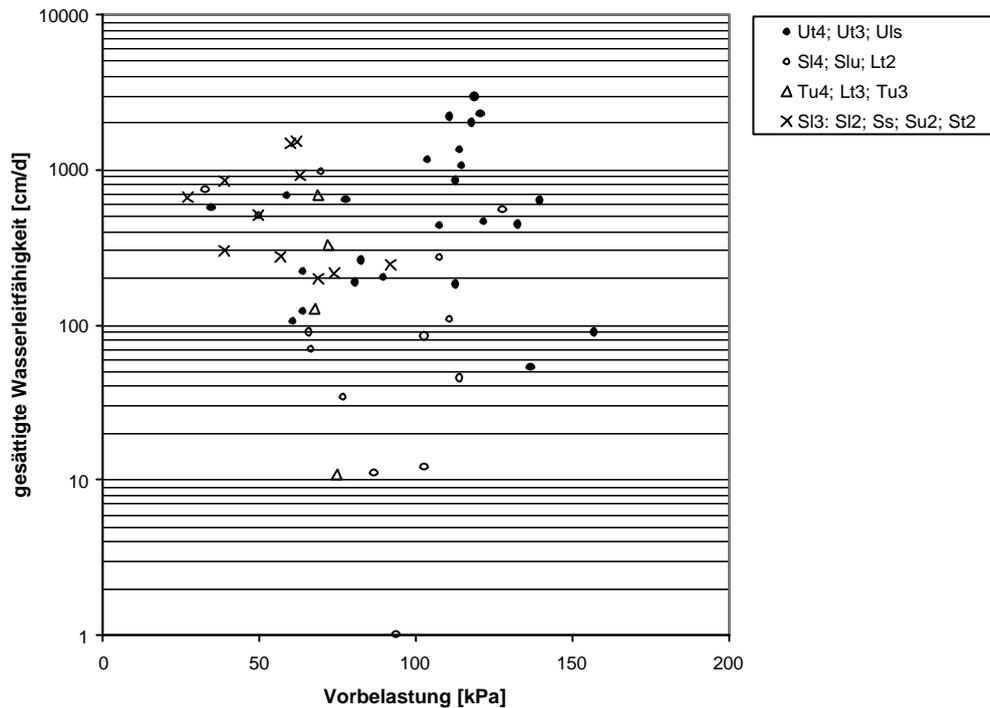


Abbildung 4.4.3-1: Vorbelastung (bei pF 1,8) der untersuchten Ackerböden (20 und 40 cm Tiefe) in Bezug zur gesättigten Wasserleitfähigkeit und Hauptbodenart nach KA4

Betrachtet man die gemessenen Vorbelastungen von Ackerflächen in Bezug zu deren gesättigten Wasserleitfähigkeiten (Abb. 4.4.3-1), so ist diesbezüglich kein Zusammenhang festzustellen. Insgesamt liegen die Wasserleitfähigkeiten in günstigen Bereichen. Eine geringe gesättigte Wasserleitfähigkeit unter $K_f < 10 \text{ cm/d}$ kommt nur bei einem Lehm Boden vor (Köllitsch L1, 40 cm, siehe Kap. 4.2 und Tab. 4.2-1 und 4.2-2). Er hat eine Vorbelastung von $P_v = 94 \text{ kPa}$. Knapp über $K_f = 10$ liegen ebenfalls zwei untersuchte Lehm Böden und ein Tonboden (in 20 cm Tiefe: Köllitsch R 2001 und Köllitsch L1 sowie in Wellaune in 40 cm), deren Vorbelastungen im Bereich $P_v = 75$ bis 103 kPa liegen.

4.4.4 Diskussion

ARVIDSSON & KELLER (2004), welche die Vorbelastungen zahlreicher Bodenproben mit deren Gesamtporenvolumina, Luftkapazitäten und Tongehalte verglichen, konnten keine bzw. nur sehr geringe Korrelationen zur Vorbelastung finden. Dies deckt sich mit den oben dargestellten Ergebnissen.

Bei der Gruppe der Sande lässt sich nach LEBERT & HORN (1992) die Vorbelastung anhand der Lagerungsdichte und des Totwasseranteils vorhersagen. Auf Grundlage der untersuchten Sandböden lässt sich dies nur bedingt nachvollziehen, z. B. ist am Standort Wildenhain die Vorbelastung im Oberboden trotz geringerer Dichte und ähnlichem Totwasseranteil höher bzw. gleich hoch wie am Standort Sprotta (gleiche Bodenart).

Bei strukturierten Böden ist nach LEBERT (1989) eine Beurteilung der Stabilität durch die Lagerungsdichte allein nicht möglich, da bei ungestörter Aggregatstruktur die Vorbelastung eine Funktion der Aggregation ist. Mit steigendem Aggregierungsgrad (Kohärent < Prismen < Polyeder < Subpolyeder) nimmt die Stabilität des Bodens durch Zunahme der Schwerwiderstände bei gleicher Lagerungsdichte zu. Bei Zerstörung der Aggregatstruktur z. B. durch Bodenbearbeitung, wird die aggregierungsbedingte Stabilität herabgesetzt und die Tragfähigkeit kann nur durch eine Erhöhung der Dichtlagerung aufrechterhalten werden. Demnach lässt sich die beobachtete höhere Vorbelastung konservierend bestellter Oberböden im Vergleich zu den gepflügten durch die höhere Dichtlagerung erklären. In den nicht mehr oder kaum bearbeiteten Unterkrumen (hier 20 cm Tiefe) der konservierend bestellten Böden muss zudem von einer, im Vergleich zu gepflügten Böden, stärkeren Aggregation des Bodens ausgegangen werden.

Im Unterboden von Lüttewitz ist eine Zunahme der Vorbelastung mit steigendem Aggregierungsgrad (Tab. 3.5) zu beobachten. Die Pflug- und Direktsaatvariante mit Polyedergefüge haben tendenziell höhere Vorbelastungen bei niedrigeren Trockenrohdichten als die konservierend bestellten Varianten mit Platten- und Kohärentgefüge. Bei LEBERT (1989) zeigten plattig strukturierte Böden nur bei hoher Lagerungsdichte hohe Vorbelastungswerte. Sie sind im Vergleich zu polyedrisch strukturierten Böden weniger stabil.

In Kölltisch R sind dagegen beide Unterböden (Pflug- und Mulchvariante) polyedrisch strukturiert und bei weit höherer Dichte des Pflugunterbodens, ist dieser dennoch signifikant weniger stabil. Der Vergleich der jeweiligen Scherfestigkeit (Tab. 4.3.2-1), der Tongehalte und Humusgehalte (Tab. 3.2.1-2) ergibt keine bedeutenden Unterschiede zwischen den Varianten. Der Kohäsionswert und der Humusgehalt sind beim gepflügten Boden etwas höher, was den Umstand aber eher noch widersprüchlicher macht. Deutliche Unterschiede sind in der Porengrößenverteilung zu beobachten. So hat der weniger stabile Pflugunterboden einen signifikant höheren Totwasseranteil und eine signifikant niedrigere nutzbare Feld- und Luftkapazität. Nach HORN & FLEIGE (2003) ist mit steigender Aggregation die Vorbelastung vor allem durch die die Schwerwiderstandsparameter Kohäsion und Winkel der Inneren Reibung bestimmt. In stärker aggregierten Böden nimmt zusätzlich der Einfluss der nutzbaren Feldkapazität und Luftkapazität zu.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass anhand der Feldmessungen kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Vorbelastung und Trockenrohdichte zu erkennen ist.

Bezüglich der Funktionalität der Böden (Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit) zeigt sich bodenartbedingt nur die Tendenz, dass mit zunehmender Vorbelastung die Luftkapazität abnimmt.

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit hingegen steht in keinem eindeutigen Zusammenhang zur Vorbelastung.

Die Luftkapazitäten, insbesondere bei bindigen Böden, liegen häufig im Bereich zwischen 5 Vol.-% – 10 Vol.-% und darunter. Hingegen sind die gesättigten Wasserleitfähigkeiten überwiegend optimal.

Zusammenhänge zwischen Vorbelastung und Aggregierung sind vor allem bei den Schluffböden erkennbar. Stabilitätsmindernde oder –fördernde Struktureigenschaften innerhalb einer Bodenart lassen sich anhand der dargestellten Ergebnisse nur ansatzweise ableiten. Da die Luftkapazitäten vor allem bei strukturschwachen Schluffböden (plattiges oder kohärentes Gefüge) im Unterboden sehr gering sind und mit steigenden Vorbelastungen tendenziell noch weiter abnehmen, sollte die Vorbelastung bei Belastung möglichst nicht überschritten werden, um die Luftkapazität des Bodens zu halten. Stärker strukturierte Schluffböden (polyedrisches Gefüge) haben tendenziell höhere Luftkapazitäten und höhere Vorbelastungen. Sie sind daher auch belastbarer.

Bei Lehm Böden mit geringen Luftkapazitäten ist zu beachten, dass sie im Vergleich zu den Schluffböden noch weniger belastbar sind, da sie im Mittel geringere Vorbelastungen als diese haben.

Insgesamt steht den Vorbelastungswerten (Tab. 4.3.1-1) ein Funktionalitätsstatus des Bodens gegenüber, welcher als pflanzenbaulich nicht nachteilig einzustufen ist. Weil sich andererseits die Luftkapazität aber auch nicht verschlechtern sollte, dürfen die weiteren Bodenbelastungen die bestehenden Vorbelastungen möglichst nicht übersteigen. Somit geben die gefundenen Vorbelastungswerte eine hinreichende Orientierung zur Belastbarkeit sächsischer Ackerböden. Die weite Streuung der Werte weist aber auch darauf hin, dass die Einschätzung der Belastbarkeit der Böden umso genauer wird, je standortbezogener sie ist.

4.5 Vertikale Bodendrücke bei dynamischer Belastung

4.5.1 Überblick

Die Bodendruckmessungen erfolgten in repräsentativen sächsischen Landwirtschaftsbetrieben, deren Flächenausstattung überwiegend im Bereich von 1.000 ha bis 3.000 ha lag.

Für die Bewertung der Druckbelastungen in feuchten Böden bis einschließlich pF 2,5 wurden 33 Konstellationen von Maschinen / Gespannen (alle Achsen der 1. Überfahrgang) und Standorten bzw. Standortbedingungen herangezogen (Tab. 7-1 Anhang). Ein Schwerpunkt lag hierbei auf den L- und D-Standorten. Bezüglich der Produktionsrichtung waren sowohl reine Marktfruchtbetriebe (Kyhna mit Threna, Glesien, Lüttewitz, Zschortau, Littdorf, Oberwinkel) als auch Gemischtbetriebe (Methau, Frohburg, Sprotta, Großstolpen, Wildenhain) vertreten. Für die Bodendruckmessungen wurden Maschinen herangezogen, welche für Betriebe dieser Größenordnungen repräsentativ sind. Sie erfolgten zu den betriebsüblichen Einsatzzeiten und Bodenfeuchten (schwerpunktmäßig pF 2 – 3). Somit stand ein breites Spektrum an Maschinenparametern und Bodenbedingungen für die Messungen zur Verfügung.

Bezüglich der Radlasten lag der Schwerpunkt der Messungen bei Maschinen im Bereich von 1.500 kg bis 5.000 kg. Einige Maschinen erreichten Fahrwerkslasten von 6.000 kg bis über 12.000 kg.

Die Messungen erfolgten mit der betriebsüblichen Reifen-/Fahrwerksausstattung. Das Spektrum umfasste daher fast alle heute üblichen Reifen- (Pflege- bis Terrareifen) und Fahrwerksformen (Gleisbänder, Zwillinge). Dabei ist festzustellen, dass im Radlastbereich 2.000 kg – 6.000 kg die Ausstattung mit Breitreifen überwog, während ab 6.000 kg Rad-/Fahrwerkslast die Ausstattung mit Terrareifen und Gleisbändern dominierte (Abb. 4.5.1-1). Dies bedingte, dass die berechneten Kontaktflächen schwerpunktmäßig im Bereich zwischen ca. 1.000 cm² und 5.000 cm² lagen (Abb. 4.5.1-1). Der Bereich 5.000 cm² - 6.000 cm² stellt bezüglich der praxisüblichen Reifenausstattung somit eine Obergrenze dar. Lediglich die Gleisbänder erreichten deutlich höhere Werte von 13.000 cm² bis 21.000 cm².

Die Messungen wurden im laufenden Betrieb mit den betriebsüblichen Reifeninnendrücken durchgeführt, ohne dass vorher gemäß der Reifentabellen eine Anpassung an die Feldbedingungen erfolgte. Somit lagen die Reifendrücke überwiegend zwischen 1,0 bar und 3,0 bar.

In vielen dieser Betriebe werden ausgewählte Flächen oder auch die gesamte Ackerfläche langjährig konservierend (inkl. Direktsaat) bestellt. Weil unterschiedliche Bodenbearbeitungssysteme zu unterschiedlichen Bodenstabilitäten führen können (WIERMANN, 1998; HORN & ROSTEK 2000) und dies Einfluss auf die Bodendruckausbreitung nehmen kann, erfolgten die Messungen der Ma-

schinen, sofern möglich, jeweils auf einer gepflügten und auf einer konservierend bestellten Vergleichsfläche.

Wie in Kapitel 4.3 dargestellt, liegt die Tragfähigkeit sächsischer Böden bei Feldkapazität etwa bei 100 kPa mit Abweichungen von rund 50 kPa nach unten und oben. Im Folgenden wird daher eine Vorbelastung von 100 kPa als Orientierung zur Einordnung der Ergebnisse der Bodendruckmessungen herangezogen.

Radlast und Bodendruck

Betrachtet man die Bodendruckwirkungen der untersuchten Maschinen bei der ersten Überfahrt (Abb. 4.5.1-1), so wird deutlich, dass in beiden Bodentiefen die Bodendrucke in Abhängigkeit von der Radlast insgesamt, sowie im jeweiligen Kontaktflächenbereich, deutlich ansteigen, wobei sie aber insbesondere im Oberboden stark streuen. Im Unterboden (40 cm) wird diese Streuung vor allem im Radlastbereich bis 5.000 kg deutlich geringer und der Zusammenhang zwischen Radlast und Bodendruck enger. Ferner ist zu bemerken, dass die Zusammenhänge zwischen Radlast und Bodendruck deutlich größer sind, wenn die Gleisbänder außer Acht gelassen werden.

Im Oberboden (20 cm Tiefe) besteht bis 5.000 kg Belastung andeutungsweise ein Trend dahingehend, dass mit steigenden Radlasten die Bodendrucke ansteigen. Allerdings ist festzustellen, dass hier jeweils bei Lasten bis ca. 3.000 kg die Bodendrucke von 100 kPa bis 350 kPa sehr stark streuen können. Ab ca. 3.000 kg liegen die Bodendrucke überwiegend höher als 100 kPa. Im hohen Lastbereich (Rad und Gleisband) von 6.000 kg – 12.000 kg ist zu beobachten, dass mit zunehmender Last die Bodendrucke bei zum Teil starker Streuung, ausgehend von ca. 350 kPa, in den Bereich von 50 – 150 kPa absinken.

Im Unterboden (40 cm Tiefe) nimmt die Streuung der Bodendruckwerte im Lastbereich bis 5.000 kg deutlich ab. Der Zusammenhang von steigender Radlast und steigendem Bodendruck tritt hier zudem deutlicher hervor. Das Niveau der Bodendrucke nimmt in diesem Lastbereich deutlich ab. Im Bereich bis ca. 3.000 kg Radlast überwiegen Bodendrucke unterhalb von 100 kPa. Von 3.000 kg bis 5.000 kg Radlast dominieren hingegen Drücke im Bereich 100 – 250 kPa, wobei aber eine beträchtliche Zahl von Werten unter 100 kPa liegt. Ab 6.000 kg sind unterschiedliche Tendenzen festzustellen.

Einige der schon im Oberboden festgestellten hohen Drücke der Reifenfahrwerke ab 6.000 kg bleiben fast in gleicher Höhe erhalten. Die Bodendrucke unter den Gleisbändern sinken hingegen bei diesen hohen Fahrwerkslasten unter 100 kPa.

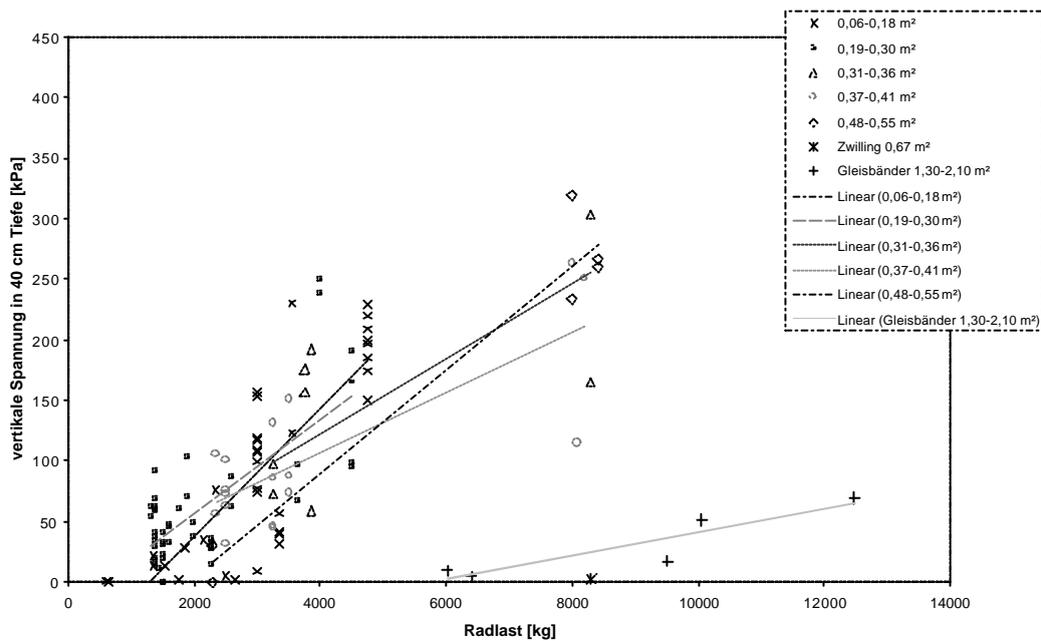
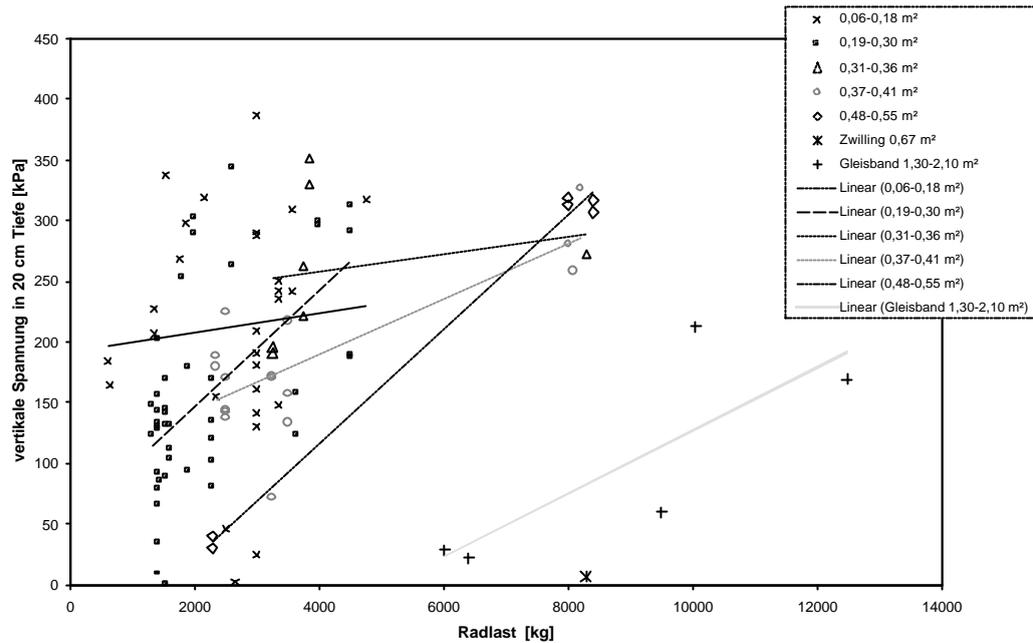


Abbildung 4.5.1-1: Zusammenhang zwischen der Rad/ Fahrwerkslast (alle Achsen, 1. Überfahrt) und der vertikalen Bodenspannung in 20 und 40 cm Bodentiefe (Mittelwerte $n = 3$; DMS-Sensor) mit Kennzeichnung der berechneten Aufstandsflächen; Bodenwasserspannung $pF = 2,5$; gepflügte und konservierend bestellte 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

Bezüglich der Aufstandsflächen ist festzustellen, dass die Reifen mit 0,06 – 0,18 m² sowie 0,19 – 0,30 m² für ein sehr heterogenes Reifensortiment (Stützräder, Anhängerreifen etc.) stehen. Daher streut der Bodendruck hier insbesondere im Oberboden stark. Im Lastbereich unter 3.000 kg ist zudem zu erkennen, dass die Bodendrücke hier häufig unter 100 kPa absinken. Kleine Aufstandsflächen führen hier zu einem schnellen Druckabbau bis in den Unterboden.

Die Breitreifen, die im Lastbereich ab ca. 3.000 kg zum Einsatz kamen, zeigen im Oberboden meist Bodendrücke deutlich über 100 kPa. Obwohl hier annähernd die Relation 1 kg Last zu 1 cm² Aufstandsfläche häufig zu finden ist, liegen die Bodendrücke deutlich über 100 kPa. Dies ist u. a. durch dynamische (z.B. Reifenverformung), reifen- sowie bodenspezifische (z.B. Stollen, Flankensteifigkeit, Bodenfestigkeit) Effekte zu erklären, die innerhalb der Aufstandsfläche zu unterschiedlichen Drücken führen bzw. die zu kleineren als den berechneten Aufstandsflächen führen. Auf Grund der größeren Aufstandsfläche und größeren Radlasten bauen sich hier die Bodendrücke bis in 40 cm Tiefe oft langsamer ab und liegen somit häufiger noch deutlich über 100 kPa.

Hiervon deutlich abgesetzt sind die Gleisbänder und Zwillinge zu sehen. Auch hier steigt zwar der Bodendruck mit zunehmender Fahrwerkslast (beginnend bei 6.000 kg) an. Allerdings liegen hier die Bodendrücke im Ober- und Unterboden insgesamt auf einem deutlich niedrigeren Niveau.

Zieht man die einzelnen Kategorien der Aufstandsflächen mit in die Betrachtung ein, so ist zu erkennen, dass die jeweiligen Aufstandsflächen durchaus mit sehr deutlich unterschiedlichen Radlasten, häufig im Verhältnis zur Fläche höheren Lasten, beaufschlagt werden. So können sich bei gleicher Aufstandsfläche die Lasten verdoppeln bis vervierfachen. Parallel dazu sind sowohl im Ober- wie im Unterboden steigende Bodendrücke festzustellen.

Betrachtet man die Reifen-/Fahrwerksart in Bezug zum Bodendruck in 20 cm und 40 cm Tiefe bei unterschiedlichen Radlasten, so zeigt sich, dass unabhängig von den Reifentypen/-arten ein Trend zu steigenden Bodendrücken bei steigenden Radlasten besteht. Dabei streuen die Bodendrücke hinsichtlich der Reifentypen bei gleicher Radlast stark.

Gleisbänder vermögen hingegen bereits in 20 cm Bodentiefe Lasten so gut abzustützen, so dass die Bodendrücke überwiegend unter 100 kPa liegen. Terrareifen zeigten hier ein differenzierteres Verhalten.

Abgesehen von Gleisbandfahrwerken, wurden ab ca. 4.000 kg Bodendrücke von 100 kPa meist überschritten, während bei hohen Lasten von rund 8.000 kg etwas über 300 kPa erreicht wurden.

Reifeninnendruck und Bodendruck

Die Reifeninnendrucke der untersuchten Fahrwerke lagen schwerpunktmäßig zwischen 0,8 bar und 3 bar (Abb. 4.5.1-2.). Mit höheren Innendrücker wurden vor allem Anhänger gefahren.

Die Bodendrucke sowohl im Ober- als auch im Unterboden streuen in Abhängigkeit vom jeweiligen Reifeninnendruck stark.

Im Oberboden besteht ein relativ deutlicher Trend dahingehend, dass der Bodendruck mit Zunahme des Reifeninnendrucks ansteigt. Unabhängig vom Reifeninnendruck liegen allerdings ca. 2/3 der Bodendruckwerte über 100 kPa und erreichen bis zu 400 kPa.

Im Unterboden sind die Bodendruckwerte im Durchschnitt deutlich niedriger, so dass mehr als die Hälfte der Werte unter 100 kPa betragen. Ein Trend zur Zunahme des Bodendrucks bei Zunahme des Reifeninnendrucks ist vor allem bei großen Aufstandsflächen zu erkennen, während bei schmalen Reifen diesbezüglich kaum ein Trend zu beobachten ist.

Insgesamt wurden bei Reifen mit relativ kleinen Aufstandsflächen überwiegend Bodendrucke unter 100 kPa im Unterboden gemessen. Gleichzeitig ist auch festzustellen, dass bei breiteren Reifen, die mit Innendrücker unter 100 kPa gefahren werden, die Bodendrucke im Ober- wie im Unterboden kleiner als 100 kPa sind. Der Druckabbau in die Tiefe erfolgt allerdings relativ langsam.

Im Bereich über 100 kPa Bodendruck im Unterboden sind noch sehr viele Breit- und Terrareifen mit einem breiten Spektrum an Reifeninnendrücker zu finden. Der Druckabbau mit der Bodentiefe war bei diesen Reifentypen somit in vielen Fällen deutlich geringer.

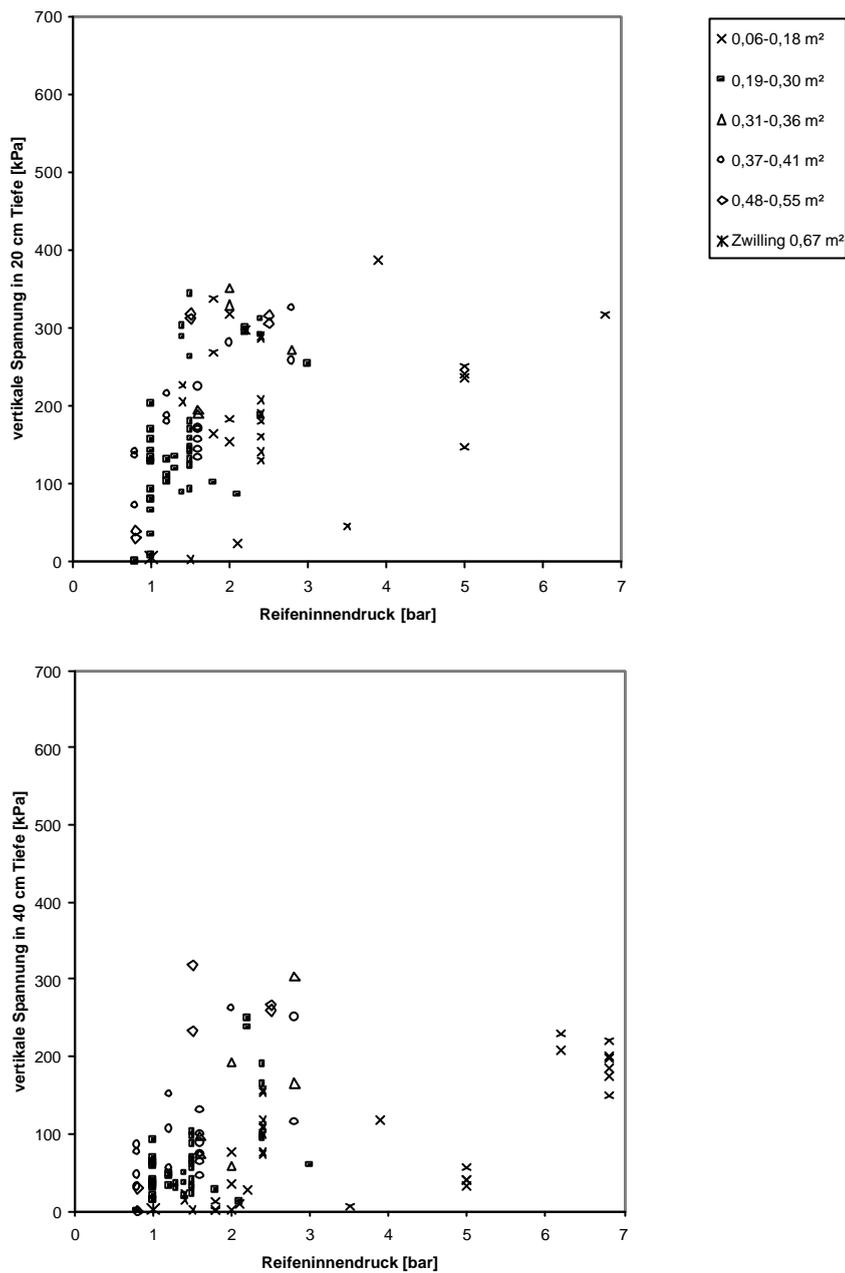


Abbildung 4.5.1-2: Zusammenhang zwischen dem Reifennendruck der verschiedenen Reifentypen (eingeteilt nach berechneter Aufstandsfläche) und dem vertikalen Bodendruck in 20 und 40 cm Bodentiefe (Mittelwerte $n = 3$; DMS-Sensor) bei der ersten Überfahung (alle Achsen) ; Bodenwasserspannung $p_f = 2,5$; 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

Berechneter Kontaktflächendruck und Bodendruck

Abbildung 4.5.1-3 zeigt, dass etwa die Hälfte der untersuchten Fahrwerke, welche als repräsentativ für heutige Landwirtschaftsmaschinen angesehen werden können, mit berechneten Kontaktflächendrücken zwischen 50 bis 100 kPa zum Einsatz kamen. Gleichzeitig lagen die gemessenen Bodendrücke sowohl im Ober- wie im Unterboden oft im Bereich von 100 kPa bis 350 kPa.

Insgesamt zeigen die Bodendrücke sowohl im Ober- als auch im Unterboden eine deutliche Zunahme mit Anstieg des Kontaktflächendrucks. Dabei ist diese Tendenz im Oberboden stärker ausgeprägt. In beiden Tiefen streuen die Bodendrücke in Anhängigkeit vom Kontaktflächendruck stark, wobei allerdings im Unterboden die Streuung der Bodendrücke bei Kontaktflächendrücken unter 100 kPa deutlich abnimmt.

Die Bodendruckwerte im Oberboden liegen unabhängig vom berechneten Kontaktflächendruck überwiegend über 100 kPa, während sie im Unterboden in mehr als 2/3 der Fälle unter 100 kPa liegen.

Bei den Rädern mit breiten Aufstandsflächen (0,30 m² bis 0,55 m²) ist festzustellen, dass die berechneten Kontaktflächendrücke von mehr als 100 kPa im Unterboden noch Drücke von über 100 kPa hervorrufen, weil die Drücke nur sehr langsam mit der Tiefe abnehmen. Jede Zunahme des Kontaktflächendrucks oberhalb von 100 kPa führt zu einem Anstieg des Bodendrucks im Unterboden. Hier sind die Aufstandsflächen zwar relativ groß, bei relativ hohen Lasten sind sie aber auch die Ursache dafür, dass sich die Bodendrücke zur Tiefe hin nur langsam reduzieren.

Auffallend ist insbesondere der Befund, dass in 20 cm Tiefe überwiegend, aber z.T. auch in 40 cm Tiefe, Bodendrücke auftreten, welche die berechneten Kontaktflächendrücke übersteigen, die Berechnung somit zu einer Unterschätzung führt. In situ weicht die rein statische Druckberechnung erwartungsgemäß von den gemessenen Werten ab, da unter dynamischen Verhältnissen die Druckverteilung in der Aufstandsfläche und die Größe der Aufstandsfläche an sich, u.a. bedingt durch Reifenverformung, Reifen-/Fahrwerkseigenschaften, Bodenverhältnisse etc., nicht den vereinfachten Annahmen der Berechnung entspricht.

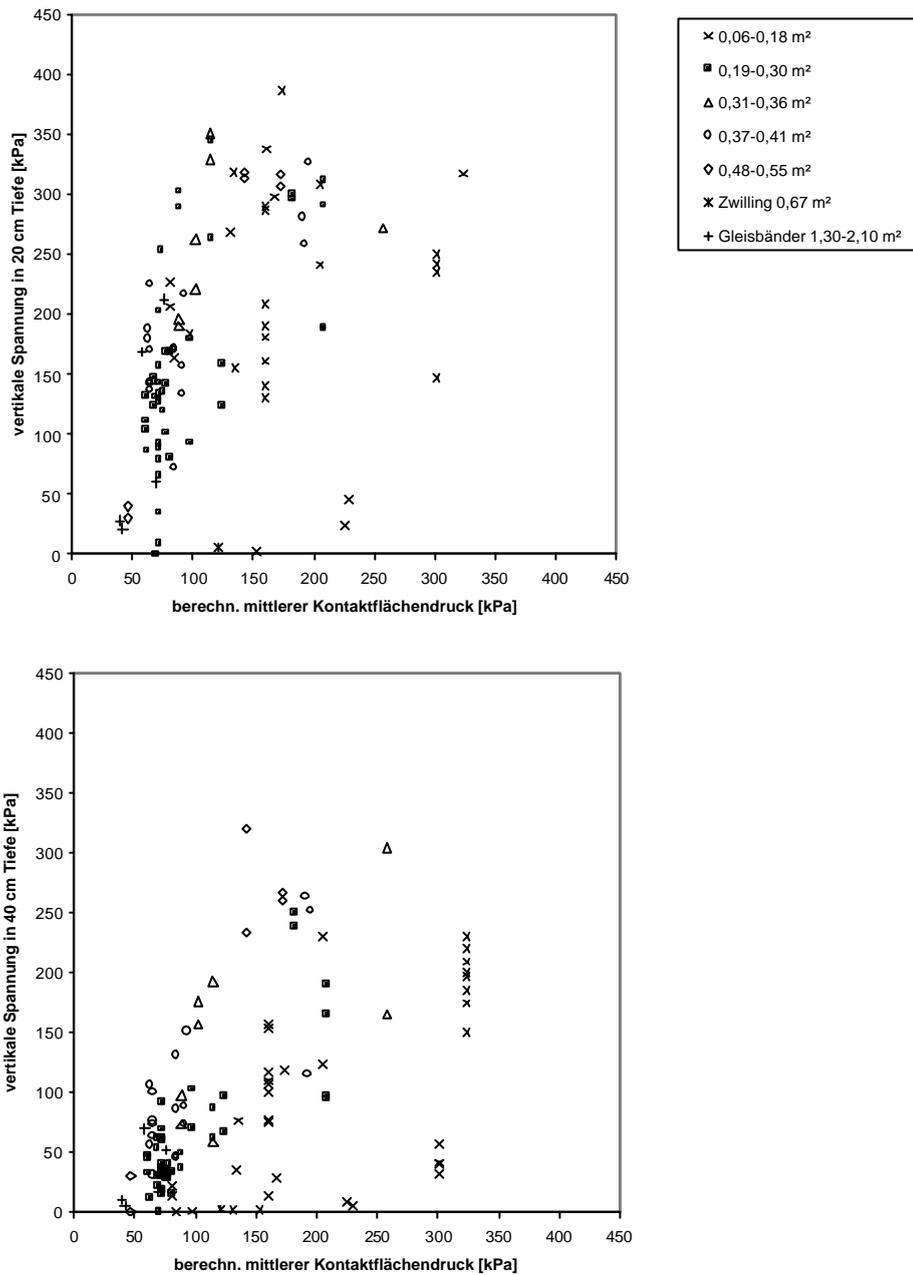


Abbildung 4.5.1-3: Zusammenhang zwischen dem berechneten Kontaktflächendruck der verschiedenen Reifentypen (eingeteilt nach berechneter Aufstandsfläche) und dem Bodendruck in 20 und 40 cm Bodentiefe (Mittelwerte $n = 3$; DMS-Sensor) bei der ersten Überführung (alle Achsen); Bodenwasserspannung $p_f = 2,5$; 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

4.5.2 Maschinengruppen

Da die überwiegende Zahl der Vorbelastungswerte der untersuchten sächsischen Ackerböden, insbesondere auf den bindigen Böden, in den Pv-Klassen 3 (60 – 90 kPa) und 4 (90 – 120 kPa) liegt, wird zur Vereinfachung der Beurteilung der nachfolgend dargestellten Bodendrücke der Wert 100 kPa als Orientierungswert herangezogen, um die Bodendrücke der Landmaschinen besser einordnen zu können. Gleichwohl sind aber immer die oben genannten Spannen mit im Auge zu behalten, weil die Bestimmung der Vorbelastung gewisse Unsicherheiten beinhaltet, so dass es besser ist mit Bereichen als mit exakten Werten zu arbeiten (KELLER, 2004).

Auf die genauen Maschinendaten, Standortangaben und Befahrungszeitpunkte wird in den folgenden Kapiteln nicht näher eingegangen. Sie sind dem Anhang Tab. 7-1 zu entnehmen.

4.5.2.1 **Grundbodenbearbeitung**

Die Grundbodenbearbeitung mit Geräten für flächenstarke Betriebe mit großen Arbeitsbreiten führte in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung (wendend oder lockernd) zu unterschiedlichen Bodendrücken (Abb. 4.5.2.1-1).

Beim Onland-Pflügen (12-Schar, 25 cm Tiefe) mit einem Raupenschlepper bei geringer Bodenfeuchte konnte in 40 cm Bodentiefe unter keinem der Fahrwerke ein wesentlicher Bodendruck gemessen werden. Am gleichen Standort bei gleicher Bodenfeuchte verursachte auch das konventionelle Pflügen (1 Rad i.d. Furche, 5-Schar, 25 cm Tiefe) nur einen geringen Bodendruck unter dem hinteren Furchenrad in 40 cm (effektiv 15 cm Tiefe) Bodentiefe.

Das Grubbern (Arbeitsbreiten 7,8 m – 10 m, Arbeitstiefe 10 cm – 15 cm) in Verbindung mit bodenschonenden Fahrwerken (Gleisband: Challenger, Quad Trac; Schlepper: Zwillingsbereifung) verursachte nur geringe Bodendrücke im Unterboden. In dieser Tiefe wurde die höchste Belastung durch das Stützrad des Schwergrubbers am Challenger verursacht. In 20 cm Bodentiefe traten hingegen unter dem Challenger-Fahrwerk sowie unter dem MF-Schlepper mit Zwillingsbereifung deutlich erhöhte Bodendrücke (125 kPa bzw. 169 kPa) auf. Den höchsten Bodendruck verursachte auch hier das Stützrad des Schwergrubbers an der Challenger-Raupe.

Bei der Grundbodenbearbeitung mit den Schwergrubbern wurde zudem geprüft, wie sich eine 2. Überfahrt nach der Lockerung auswirkt. Dabei zeigte sich (Anhang Tab. 7-1), dass eine vorherige Lockerung des Bodens zu einer deutlichen Absenkung der Bodendrücke führte.

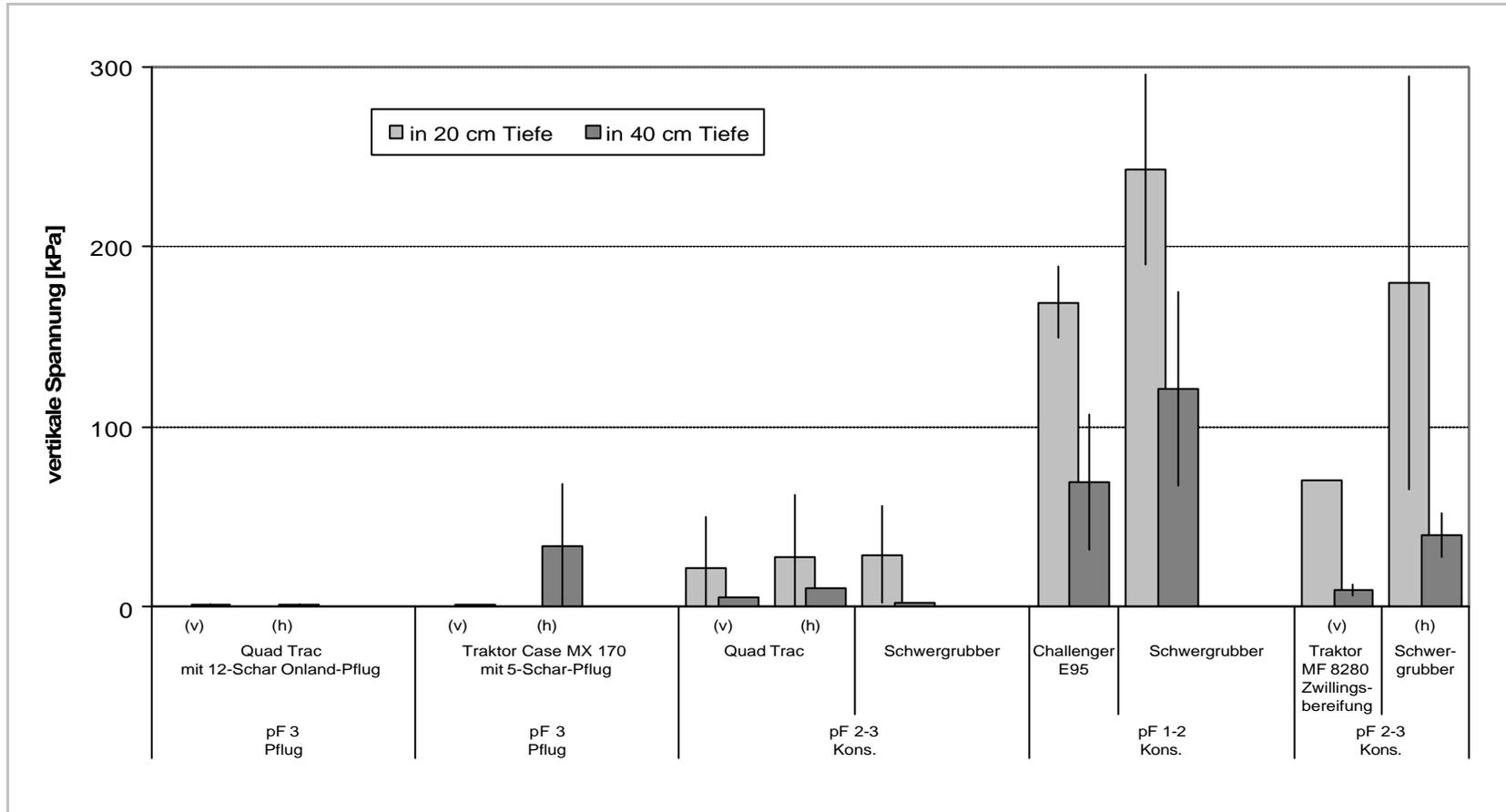


Abbildung 4.5.2.1-1: Vertikale Spannung (DMS-Sensor; n = 3) bei der Grundbodenbearbeitung in 20 cm und 40 cm Bodentiefe bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (kons. = konservierend, Pflug) und Bodenwasserspannung (pF-Wert); (v): Vorder- (h): Hinterrad.

4.5.2.2 Düngung und Pflanzenschutz

Düngung

Die Ausbringung von Mineraldünger und Gülle führte zu Bodendrücken, die im Oberboden meist deutlich über 100 kPa lagen (Abb. 4.5.2.2-1). Lediglich die Zugmaschinen heben sich hier etwas ab und verursachen teilweise Bodendrücke von unter 100 kPa. Dies war insbesondere dann der Fall, wenn, jeweils am gleichen Standort, mit abgesenktem Reifeninnendruck (1,6 bar auf 0,8 bar) gefahren wurde (J.D. 4755 u. HTS-Güllewagen). In diesem Fall wird zudem auf der konservierend bestellten Fläche deutlich, dass auf einem Schlag bei gleicher Belastung (HTS-Güllewagen) die Bodendruckentwicklung durchaus deutlich verschieden sein kann, da als durchschnittliche Belastung sowohl ca. 150 kPa als auch fast 300 kPa gemessen werden konnten. Bei den Bodendruckmessungen zu den Güllewagen deutet sich beim HTS-Güllewagen (Pflug) sowie beim Fuchs-Güllewagen, insbesondere im Unterboden, ein Überrollungseffekt an, da unter der 2. Achse höhere Drücke gemessen wurden.

Bezüglich der Schlepper ist festzustellen, dass die deutliche Radlaststeigerung auf den Hinterrädern durch den angebauten Düngerstreuer (J.D. 7710: 3.850 kg) im Vergleich zu den beiden anderen Schleppern (J.D. 4755: 3.250 kg, F. 824: 3.500 kg) zu erkennbar höheren Drücken (Oberboden: ca. 350 kPa, Unterboden: ca. 200 kPa) führte. Dynamische Effekte (Geschwindigkeit, Schwingungen) in Verbindung mit einer schmalen Bereifung haben wahrscheinlich zu diesem Ergebnis mit beigetragen.

Im Unterboden verursachten die Räder mit hoher Radlast (Mineraldüngung: 3.850 kg, Güllewagen Fuchs: 4.000 kg, Terragator: 8.400 kg) noch Bodendrücke im Bereich von 200 – 280 kPa, da der Druckabbau mit zunehmender Tiefe gering war. Der Güllewagen HTS lag hier mit 3.000 kg Radlast im Bereich von 80 – 160 kPa und erreichte damit die niedrigsten Bodendrücke im Unterboden.

Das Gespann mit dem Güllewagen HTS 102.27 (Radlast: 3.000 kg) verursacht insgesamt, abgesehen von den Vorderrädern, die niedrigsten Bodendrücke bei der Gülleausbringung. Der Güllewagen Fuchs verursachte mit 4.000 kg Radlast etwa gleich hohe Bodendrücke in der jeweiligen Bodentiefe wie der Selbstfahrer mit aufgesatteltem Güllebehälter mit 8.000 kg Radlast. Die Werte lagen bei ca. 300 kPa für den Oberboden und ca. 250 kPa für den Unterboden. Der Druckabbau mit zunehmender Tiefe erfolgte hier sehr langsam. Ähnliches kann für den HTS-Güllewagen festgestellt werden, allerdings ausgehend von einem deutlich niedrigeren Niveau.

Pflanzenschutz

Aus Abb. 4.5.2.2-2 wird ersichtlich, dass die untersuchten Pflanzenschutzmaschinen überwiegend zu hohen Bodendrücken im Oberboden führen, die oft im Bereich von 200 kPa – 300 kPa liegen bzw. nahe an diesen Bereich heran reichen. Hierbei verursachen die Reifen der aufgesattelten Feldspritzen oft mindestens ebenso hohe, z.T. sogar höhere Bodendrücke als die Hinterräder der Traktoren.

Im Gegensatz zum Oberboden ist fast durchgehend ein deutlicher Druckabbau bis in 40 cm Bodentiefe festzustellen, so dass die Bodendruckwerte meist unter 100 kPa liegen. Dies ist im Zusammenhang mit der schmalen Bereifung zu sehen. Im Oberboden weisen die Druckwerte z.T. eine starke Streuung auf.

Bei der selbstfahrenden Pflanzenschutzspritze zeigt sich, dass die im Vergleich zu den „Pflanzenschutz-Gespannen“ relativ hohen Radlasten von 3.250 kg bzw. 3.750 kg auf Grund der breiteren Bereifung verhältnismäßig geringe Bodendrücke im Oberboden verursachen. Gleichzeitig wird aber auch deutlich, insbesondere an der Hinterachse, dass bei breiten Reifen und hoher Radlast der Druckabbau in tieferen Bodenschichten langsamer erfolgt.

Bezüglich der Bodenbearbeitung ist festzustellen, dass auf zwei Standorten (Spritze Amazone und Spritze Matrot) auf den gepflügten Varianten tendenziell niedrigere Bodendrücke in 20 und 40 cm Tiefe gemessen wurden als auf den konservierend bearbeiteten. Am Standort, auf dem die John Deere Pflanzenschutzspritze eingesetzt wurde, war die Situation umgekehrt.

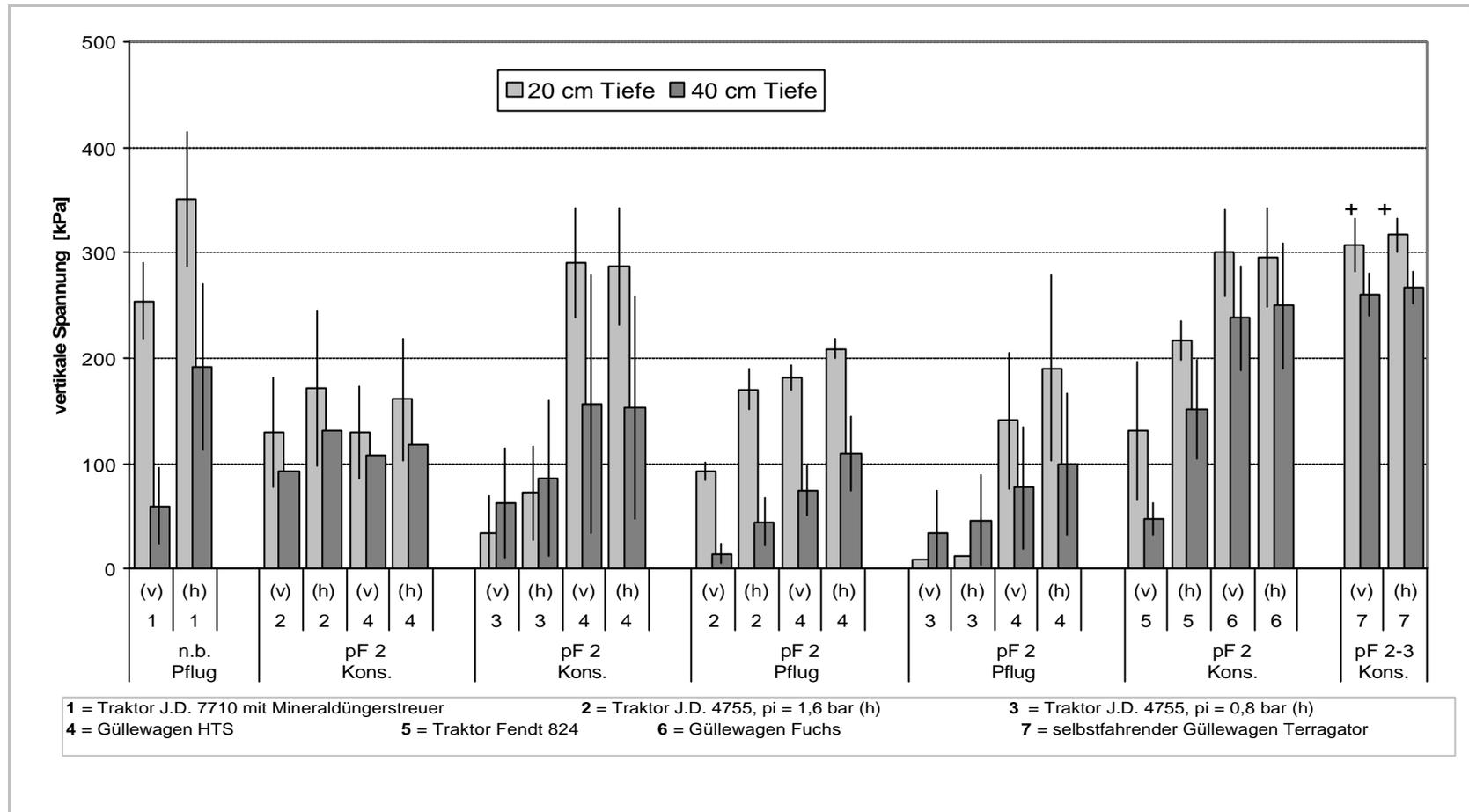


Abbildung 4.5.2.2-1: Vertikale Spannung (DMS-Sensor; n = 3) in 20 cm und 40 cm Bodentiefe unter Landmaschinen beim Minderdünger streuen sowie bei der Gülleausbringung bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (kons. = konservierend, Pflug) und unterschiedlichen Bodenwasserspannungen (pF-Wert); (v): Vorder- (h): Hinterrad, +: Überschreitung des Messbereichsdüngung

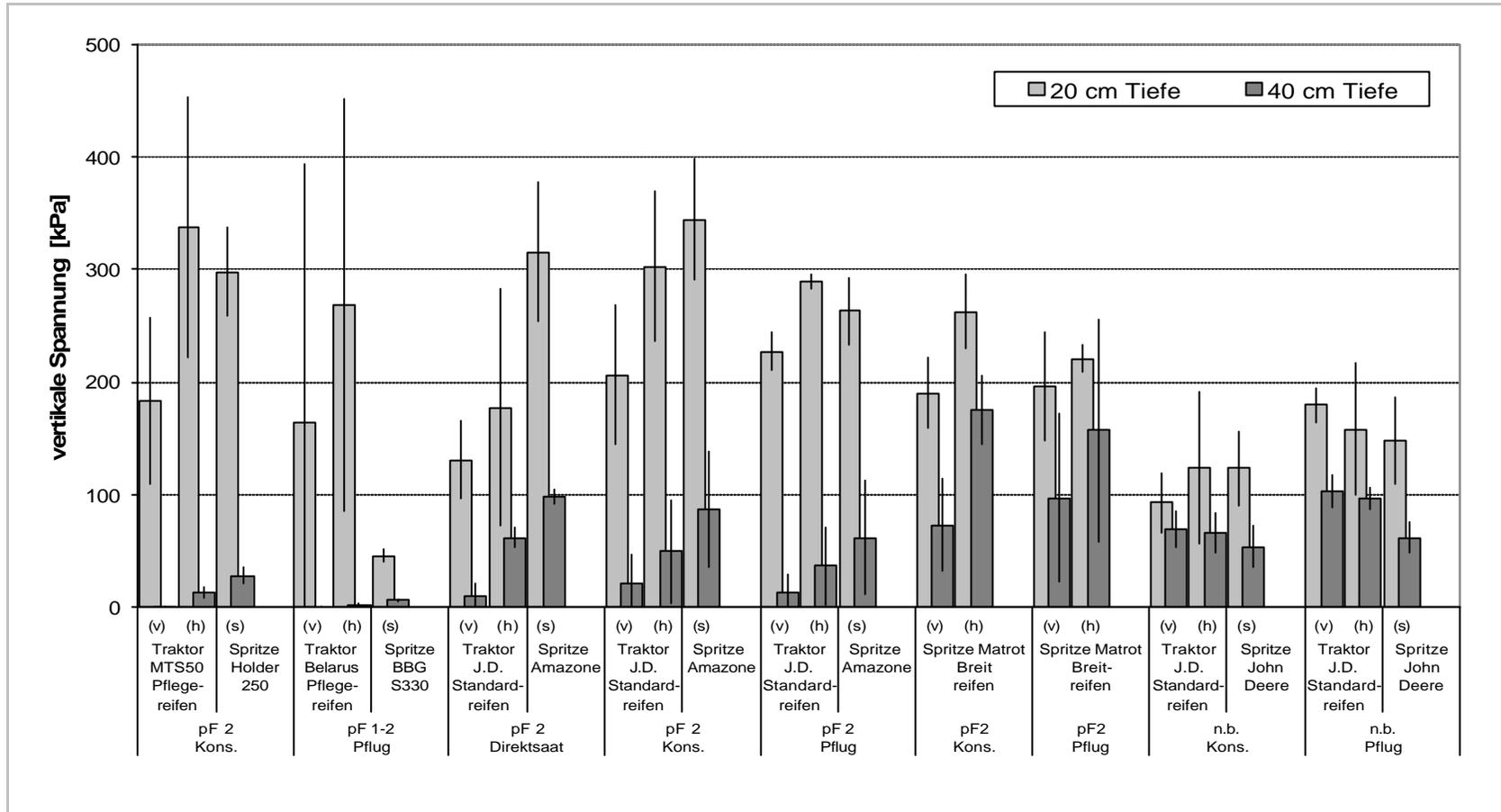


Abbildung 4.5.2.2-2: Vertikale Spannung (DMS-Sensor; n = 3) in 20 cm und 40 cm Bodentiefe unter verschiedenen Traktoren mit Pflanzenschutzspritzen sowie einer selbstfahrenden Pflanzenschutzspritze (Matrot) bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (kons. = konservierend, Pflug) und verschiedenen Bodenwasserspannungen (pF-Wert); (v): Vorder-/ (h): Hinterrad.

4.5.2.3 Mähdrusch

Die Bodendrücke der untersuchten Mähdrescher (Getreide- und Körnermaisernte) liegen im Oberboden überwiegend im Bereich von 150 – 400 kPa (Abb. 4.5.2.3-1).

Dabei ist ein Einfluss der Fahrwerksausstattung und der Bodenfeuchte feststellbar. Bei praxisüblicher Reifenausstattung mit 650er und 800er Vorderreifen lagen die Drücke unter den Vorderreifen bei ca. 200 bis 300 kPa. Mit bodenschonender Fahrwerksausstattung (Zwillinge u. Gleisband) vermindern sie sich und erreichen 0 – 200 kPa, wobei nur der Claas 480 mit Gleisband in der Körnermaisernte bei hoher Bodenfeuchte (pF 2) einen hohen Bodendruck verursacht. Bei den Mähdreschern mit Gleisband treten die höheren Bodendrücke (300 – 400 kPa) unter den Hinterreifen auf.

Im Unterboden ist unter den Vorderrädern mit praxisüblicher Bereifung das Ausmaß der Druckreduktion unterschiedlich stark, so dass hier noch Werte von 100 bis zu 300 kPa auftreten. Bei den bodenschonenden Fahrwerken ist der Druckabbau dagegen, z.T. begünstigt durch geringere Bodenfeuchten, sehr deutlich, so dass hier die Werte zwischen 0 – 60 kPa unter den vorderen Fahrwerken liegen. Die Hinterräder liegen hier in einem ähnlichen Bereich, wobei in der Körnermaisernte bei feuchtem Boden etwa 100 kPa Bodendruck festzustellen sind. Das entspricht den Werten, die auch bei den übrigen, praxisüblich bereiften Dreschern gemessen wurden. Die schmalen Hinterräder zeigen überwiegend einen schnelleren Druckrückgang mit zunehmender Tiefe.

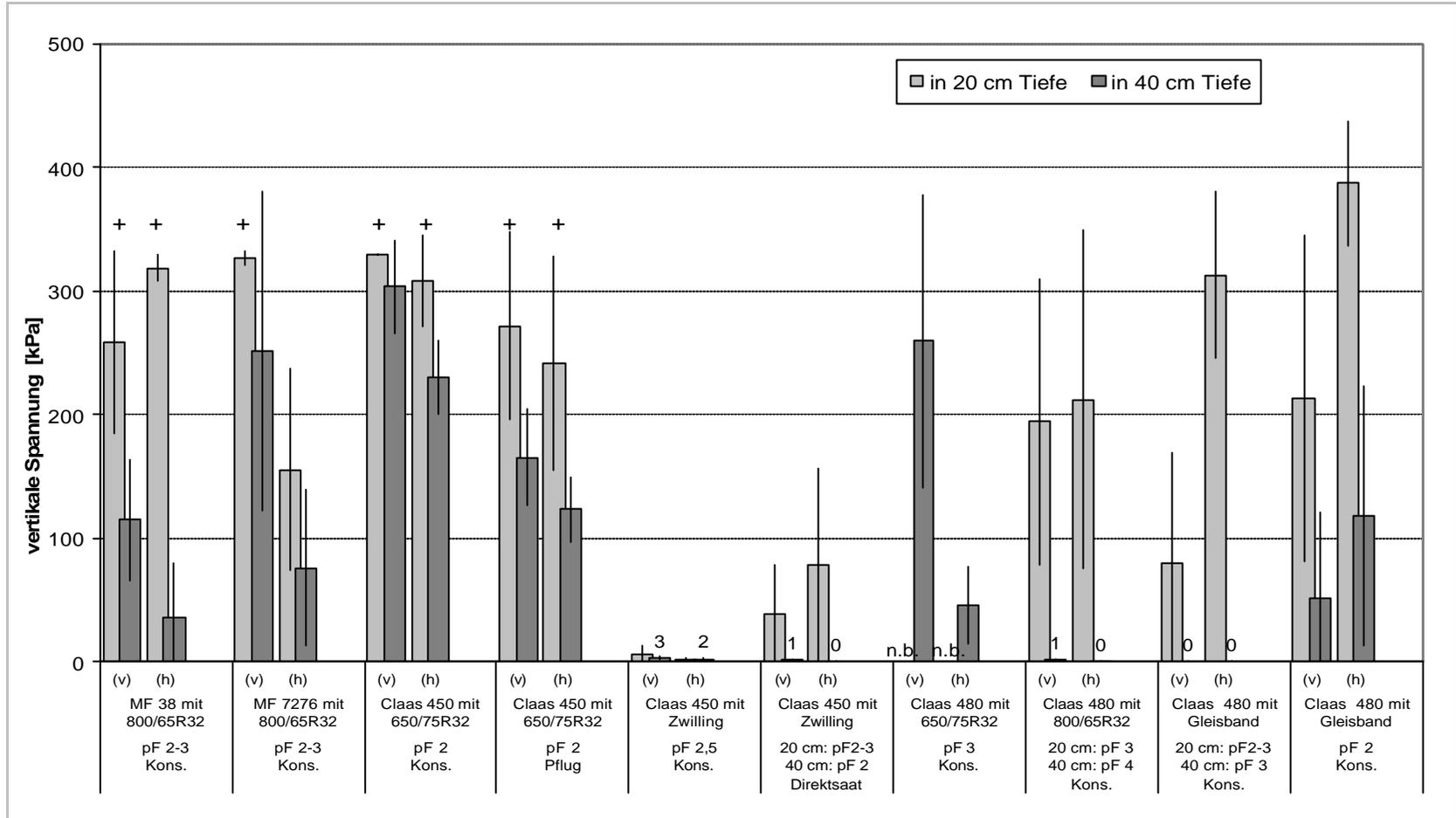


Abbildung 4.5.2.3-1: Vertikale Spannungen (DMS-Sensor; n= 3) in 20 cm und 40 cm Bodentiefe unter verschiedenen Mähreschern bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (kons. = konservierend, Pflug) und unterschiedlichen Bodenwasserspannungen (pF– Wert); (v): Vorder-/ (h): Hinterrad, +:Überschreitung des Messbereichs.

4.5.2.4 Kartoffelproduktion

Beim Kartoffellegen erreicht der Bodendruck im Oberboden rund 140 kPa unter den zwillingsbereiften Schlepperrädern und rund 250 kPa unter dem schmalen Stützrad der Legemaschine (Abb. 4.5.2.4-1). Auf Grund der im Verhältnis zur Radlast relativ großen Kontaktfläche bei dem Schlepper bzw. der geringen Kontaktfläche des Stützrades, baut sich der Bodendruck bis in 40 cm Tiefe sehr stark ab, so dass hier nur noch Drücke unter 20 kPa festzustellen sind.

Bezüglich der Kartoffelroder zeigt sich, dass die schmale Bereifung des Vorderrades beim Grimme KS 3000 A bzw. des Hinterrades beim Dewulf R 4000 zu hohen Bodendrücken von rund 300 kPa führen. Die Messung des Grimme-Roders bei pF 2 ergibt hingegen relativ geringe Bodendruckwerte. Möglicherweise hat das Vorderrad den Messsensor nicht exakt mittig überfahren. Die bodenschonenden Fahrwerke der beiden Roder (Gleisband, Terrareifen) stützen die hohen Fahrwerkslasten (Grimme: 9.500 kg, Dewulf: 4.180 kg) hingegen so gut ab, dass im Oberboden die Drücke im Bereich 60 – 102 kPa liegen. Mit zunehmender Tiefe verringern sich diese Drücke so weit, dass nur Werte unter 50 kPa messbar sind. Hierbei hat sich wahrscheinlich der relativ trockene Unterboden förderlich ausgewirkt. Unter den oben benannten schmalen Reifen der Roder baut sich der Bodendruck verhältnismäßig stark bis in 40 cm Tiefe ab, so dass hier nur noch 80 – 140 kPa feststellbar sind.

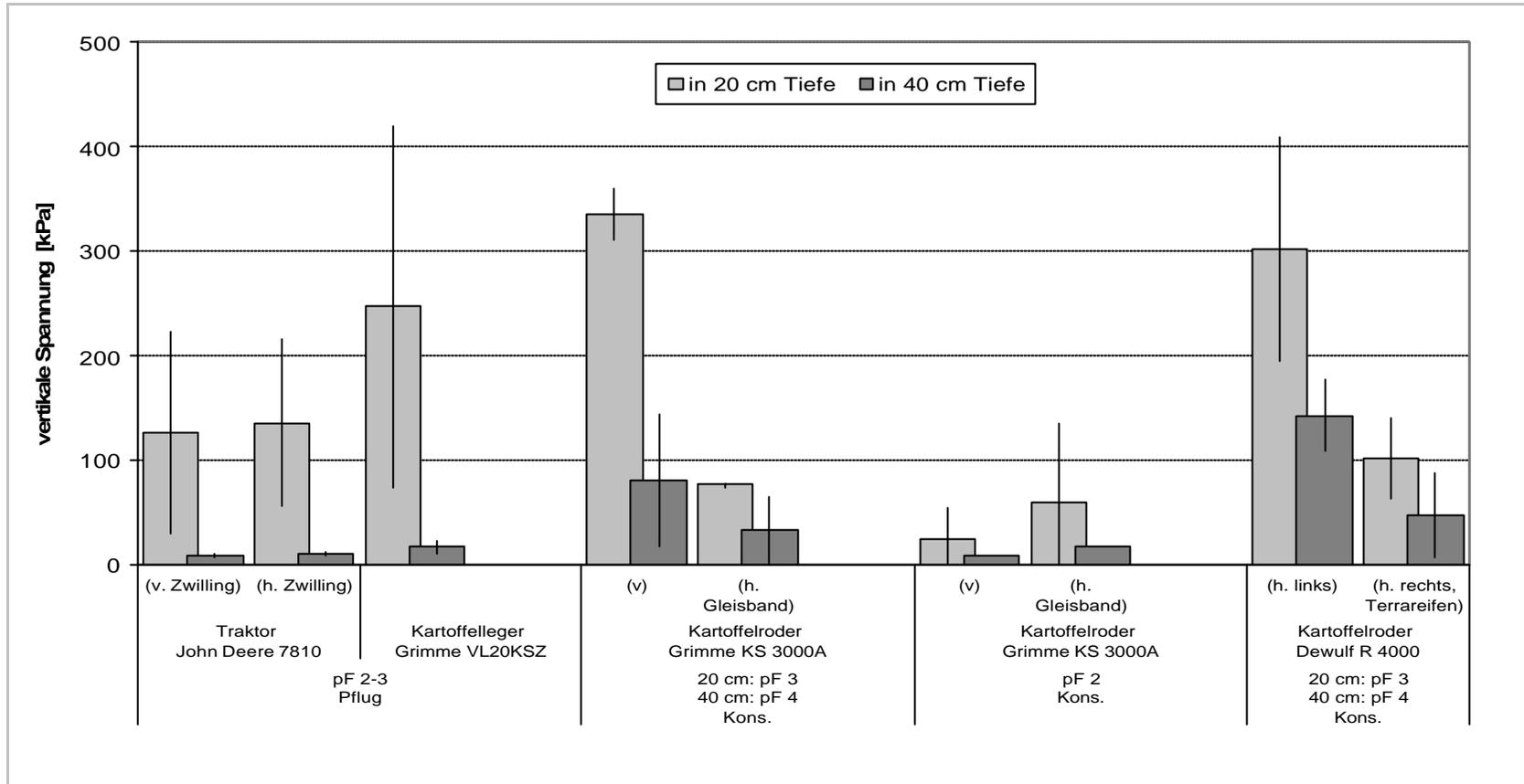


Abbildung 4.5.2.4-1: Vertikale Spannungen (DMS-Sensor; n = 3) in 20 cm und 40 cm Bodentiefe unter einem Traktor mit Kartoffellegemaschine und 2 unterschiedlichen Kartoffelvollertern bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (kons. = konservierend, Pflug) und verschiedenen Bodenwasserspannungen (pF-Wert); (v): Vorder-/ (h): Hinterrad

4.5.2.5 Zuckerrübenernte

Die Bodendruckentwicklung unter zwei unterschiedlichen selbstfahrenden Rübenrodern stellt sich in Abhängigkeit vom Bodenbearbeitungssystem und von der Bodenfeuchte differenziert dar (Abb. 4.5.2.5-1).

Bei konservierender Bodenbearbeitung werden im Ober- und Unterboden sowohl unter den Vorder- als auch unter den Hinterrädern etwa gleich hohe Bodendrücke im Bereich von 280 - 320 kPa gemessen. Ein Druckabbau mit zunehmender Tiefe findet nicht statt. Der gleiche Roder auf einer benachbarten gepflügten Fläche zeigt hingegen unter dem Vorderrad in beiden Bodentiefen deutlich geringere Bodendrücke. Sie liegen im Oberboden bei rund 130 kPa und halbieren sich bis in 40 cm Bodentiefe auf ca. 65 kPa. Das Hinterrad erreicht im Oberboden vergleichbare Drücke wie im konservierend bestellten Boden. Im Gegensatz dazu erfolgt hier aber ein deutlicher Druckabbau bis in 40 cm Tiefe auf ca. 230 kPa. Ein Erklärungsansatz für diesen Unterschied bietet die unterschiedliche Stabilität der Oberböden. Der festere, konservierend bearbeitete Boden wandelt die Bodenbeanspruchung durch den Kontaktflächendruck direkt in Bodendruck um. Auf dem lockereren gepflügten Boden wird zunächst der Boden weiter verdichtet und somit zunächst Druck kompensiert. In beiden Fällen (Pflug, konservierend) ist die Streuung der Bodendrücke z. T. groß.

Im Vergleich dazu werden unter den drei Rädern des Ropa-Roders mit vergleichbar hohen Radlasten bei trockenen Bodenverhältnissen im Unterboden nur geringe Bodendrücke unter 100 kPa gemessen. Hierbei hebt sich die höchste Radlast des mittleren Rades von 11.000 kg deutlich von den beiden anderen Rädern ab.

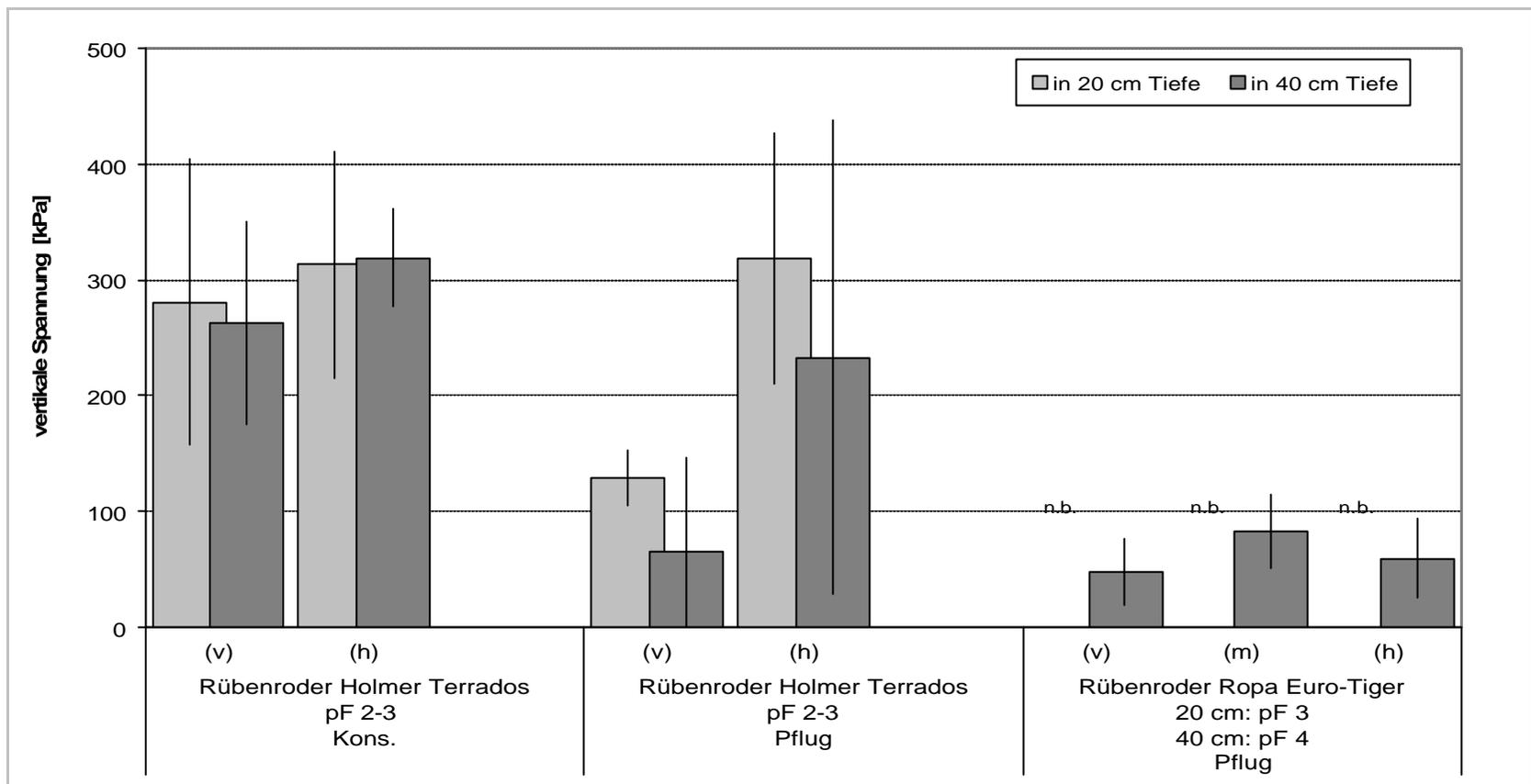


Abbildung 4.5.2.5-1: Vertikale Spannungen (DMS-Sensor; n=3) in 20 cm und 40 cm Bodentiefe unter 2 verschiedenen selbstfahrenden Rübenroderern bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (kons.= konservierend, Pflug) und verschiedenen Bodenwasserspannungen (pF-Wert); (v): Vorder-/ (h): Hinterrad

4.5.2.6 Erntetransport

Die Bodendrücke der Anhängerzüge (Radlasten 3.355 kg – 6.250 kg) liegen im Oberboden überwiegend im Bereich von 200 – 400 kPa (Abb. 4.5.2.6-1). Eine Ausnahme bildete der Überladewagen, der trotz einer hohen Radlast (4.500 kg) mit geringem Reifeninnendruck (P_i : 0,9 bar) sowie breiten Reifen gefahren wurde, so dass auf dem tragfähigen Oberboden (Direktsaat) nur geringste Drücke in 20 cm Tiefe festzustellen waren. Im Gegensatz dazu konnte hier der stabile Boden bei den HW 80 Anhängern mit geringerer Radlast und geringerer Kontaktfläche eine hohe Druckbelastung von ca. 400 kPa in 20 cm Tiefe nicht verhindern.

Die Drücke der Zugmaschinen unterscheiden sich deutlich von denen der Anhänger, da hier die Werte für die Vorderreifen meist im Bereich von 100 kPa und die Werte der Hinterreifen oft deutlich unter 200 kPa lagen.

Eine Ausnahme stellte das Gespann mit dem Kamper-Anhänger dar, der trotz der drei Achsen eine Stützlast von 2 t auf das Hinterrad des Traktors brachte, so dass 200 kPa deutlich überschritten wurden.

Im Unterboden ergibt sich ein differenziertes Bild. Insbesondere bei trockenerem (Conow, Kamper) oder stabilerem (Direktsaat) Boden lagen die Drücke unter 100 kPa, bzw. waren kaum messbar. Hier erfolgte ein starker Druckabbau über die Tiefe. Bei weiteren Anhängern (Lomma, Annaburger HTS 20.12 u. 32.12) erreichten die Bodendrücke 200 – 280 kPa bzw. reichten an 200 kPa heran.

Im Unterboden deutet sich in einigen Fällen (Lomma, Annaburger HTS 20.12 u. 32.12) an, dass mit zunehmender Überrollung der Bodendruck unter jeder Achse ansteigt.

Die Werte im Unterboden streuen z. T. stark.

In zwei Fällen kann ein Einfluss des Bodenbearbeitungssystems auf die Bodendruckausbreitung vermutet werden. Im einen Fall hat die Direktsaat vermutlich auf Grund ihrer höheren Stabilität die Druckausbreitung unter den HW 80 Anhängern stark gemindert. Im anderen Fall scheint die lockere Struktur des gepflügten Bodens den Bodendruck unter dem Annaburger HTS 20.12 deutlich gemindert zu haben.

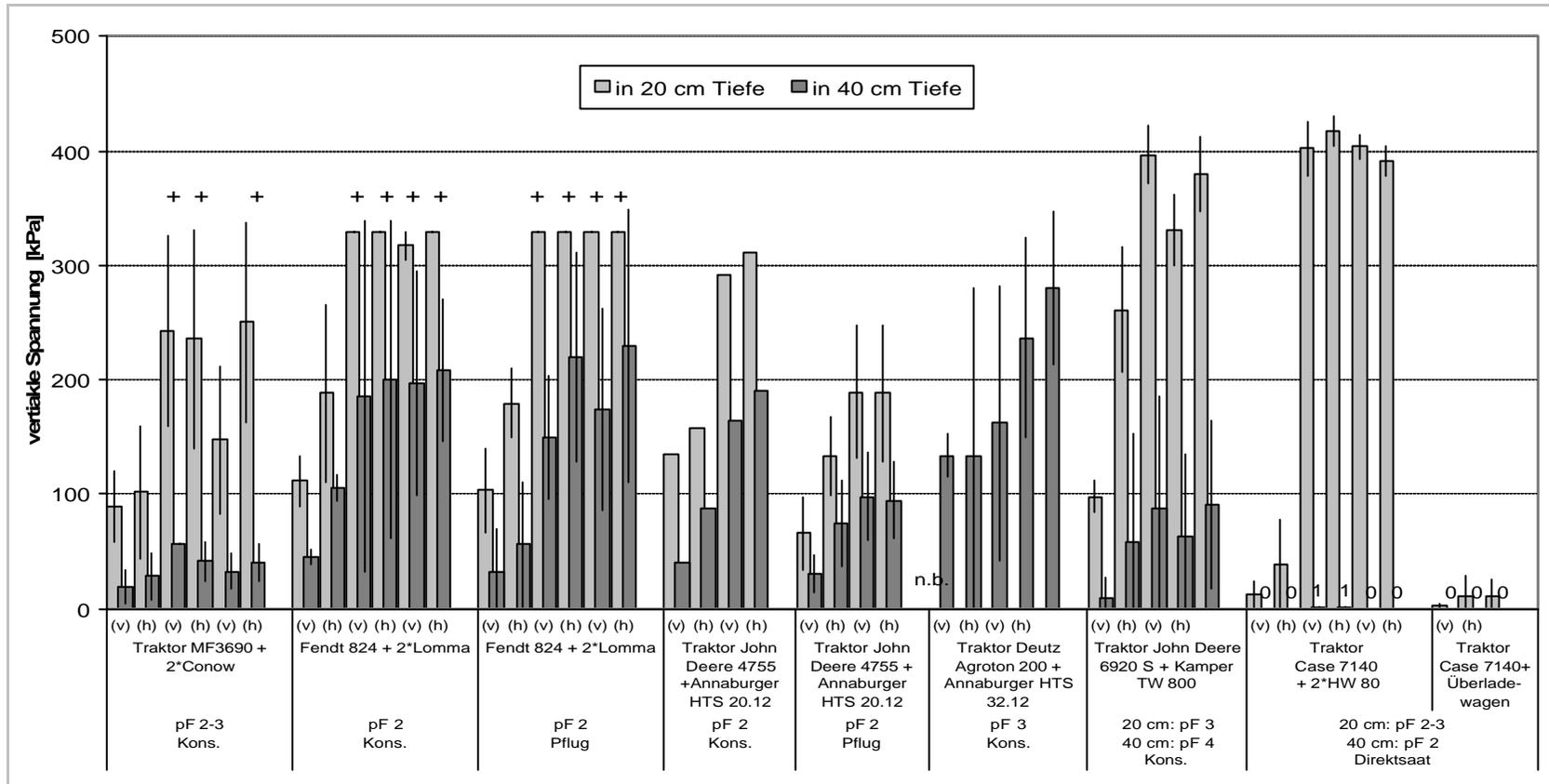


Abbildung 4.5.2.6-1: Vertikale Spannungen (DMS-Sensor; n= 3) in 20 cm und 40 cm Bodentiefe unter Gespannen mit Ernteanhängern bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (kons. = konservierend, Pflug) und verschiedenen Bodenwasserspannungen (pF-Wert); (v): Vorder-/ (h): Hinterrad, +: Überschreitung des Messbereichs

4.5.2.7 Zugmaschinen

Abb. 4.5.2.7-1 gibt einen gesonderten Überblick zu den Bodendrücken unter Zugmaschinen, die überwiegend unter Zugbedingungen, bei unterschiedlicher Bodenfeuchte geprüft wurden (überwiegend im Detail bereits bei den einzelnen Maschinengruppen (Kapitel 4.5.2-1 – 4.5.2-6) dargestellt.. Bei Radlasten bis 5.000 kg besteht im Oberboden ein relativ loser Zusammenhang zwischen Radlast und Bodendruck. Die Druckwerte umfassen eine Spanne von 0 kPa bis ca. 350 kPa. Besonders niedrige Werte sind insbesondere bei trockenen Bodenbedingungen ($pF > 3$) feststellbar (s. Anhang). Im Unterboden wird der Zusammenhang zwischen Radlast und Bodendruck enger. Dabei liegen die Druckwerte überwiegend unter 100 kPa. Werte im Bereich von Null sind insbesondere durch trockene Bodenverhältnisse begründet.

Ab 5.000 kg Fahrwerkslast konnten nur wenige Fahrzeuge gemessen werden. Daher können keine Trends abgeleitet werden. Es ist aber festzustellen, dass im Unterboden die Bodendrücke unter 100 kPa liegen, wobei hier der höchste Druckwert mit der höchsten Radlast (11.000 kg) und hoher Bodenfeuchte bei Feldkapazität korrespondiert.

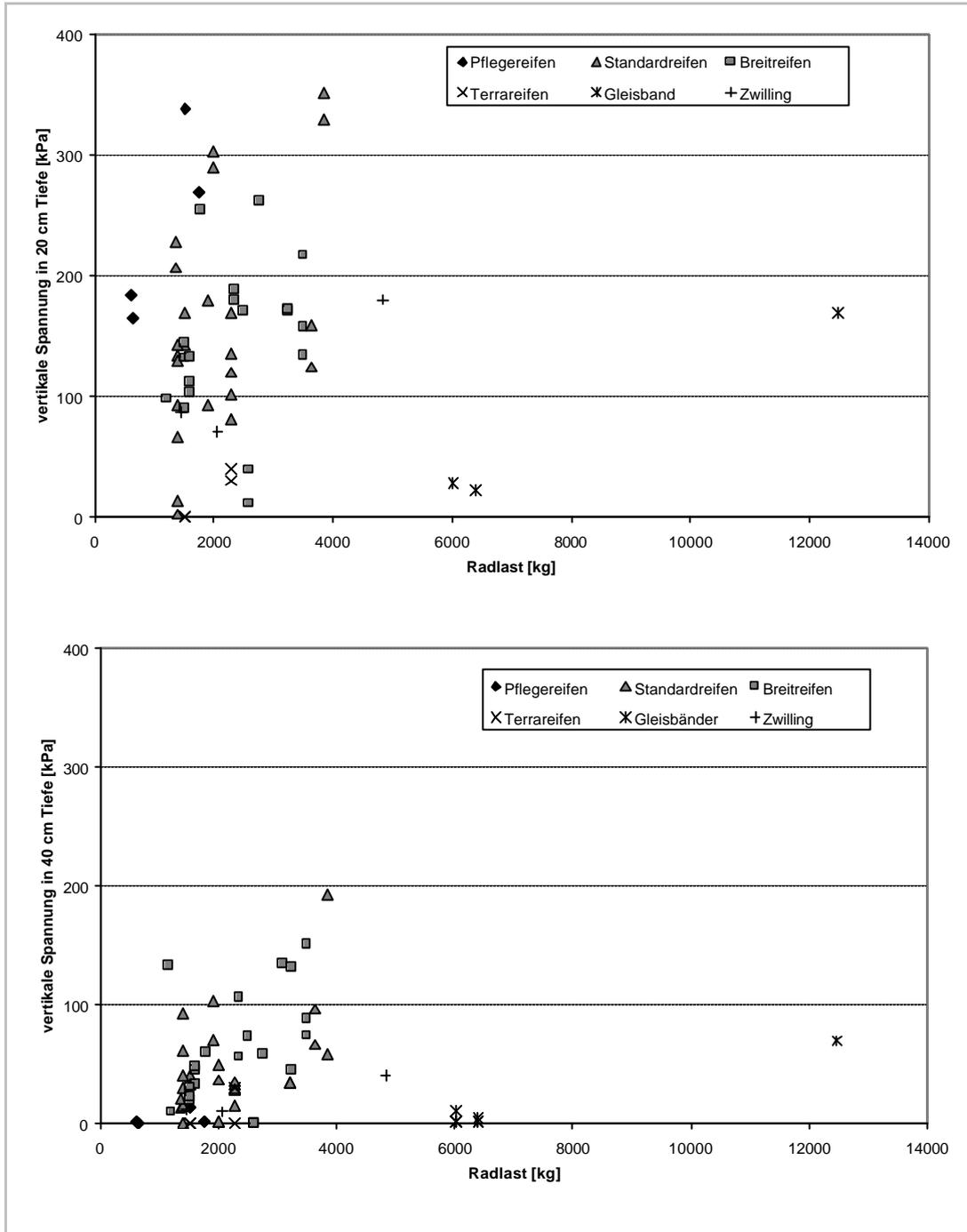


Abbildung 4.5.2.7-1: Vertikale Spannung in 20 cm und 40 cm Bodentiefe unter Zugmaschinen mit unterschiedlicher Fahrwerksausstattung (Reifen, Gleisband) in Abhängigkeit von der Radlast- bzw. Gleisbandlast.

4.5.2.8 Absenkung Reifeninnendruck

Auf einem AL-Standort mit zwei unterschiedlichen Bodenbearbeitungsvarianten (Pflug/konservierende Bearbeitung) wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Reifeninnendrucke im Hinterreifen eines Traktors (Radlast 2.500 kg) ohne zusätzliche Zugkraftanforderungen geprüft (Abb. 4.5.2.8-1). Im Pflugbereich hat die Reifeninnendruckabsenkung keinen erkennbaren Einfluss auf die Höhe der Bodendrucke im Ober- und Unterboden. Auffällig ist, dass die Streuung der Werte im Unterboden bei einer Reifeninnendruckabsenkung deutlich abnimmt.

Auf der konservierend bestellten Fläche zeigt sich hingegen ein unterschiedliches Bild. Hier sind bei einem hohen Reifeninnendruck höhere Bodendrucke im Vergleich zum abgesenkten Reifeninnendruck, aber auch im Vergleich zu den beiden Varianten im Pflugbereich festzustellen. Dies gilt sowohl für den Ober- wie für den Unterboden. Im Oberboden liegen die Drücke etwa bei 200 kPa und im Unterboden bei rund 100 kPa. Dabei ist hier im Oberboden die Streuung der Druckwerte ausgeprägter, während sich im Unterboden eine ähnliche Tendenz wie im gepflügten Bereich andeutet, nämlich eine Abnahme der Streuung der Bodendrucke bei Absenkung des Reifeninnendrucks.

Diese Effekte sind vermutlich so zu deuten, dass die Reifenaufstandsfläche durch eine Absenkung des Reifeninnendrucks die Aufstandsfläche im gepflügten Bereich vermutlich nicht merklich verändert wurde, da im gepflügten Bereich der Zwischenstollenbereich bereits die Last mit trägt. Im konservierenden Bereich bewirkt hingegen die Absenkung des Reifeninnendrucks eine Vergrößerung der tragenden Aufstandsfläche, so dass im Oberboden Bodendrucke wie im gepflügten Bereich auftreten. Im Unterboden bauen sich diese Drücke dann auf Grund des stabileren Bodens schneller in die Tiefe ab.

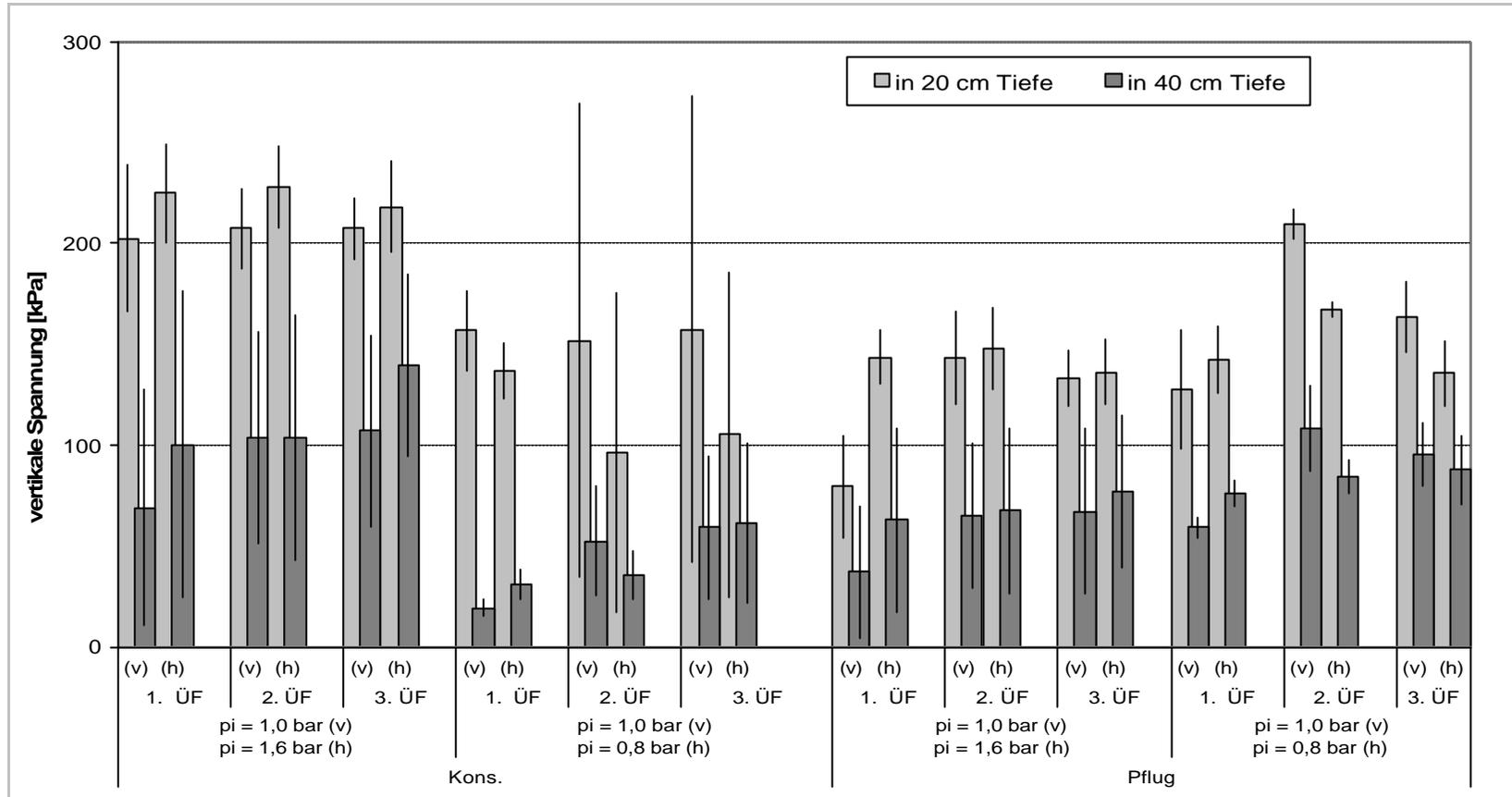


Abbildung 4.5.2.8-1: Vertikale Spannungen (DMS-Sensor; n= 3) in 20 cm und 40 cm Bodentiefe unter dem Traktor John Deere 4755 mit unterschiedlichem Reifeninnendruck im Hintreifen bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (kons.= konservierend, Pflug); Bodenwasserspannung: pF 2); (v): Vorder-/ (h): Hinterrad

4.5.2.9 Gleisbänder

Im Gegensatz zu Reifen zeigt der Bodendruck unter Gleisbändern einen charakteristisch anderen zeitlichen Verlauf bei einer Überfahrt (Abb. 4.5.2.9-1 a - d). Er nimmt in Form einer mehrgipfligen Kurve zu und wieder ab. Dabei dauert die Phase hoher Bodendrücke vergleichsweise länger an. Ursache für die Abfolge mehrerer Druckspitzen sind die verschiedenen Lauf- und Antriebsrollen bei den Gleisbandfahrwerken. Gleichzeitig ist, wie bereits weiter oben erläutert, der Druckabbau mit zunehmender Bodentiefe sehr deutlich. Die Druckspitzen sind auch noch im Unterboden festzustellen, allerdings sind sie schon deutlich nivelliert. Bei trockeneren Böden sowie bei kürzeren Gleisbändern besteht die Tendenz, dass sich die einzelnen Druckspitzen zu einer Druckspitze aggregieren, so dass hier die Bodenbelastung eher der einer Reifenbelastung entspricht. Im Falle des Mähreschers (Abb. 4.5.2.9-1 c) steigen die Bodendrücke im Oberboden unter dem Gleisband zum Ende hin langsam auf sehr hohe Werte an. Sie weichen hier vom Verhalten der übrigen Gleisbänder deutlich ab. In diesem Fall sowie bei der Bodenbearbeitung mit dem Challenger E95 liegen die Bodendrücke in 20 cm Bodentiefe im Bereich der Laufrollen somit z.T. noch deutlich über den mittleren berechneten Kontaktflächendrücken (76 bzw. 58 kPa). Im Unterboden ist aber bei allen Gleisbändern eine deutliche Reduktion des Bodendrucks festzustellen.

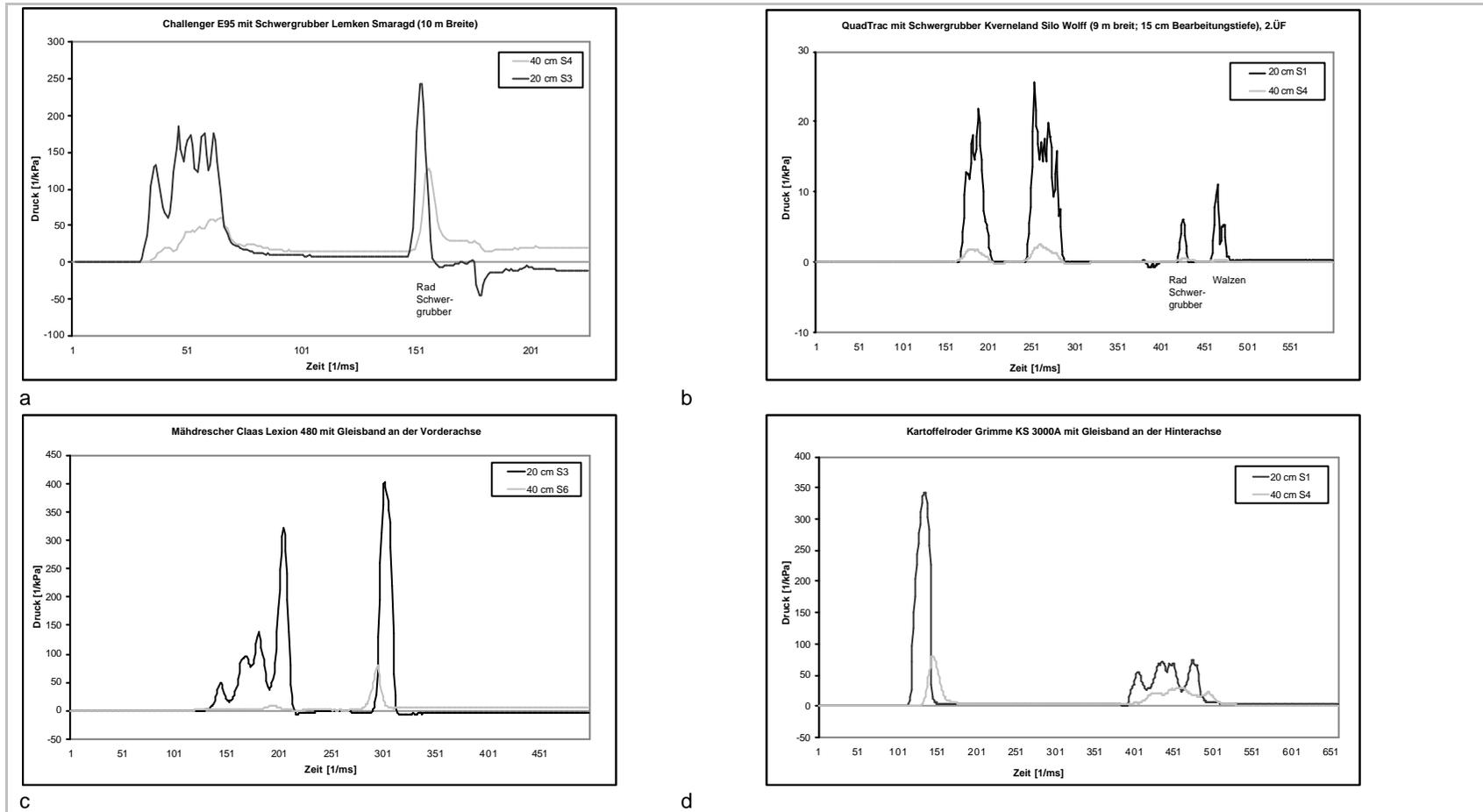


Abbildung 4.5.2.9-1: Zeitlicher Verlauf des vertikalen Bodendrucks unter verschiedenen Gleisbandlaufwerken (a: Challenger E95, b: Quad Trac, c: Mährescher, d: Kartoffelroder) in 20 cm und 40 cm Bodentiefe; S 1 – 6: Sensornummer

4.5.3 Diskussion

Überblick

Insgesamt zeigen die Messwerte der vertikalen Spannungen starke Streuungen, sowohl was die einzelnen maschinenbezogenen Werte anbetrifft als auch bezüglich der Gesamtheit der jeweiligen Mittelwerte. Eine Ursache hierfür kann in den bei den verschiedenen Messungen meist nicht völlig herstellbaren vergleichbaren bodenphysikalischen und –bodenmechanischen Standortbedingungen liegen (KÜHNER 1997). Ferner dürfte eine weitere Ursache in der ungleichen Druckverteilung in der Aufstandsfläche (Stollen, Laufbandrollen) zu suchen sein, von der verschiedene Autoren berichten (KOOLEN et al. 1992, KÜHNER 1997, WIERMANN 1998, KELLER et al. 2002, ALAKUKKU et al. 2002, TRAUTNER 2003, KELLER et al. 2004). Im Rahmen der Messungen im Feld ist es nicht immer zu gewährleisten, dass die Druckmesssensoren exakt mittig überfahren werden (TRAUTNER 2003). Unterschiedliche Reifeninnendrucke bei gleicher Radlast können zudem zu einer Umverteilung der Belastung und damit der Spannungen in der Aufstandsfläche führen (KÜHNER 1997). Bei modernen breiten Reifen können erhöhte Spannungseinträge durch die Reifenflanken, insbesondere bei abgesenktem Reifeninnendruck auftreten. Innerhalb eines Gummigleisbandes kann die Spannungsverteilung sehr unterschiedlich sein, vor allem bei ungünstiger Lastverteilung im Fahrwerk (KELLER 2004). Ferner können seitens der Messsensoren nicht immer einbaubedingte Einflüsse, wie z.B. schlechter Kontakt zum Boden, ausgeschlossen werden (KÜHNER 1997, WIERMANN 1998). Bezüglich der absoluten Höhe der Werte weisen verschiedene Autoren darauf hin, dass starre Messsensoren vermutlich etwas höhere als die wahren Bodenspannungen messen, da bei den hier verwendeten starren Sensoren eine Konzentration der Spannungen auf den Sensor möglich ist (WIERMANN 1998, KELLER 2004).

Wenn auch aus den oben genannten Gründen die gemessenen Werte nicht exakt den tatsächlichen vertikalen Spannungswerten entsprechen, so ermöglichen sie doch einen guten Überblick zu den ungefähren Größenordnungen der Bodenbeanspruchung durch praxisübliche Maschinen an unterschiedlichen Standorten in Sachsen.

An Hand der absoluten Werte sind zudem verschiedene Maschinen und Maßnahmen an einem Standort oder gleiche Maschinen an verschiedenen Standorten bezüglich der dynamischen Belastung gut vergleichbar.

In Abb. 4.5.3-1 sind die vertikalen Bodenspannungen, die von verschiedenen Autoren gemessen wurden, zusammengestellt, um eine Einordnung der in Sachsen festgestellten Befunde zu ermöglichen. Einschränkend ist hinzuzufügen, dass die Messungen hierzu mit unterschiedlichen Sensoren durchgeführt wurden. Lediglich das Sensorsystem von HORN et al. (1991) ist vergleichbar mit dem bei den vorliegenden Untersuchungen eingesetzten Sensorsystem (DMS-Sensor). Ferner waren die meisten Werte nur aus 30 cm Tiefe sowie in Kombination mit der Radlast verfügbar. Um einen breiten Überblick zu ermöglichen, werden hier daher diese Werte als Vergleichsbasis genutzt.

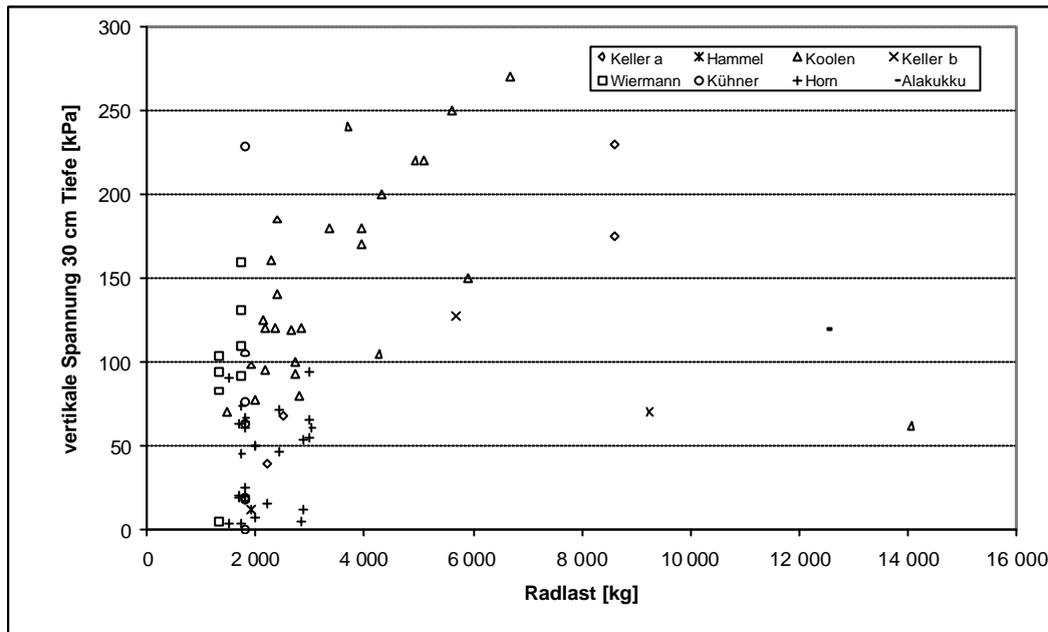


Abbildung 4.5.3-1: Vertikale Spannungen in 30 cm Bodentiefe in Bezug zur Radlast gemessen von unterschiedlichen Autoren (HORN et al. 1991, KOOLEN et al. 1992, HAMMEL 1994, KÜHNER 1997, WIERMANN 1998, ALAKUKKU et al. 2002, KELLER et al. 2002 (b), KELLER et al. 2004 (a))

Vergleicht man diese Literaturangaben mit den in Sachsen gefundenen Werten, so bestätigen die Messungen der übrigen Autoren die für Sachsen vorliegenden Befunde und Trends. Bemerkenswert ist, dass die in der Literatur gefundenen Zusammenhänge zwischen Radlast und Bodenspannung in 30 cm Tiefe, den Zusammenhängen in Sachsen in 40 cm Bodentiefe sehr ähneln was den Verlauf, die Verteilung, die absolute Höhe der Werte sowie die Fahrwerke anbetrifft. So weisen die Gleisbandtraktoren bei hohen Fahrwerkslasten auffallend niedrige Bodenspannungen auf. Insgesamt liegen die Messwerte der verschiedenen Autoren in 30 cm Tiefe etwa zwischen den Werten, die in Sachsen in 20 cm und 40 cm Tiefe festgestellt wurden, wobei sie sich tendenziell den Werten in 40 cm Tiefe deutlich annähern. Die in Sachsen gefundenen Werte sind somit gut in das Gesamtbild der in der Literatur dargestellten vertikalen Bodenspannungen einzuordnen und können als plausibel angesehen werden.

Die vorliegenden Messungen bestätigen ferner den aus der Literatur bekannten Zusammenhang, dass sich mit steigender Radlast die Bodendrücke im Unterboden deutlich erhöhen, sofern nicht die Aufstandsflächen überproportional erhöht werden (z.B. CHAMEN et al. 2004). Insbesondere bezüglich der Gleisbänder kommen Messungen verschiedener Autoren (KELLER et al. 2002, ALAKUKKU et al. 2002) zu ähnlichen Ergebnissen, die bestätigen, dass überproportionale Vergrößerungen der Aufstandsfläche im Verhältnis zur Last den Unterboden vor zu hohen Bodendrücken schützen. Abb. 4.5.1-1 bringt zudem zum Ausdruck, dass das heutige Reifensortiment Restriktionen bezüglich

lich der Aufstandsflächen unterliegt und dass daher in vielen Fällen die entsprechenden Reifen aus Sicht der Bodendruckentwicklung noch mit zu hohen Lasten beaufschlagt sind.

Dieses Faktum ist auch durch eine Absenkung des Reifeninnendrucks nur bedingt zu umgehen, da die Untersuchungen zeigen, dass der Bodendruck relativ stark in Abhängigkeit vom Reifeninnendruck streut. Dies bestätigt die Erkenntnisse anderer Forscher, die Faktoren, wie z.B. eine inhomogene Lastverteilung in der Aufstandsfläche (Stollen, Laufbandrollen, Reifenflanken bei niedrigem Reifeninnendruck) und dynamischen Effekten (Reifenverformung bei Zugkrafteinwirkung) eine große Bedeutung hinsichtlich der Bodendruckentwicklung zumessen (KOOLEN et al. 1992, HAMMEL 1994, KÜHNER 1997, TRAUTNER 2003, KELLER et al. 2002, KELLER 2004, KELLER u. ARVIDSSON 2004). Der vorliegende Befund, dass die Bodendrucke in 20 cm Tiefe etwa dem Reifeninnendruck entsprechen, wird indirekt durch die Ergebnisse von KELLER (2004) bestätigt. Dieser konnte feststellen, dass die höchsten Bodendrucke in 10 cm Tiefe grundsätzlich höher als die jeweiligen Reifeninnendrücke liegen. Die Ursachen hierfür sind oben erläutert worden.

Unterstützt wird diese Erkenntnis durch die vorliegenden Befunde (Abb. 4.5.1-2, 4.5.1-3), dass die Bodendrucke in 20 cm Tiefe noch in etwa auf dem Niveau der Reifeninnendrücke liegen bzw. die Bodendrucke in 20 cm Tiefe tendenziell deutlich über den berechneten Kontaktflächendrücken liegen. So stellte TRAUTNER (2003) fest, dass der Kontaktflächendruck 50 – 100 kPa höher als der Reifeninnendruck P_i liegt. Als Faustformel für den Bereich üblicher Reifeninnendrücke kann angenommen werden, dass $1,25 \times P_i$ etwa dem mittleren Kontaktflächendruck entspricht (TIJINK 1994 zitiert in CHAMEN et al. 2004).

Das heißt, dass zukünftig bei der Konzeptionierung von Fahrwerken der Lastverteilung in der Aufstandsfläche eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte (KELLER 2004). Ferner ist darauf hinzuweisen, dass die Absenkung des Reifeninnendrucks P_i nur eine begrenzte Stellschraube zur Bodendruckminderung ist, da die Aufstandsfläche auf diesem Wege maximal um rund 30 % vergrößerbar ist und gleichzeitig größere Lastreduktionen betrieblich meist nicht umsetzbar sind. Bei großvolumigen Reifen besteht zudem die Tendenz einer stärkeren Lastverteilung hin zu den Reifenflanken speziell bei einer P_i -Absenkung (KELLER 2004). Ferner besteht in Hanglagen das Risiko, dass der Reifen von der Felge rutscht. Gleichwohl liegt die besondere Bedeutung der P_i -Absenkung in der Verbesserung der Zugkraft und der Verminderung des Rollwiderstandes, welche eine Verminderung der Bodenbeanspruchung durch Scherung und Knetung und damit eine Schonung insbesondere des Oberbodengefüges bewirkt.

Die vorliegenden Ergebnisse lassen keine eindeutige Aussage dahingehend zu, dass die Form des Bodenbearbeitungssystems einen Einfluss auf den Bodendruck und seine Ausbreitung hat. Im direkten Vergleich von konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung gibt es sowohl Fälle bei denen sich die Bodendrucke in beiden Systemen nicht unterscheiden als auch Fälle, wo entweder die konservierende oder die konventionelle Bodenbearbeitung zu höheren Bodendrücken bei gleicher Belastung führt. WIERMANN (1998) geht zwar grundsätzlich davon aus, dass konservie-

rend bearbeitete Flächen auf Grund ihrer höheren Stabilität Bodendrucke besser kompensieren, allerdings bestätigt sich diese Annahme auch nicht in allen seiner Untersuchungen.

Dabei ist zu beachten, dass höhere Bodenstabilitäten tendenziell zu geringeren Einsinktiefen der Reifen führen und sich damit die Aufstandsfläche reduzieren kann, bzw. der Zwischenstollenbereich nicht mehr an der Lastabstützung beteiligt ist. Ferner kann sich im Falle großvolumiger Reifen bei abgesenktem P_i die Last stärker auf die Reifenflanken konzentrieren und somit höhere Drücke verursachen (KELLER 2004). Diese Hintergründe können u.a. eine Erklärung dafür sein, dass in der vorliegenden Untersuchung kein eindeutiger Effekt des Bodenbearbeitungssystems erkennbar ist. Zwecks genauerer Klärung des Sachverhalts bedarf es hierzu in Zukunft weiterer Untersuchungen. Insbesondere auch deshalb, weil z.B. TRAUTNER (2003) und KELLER (2004) die Auffassung vertreten, dass sich Bodendrucke in trockenen und/ oder stabilen Oberböden durchaus auch schneller und direkter in den Unterboden ausbreiten können. Vor dem Hintergrund, dass in Sachsen die konservierende Bodenbearbeitung, die oft mit stabileren Böden einher geht, mit rund 240.000 ha mittlerweile mindestens ein Drittel der Ackerfläche umfasst (SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT, 2005) bedarf dieser Aspekt zukünftig einer weiteren Beachtung.

HORN & ROSTEK (2000) nehmen an, dass insbesondere bei mehrmaliger Überrollung eines Oberbodens mit einer erhöhten Elastizität ein weniger elastischer Unterboden einer stärkeren plastischen Verformung unterliegt. Vor diesem Hintergrund ist auch der aktuelle Trend zu reduzierten Bodenbearbeitungstiefen zukünftig im Hinblick seiner Auswirkung hinsichtlich des Unterbodengefüges zu beobachten. Heutzutage beginnt der Unterboden etwa in 25 cm Tiefe, also direkt unter der Bearbeitungstiefe. Mit zunehmender Reduktion derselben verlagert sich der Unterboden in Bereiche mit zunehmender mechanischer Beanspruchung durch landwirtschaftliche Maschinen (KELLER 2004). Andere Autoren sehen aber eine schützende Wirkung durch stabilere Bodenschichten und Pflugsohlen (BRUNOTTE et al. 2000, POODT et al. 2003). Die vorliegenden Messungen unter trockenen Bodenbedingungen unterstützen diese Auffassung.

Die Untersuchungsergebnisse stützen den Vorschlag von CHAMEN et al. (2004), bei Maschinen und gezogenen Fahrzeugen den Kontaktflächendruck (KFD) möglichst auf 100 kPa hin zu orientieren und bei weniger tragfähigen Böden diesen Wert noch zu unterschreiten. In Abb. 4.5.1-3 wird deutlich, dass bei diesem berechneten Kontaktflächendruck in 40 cm Bodentiefe kaum noch Bodendrucke über 100 kPa gemessen werden. Da die Vorbelastung vieler Böden in Sachsen in diesem Bereich liegt, wäre somit das Risiko einer fortschreitenden Bodenverdichtung des Unterbodens minimiert. Bei höheren Radlasten ist eine weitere Absenkung des KFD durchaus zweckmäßig, da hier ein Konstanthalten des KFD bei großen Aufstandsflächen den Bodendruck in größere Tiefen verlagert. KELLER (2004) kommt in seinen Untersuchungen zu dem Schluss, dass selbst bei vertikalen Spannungen die kleiner als die Vorbelastung sind, irreversible Setzungen des Bodens eintreten können, da der Wert der Vorbelastung keine exakte Grenze zwischen elastischer

und plastischer Verformung darstellt (ARVIDSSON & KELLER 2004, BERLI et al. 2003, HAMMEL 1993). Vertikale Bodenbelastungen sollten daher theoretisch zumindest 50 kPa möglichst nicht überschreiten, um irreversible Setzungen des Bodens zu vermeiden. Aus praktischen Erwägungen leitet er hieraus aber die Empfehlung ab, möglichst geringe Radlasten mit möglichst geringen Reifennendrücken zu verwenden, d. h. den KFD soweit als möglich abzusenken.

Gleichwohl ist zu bedenken, dass bei dem heutigen Trend zur reduzierten Bodenbearbeitungstiefe der Unterboden durchaus bereits in 20 cm Tiefe beginnen kann (KELLER 2004). In dieser Tiefe wurden in den vorliegenden Untersuchungen z.T. noch sehr hohe Bodendrücke festgestellt. Allerdings ist ebenso ein deutlicher Druckabbau von 20 cm auf 40 cm Tiefe zu beobachten. Hier kann durchaus ein Einfluss von den vorhandenen oder rezenten stabilen Pflugsohlen ausgehen, wie dies in der Literatur häufiger auch angenommen wird (POODT et al. 2003). Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen eher den Befund, dass trockene Böden und sehr stabile Oberböden bei dauerhafter Direktsaat die Druckausbreitung in größere Bodentiefen stark mindern.

Ferner ist zu berücksichtigen, dass bei höher liegenden Unterböden zunehmend Scherkräfte zusätzlich zur vertikalen Bodenbeanspruchung relevant werden können. Auf Direktsaat- und Grünlandflächen ist diese zusätzliche Bodenbeanspruchung in jedem Fall zu beachten, wobei hierzu derzeit keine weitergehenden Aussagen möglich sind.

Maschinengruppen

Betrachtet man die hier untersuchten Maschinengruppen hinsichtlich ihrer Bodenbeanspruchung durch vertikale Spannungseinträge im Unterboden, so ist eine Differenzierung in belastende und weniger belastende Maschinengruppen möglich (Kap. 4.5.2).

Demnach ist die Bodenbeanspruchung durch Zugmaschinen insgesamt sowie durch die Grundbodenbearbeitung eher gering. Einschränkend ist darauf hinzuweisen, dass das Pflügen mit einem Rad in der Furche nur bei trockenem Boden geprüft wurde, so dass sich bei feuchterem Boden sicherlich die Befunde verschiedener Autoren (WEISSKOPF et al. 2000, SOMMER & ZACH 1992, STEINKAMPF et al. 1994) bestätigt hätten, die eine deutliche Beanspruchung des Unterbodens feststellen. Somit ist zumindest das Pflügen mit den Rädern in der Furche, in Verbindung mit dem hohen Spurflächenanteil, weiterhin als besonders bodenbeanspruchend anzusehen. Problematisch können bei der übrigen Grundbodenbearbeitung vor allem falsch ausgelegte Stützräder sein. Hier aber eher, da sie zu unerwünschten Verdichtungen in der Krume und somit im Saatbett führen können.

Die untersuchten Maschinen im Pflanzenschutz und in der Kartoffelproduktion nehmen hingegen eine mittlere Stellung hinsichtlich der Spannungseinträge in den Unterboden ein. Die häufig schmalen Bereifungen der angehängten Pflanzenschutzspritzen bewirken meist einen schnellen Druck-

abbau mit zunehmender Tiefe. Aus der Sicht des Oberbodens ist dieser Umstand allerdings weniger vorteilhaft, da unter den meist feuchteren Arbeitsbedingungen oft tiefe Fahrspuren entstehen, die unter anderem die Erosionsanfälligkeit eines Ackers erhöhen. Daher sollten weitere Minderungsmöglichkeiten erwogen werden, zumal hohe Spannungen bei gleichzeitig mehrmaliger Überfahung den Boden so verdichten, dass ein erhöhter Zugkraftbedarf bzw. Dieselverbrauch bei der Grundboden- und Saatbettbereitung die Folge sind. Neben der Dichtlagerung der Bodenmatrix können derartig hohe Bodenbeanspruchungen auch zu Verdichtungen der Aggregate führen, mit den bekannten Folgen z.B. aus Sicht der Speicherung von Pflanzennährstoffen. Zudem rückt durch die tiefen Fahrspuren die Bodenbeanspruchung näher an den Unterboden und führt dort zu erhöhten Belastungen.

Die untersuchten Maschinen zur Kartoffelproduktion schneiden recht günstig ab, da sie überwiegend mit bodenschonenden Fahrwerken, insbesondere Gleisbändern, ausgestattet waren. Der bereifte Kartoffelroder verursachte im Oberboden hingegen ähnliche Bodendrucke, wie die untersuchten Zuckerrübenroder. Trockene Bodenbedingungen verhinderten hier hohe Spannungseinträge in den Unterboden.

Die deutlich höchsten Spannungseinträge in den Unterboden wurden im Rahmen der Untersuchungen bei der organischen und mineralischen Düngung, dem Mähdrusch, dem Erntetransport sowie bei den Zuckerrübenrodern festgestellt. Dies geht konform den Erkenntnissen von KOOLEN et al. (1992) bei Güllewagen und von ARVIDSON et al. (2001), BRUNOTTE et al. (2000), BOIZARD et al. (2000), ISENSEE, (1990) bei Zuckerrübenrodern. Im Sinne der Vorsorge sind daher in diesen Maschinengruppen vorrangig Minderungsmaßnahmen zu ergreifen bzw. weiter zu entwickeln. Insgesamt bestätigen die vorliegenden Ergebnisse, dass hinsichtlich des Bodengefüges Anlass zur Vorsorge besteht, sowie es von vielen Autoren und Institutionen gesehen wird (TIJINK 2003, CHAMEN 2003, CHAMEN et al. 2004, SOMMER 2003; EHLERS et al. 2003; HARTGE & HORN 2002).

Überfahrten mit landwirtschaftlichen Maschinen bedingen eine Mehrfachüberrollung des Bodens. Dies kann unter bestimmten Bedingungen bei gleich bleibenden Radlasten zu einem sukzessiven Anstieg der Bodendrucke führen. Die vorliegenden Untersuchungen können diese Tendenz zumindest in einigen Fällen im Rahmen des Erntetransports und bei der Gülleausbringung sowie bei der Mehrfachüberrollung mit einem Traktor bestätigen.

Die Absenkung des Reifeninnendruckes P_i wird meist als eine wirksame Maßnahme zur Minderung des Bodendrucks empfohlen (BRUNOTTE et al. 2005; SOMMER & BRUNOTTE 2003; ARVIDSON et al. 2002, WEISSBACH 2001, GYSI 1999). Die vorliegenden Bodendruckmessungen (Abb. 4.5.1-2) zeigen hier im Bereich 1 bar bis 2 bar bezüglich des Bodendrucks im Unterboden keinen deutlichen Einfluss. Die zielgerichtete Prüfung mit einem Traktor bei Überrollung ohne Zugleistung ergab in diesem Fall, dass eine Halbierung des P_i bei konservierender Bodenbearbeitung den Bodendruck in 40 cm etwa halbiert und somit einen deutlichen Effekt hat, während diese Wir-

kung auf der gepflügten Fläche nicht eintrat. Es ist zu vermuten, dass auf dem gepflügten weiche-
ren Boden eine Pi-Absenkung kaum Auswirkungen hatte, weil sich hier bereits bei höheren Pi der
Zwischenstollenbereich stärker auf dem Boden abstützt, so dass sich die Aufstandsfläche nicht
mehr deutlich vergrößerte. DANFORS (1994; zitiert in TRAUTNER und ARVIDSON 2003), ARVID-
SON et al. (2002) und KELLER u. ARVIDSSON (2004) beschreiben eine deutliche Abnahme des
Einflusses abgesenkten Reifeninnendrucks auf den Bodendruck im Unterboden von gepflügten
Böden.

Weitere, oft empfohlene Maßnahmen zur Minderung des Bodendrucks sind der Einsatz von Zwi-
lingsreifen und Gleisbändern (KELLER & ARVIDSON 2004). Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen
wird durch die vorliegenden Untersuchungen eindeutig bestätigt. Insbesondere die Wirksamkeit der
Gleisbänder ist diesbezüglich hervorzuheben. Zudem kann insgesamt die Forderung bestätigt
werden, dass zunehmende Radlasten durch überproportionale Vergrößerungen der Aufstandsflä-
che abgefangen werden sollten. Insgesamt ist aus den Untersuchungen die Schlussfolgerung zu
ziehen, dass es im Sinne der Vorsorge zweckmäßig wäre, bis etwa 4.000 kg Radlast mittlere Kon-
taktflächendrücke von 100 kPa anzustreben und bei darüber hinausgehenden Radlasten die Kon-
taktflächendrücke an 60 – 80 kPa zu orientieren, sofern feuchte Böden befahren werden sollen.
Dies entspricht im wesentlichen den bei CHAMEN et al. (2004) vorgeschlagenen Orientierungswer-
ten.

Ferner zeigen die Untersuchungen, dass die Beanspruchung des Bodengefüges durch mechani-
sche Belastungen für jede Maschine, jedes Fahrwerk, jede Einsatzsituation (Bodenfeuchte) und
jeden Standort spezifisch zu prüfen ist, weil schon bei gleichen Radlasten sehr verschiedene B-
denbeanspruchungen auftreten können. Konkrete Vorgaben und Orientierungswerte zur Maschi-
nenausstattung bei feuchten Bodenbedingungen wie oben vorgeschlagen wären hier hilfreich für
den bodenschonenden Maschineneinsatz. Im Sinne eines Benchmarking würden sie zudem auch
die Entwicklung von bodenschonenden Maschinen fördern.

Weiterhin sollte allerdings die Erfassung und Bewertung der dynamischen Bodenbeanspruchung
durch Landmaschinen und deren Fahrwerke weiter vertieft und vorangetrieben werden, da Aspekte
wie die Scherung durch Fahrwerksbelastungen und die Druckverteilung in den Aufstandsflächen
der Fahrwerke noch nicht abschließend geklärt sind. Auch bezüglich der vertikalen
Spannungseinträge bei dynamischer Belastung, sowohl hinsichtlich einer umfassenden Erhebung
als auch im Hinblick auf bessere Vorhersagemodelle, besteht weithin Forschungsbedarf. Grundlage
hierfür wären genormte Bodendruckmessungen unter praxisrelevanten Bedingungen. Leider fehlen
hierzu bisher einheitliche Verfahrensweisen und Messtechniken. Derzeit messen die wenigen
Forscherguppen, die sich mit dieser Thematik auseinandersetzen, entweder mittlere Normalspan-
nungen mit Schlauchsonden (Bolling) oder gerichtete (Normal-) Spannungen mit
Dehnungsmessstreifen (HORN 1991, KÜHNER 1997, WIERMANN 1998) oder nach hydraulischen
Prinzipien (TRAUTNER 2003, KELLER 2004). Zudem variieren Einbautiefen und -bedingungen.
Eine einheitliche Methode wäre im Sinne der Vergleichbarkeit und einer breiteren Datenbasis daher

wäre im Sinne der Vergleichbarkeit und einer breiteren Datenbasis daher sinnvoll. Nur so wird es möglich, einen umfassenden Überblick über die tatsächliche Bodenbelastung zu erhalten und aussagefähigere Modelle zur Bodendruckentwicklung unter verschiedenen Maschinen und Fahrwerken sowie Bodenbedingungen zu entwickeln. In diesem Zusammenhang steht auch bezüglich der Last- bzw. Druckverteilung in der Aufstandsfläche, vor allem bei dynamischer Belastung, weiterer Forschungsbedarf.

Ferner ist zu betonen, dass die vorliegenden Untersuchungen allein die vertikale Bodenbeanspruchung bei dynamischer Belastung zum Gegenstand hatten. Die Beanspruchung durch Knetung und Scherung wurde hingegen nicht betrachtet. Es ist zwar davon auszugehen, dass diese Faktoren kaum im Unterboden wirken (KÜHNER 1997), aber mit zunehmender Reduktion der Bodenbearbeitungstiefe oder bei mehrjährigem Futterbau sowie auf Grünland ist davon auszugehen, dass diese Faktoren zu einer zusätzlichen Bodenbeanspruchung führen. Dies bedarf zukünftig im Sinne eines umfassenden Bodengefügeschutzes, welcher auch den Oberboden mit einbeziehen sollte, einer weitergehenden Prüfung.

4.6 Schätzung des Bodendrucks

4.6.1 Schätzung nach der Newmark-Formel im Vergleich zur Messung

Bodendruckmessungen unter Maschinen sind sehr aufwendig. Zudem gibt es in der Praxis eine fast unerschöpfliche Vielfalt an Maschinenausstattungen. Zur Einschätzung des zu erwartenden Bodendrucks unter einer Maschine sind daher in der Vergangenheit verschiedene Berechnungsmodelle erarbeitet worden (siehe Kap. 2.2).

Die Modellansätze „Druckbelastungsquotient“ in KUL (ECKERT et al. 1999) sowie bei DVWK-234 (1995) geben Berechnungsverfahren vor, die auf der Gleichung von SÖHNE (1953) bzw. NEWMARK (1942) beruhen und zur Abschätzung der Bodenbeanspruchung verwendet werden.

Daher ist ein Ziel dieser Arbeit, anhand von Bodendruckmessungen zu prüfen, inwieweit sich die Bodendruckberechnung nach NEWMARK (1942) zur Schätzung des Bodendrucks eignet.

Die umgestellte Gleichung von NEWMARK nach DVWK 234 (1995) lautet:

$$\text{Mittlerer theoretischer Bodendruck } d_z = d_o \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{r}{z}\right)^2 + 1\right]^{vk}}} \right\}$$

d_o = Kontaktflächendruck [kPa];

r = Äquivalenzradius der Reifenkontaktfläche [cm];

z = Bezugstiefe

vk = Konzentrationsfaktor (Faktor für die Konzentration der Spannung um die Lastachse)

Der Konzentrationsfaktor ist ein Maß für die Form der Druckfortpflanzung im Boden. Er kann Werte zwischen 2 bis 9 annehmen, je nach dem wie hoch die Druckkompensation des Bodens ist. Ein großer Zahlenwert bedeutet eine nur geringe Druckkompensation (weiche Böden), wodurch sich der Druck in einem enger um die Lotrechte begrenzten Bodenvolumen und tiefer in den Boden fortpflanzt.

Weil in der Beratung vor allem die zu erwartenden Bodendrücke bei hoher Bodenfeuchte prognostiziert werden sollen, wurden für die Prüfung der Modellgleichung sämtliche Bodendrücke von Maschinen ausgesucht, die bei geringer Bodenwasserspannung ($pF = 2$) nahe Feldkapazität gemessen wurden. Es wurden jeweils die Bodendrücke bei der ersten Überfahrt und unter den ersten drei Achsen der Maschinen bzw. Maschinengespanne ausgewählt.

Der Konzentrationsfaktor wurde mit $vk = 5$ (weiche Böden) für die gepflügten Oberböden, und $vk = 4$ für „feste Böden um Feldkapazität“ für die konservierend bearbeiteten Böden und Unterböden, nach Vorschlägen von PAUL (2004) bzw. SÖHNE (1953) festgelegt.

Für die Schätzung der mittleren Kontaktfläche als Grundlage für die Berechnung des Kontaktflächendrucks und des Äquivalenzradius in der NEWMARK-Gleichung wurde, die allein auf den Reifenparameter beruhende Formel von INNS & KILGOUR (1978) mit $A = \text{Reifenbreite} \times \text{Reifendurchmesser} \times 0,27$, angewendet.

Die Kontaktfläche der Gleisbänder wurde aus der Breite und der Länge der aufliegenden Bandfläche berechnet.

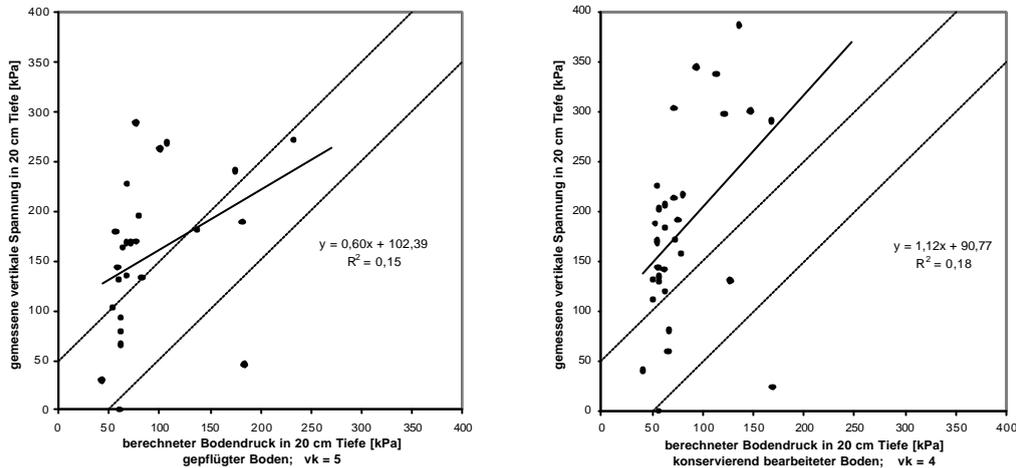


Abbildung 4.6.1-1: Vergleich gemessener vertikaler Spannungen (n = 3; DMS-Sensor) im Boden mit berechneten Bodendrücken (nach NEWMARK) in gepflügten und konservierend bearbeiteten Böden in 20 cm Tiefe bei hoher Bodenfeuchte (Wasserspannung $p_F = 2$); Kennzeichnung eines Toleranzbereiches von ± 50 kPa (= Mittelwert der Streuungen der Messwerte)

Der Vergleich der gemessenen Spannungen mit den berechneten Bodendrücken in 20 cm Tiefe zeigt keine gute Übereinstimmung der Werte. Die Abweichungen zwischen berechneten Werten und den gemessenen vertikalen Spannungen sind sehr groß (Abb. 4.6.1-1). Die meisten gemessenen Spannungen liegen weit über den berechneten Spannungen. Sie liegen bis zu 250 kPa über den berechneten Bodendrücken. Das Bestimmtheitsmaß für die Korrelation zwischen den geschätzten und gemessenen Werten ist mit 0,15 bzw. 0,18 dementsprechend nur sehr niedrig.

Der Bodendruck im Unterboden wurde aufgrund der unzureichenden Prognose des Bodendrucks für den Oberboden nicht über die einzelnen Bodenhorizonte (wie in DVWK 234 vorgeschlagen), sondern direkt über 40 cm Boden gerechnet.

Der Vergleich der gemessenen Spannungen mit den berechneten Bodendrücken in 40 cm Tiefe zeigt, dass hier die Spannungseinträge der Maschinen relativ gut geschätzt werden (Abb. 4.6.1-2). Bei konservierender Bodenbearbeitung werden allerdings die Bodendrücke bei der Berechnung tendenziell unterschätzt, während die Drücke unter den Pflegereifen (repräsentiert durch gemessene Drücke im Bereich 0-50 kPa) grundsätzlich überschätzt werden, was damit zusammenhängt, dass sich die Drücke unter den kleinen Kontaktflächen schneller als bei den größeren Kontaktflächen in die Tiefe abbauen (siehe Kap. 4.5).

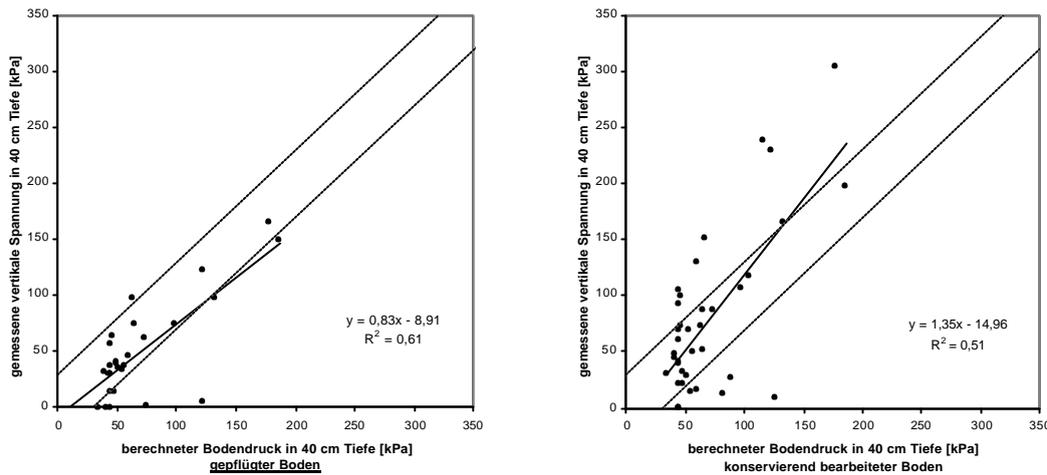


Abbildung 4.6.2-1: Vergleich gemessener vertikaler Spannungen (n = 3; DMS-Sensor) im Boden mit berechneten Bodendrücken (nach NEWMARK) in gepflügten und konservierend bearbeiteten Boden in 40 cm Tiefe bei hoher Bodenfeuchte (Wasserspannung pF = 2); Konzentrationsfaktor vk = 4; Kennzeichnung eines Toleranzbereiches von ± 30 kPa (= Mittelwert der Streuungen der Messwerte)

Die Schätzformel ist somit für den Oberboden unzureichend. Als eine Ursache sind die eingehenden Boden- und Maschinenparameter anzusehen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass der in Wirklichkeit heterogen verteilte Kontaktflächendruck, hervorgerufen z.B. durch Stollenwirkung, Reifenverformung, dynamische Befahrungseffekte sowie die Einflüsse der Bodenheterogenität durch den mittleren berechneten Kontaktflächendruck unzureichend wiedergegeben werden. Im Unterboden hingegen nivellieren sich diese Einflüsse, so dass hier die Schätzung besser wird.

Auch ist es möglich, dass sich verschiedene Effekte bis in den Unterboden gegenseitig aufheben. Die dargestellte einfache Berechnung über eine homogene, mittlere Kontaktfläche eignet sich daher nur für die Einschätzung der Bodendruckentwicklung im Unterboden.

Ferner wurde geprüft, wie die Prognosegüte der Bodendruckberechnung zu verbessern ist. Daher wurde die Berechnung der mittleren Kontaktfläche nach Bodenbearbeitung und Reifentyp differenziert:

Die tendenzielle Unterschätzung der Bodendrücke bei konservierender Bodenbearbeitung hängt unter anderem damit zusammen, dass die mittleren Kontaktflächen der meisten Reifen wahrscheinlich zu groß eingeschätzt werden.

In Lüttewitz (Abb. 4.6.1-3) und Köllitsch (Abb. 4.6.1-4). wurde exemplarisch unter Traktorhinterreifen (Traktor John Deere 3650: 18.4R38 und Traktor John Deere 4755: 710/70R38) die Reifenkontaktfläche auf verschiedenen bearbeiteten Boden gemessen. Die Gesamtkontaktfläche auf dem konservierend bearbeitetem Boden war ca. 20 % und auf Direktsaat ca. 65 % kleiner als auf dem ge-

pflügtem Boden. Auf der Direktsaat standen die Reifen nur noch auf den Stollen auf (trotz hoher Bodenfeuchte). Die berechneten mittleren Kontaktflächen stimmen relativ gut mit den gemessenen auf den gepflügten Böden überein. Die Kontaktflächen auf konservierend bearbeiteten Böden werden durch die Berechnung überschätzt, da hier die Reifen weniger in den Boden einsinken.

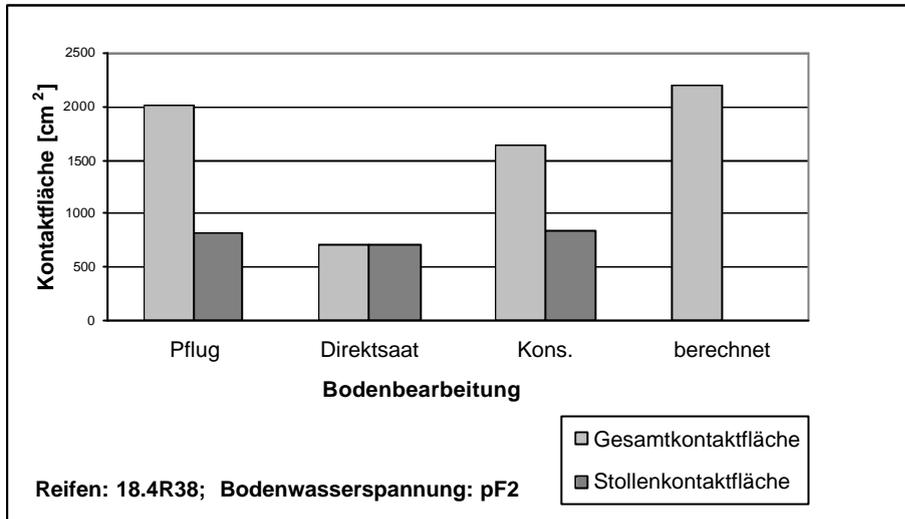


Abbildung 4.6.1-3: Gemessene Kontaktflächen und Stollenflächen im Vergleich zu berechneten Kontaktflächen unter einem Traktorhinterreifen (18.4R38; $p_i = 1,4$ bar) auf verschieden bearbeitetem Boden

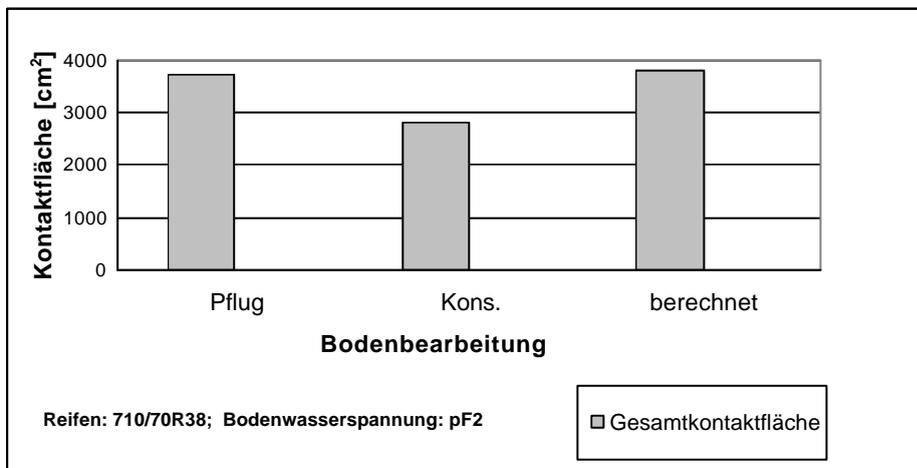


Abbildung 4.6.1-4: Gemessene Kontaktflächen im Vergleich zu berechneten Kontaktflächen unter einem Traktorhinterreifen (710/70R38; $p_i = 1,6$ bar) auf verschieden bearbeitetem Boden

Für konservierend bearbeitete Böden wurde daher die Schätzung der Kontaktfläche verändert. Die Annahme einer 20 % kleineren Kontaktfläche für Normalquerschnittreifen brachte dabei aber keine deutliche Verbesserung der Schätzung (RMSE = 49 kPa; $R^2 = 0,70$), während die Annahme einer

50 % kleineren Kontaktfläche (RMSE = 36 kPa, $R^2 = 0,76$; Tab. 4.6.1-1) für diese Reifen am besten ausfällt. Die Summe der quadratischen Abweichungen berechneter Werte von den gemessenen bei der Bodendruckberechnung in 40 cm Tiefe ist bei der Annahme einer nur halb so großen Kontaktfläche ($A = \text{Reifenbreite} \times \text{Reifendurchmesser} \times 0,13$) bei konservierend bearbeiteten Böden am kleinsten. Es wurde daher bis auf weiteres mit der halben Kontaktfläche gerechnet. Diese Methode stellt zunächst eine einfache Korrektur der Berechnung für konservierend bearbeitete Böden dar.

Die Pflegereifen sanken bei den Messungen auf feuchtem gepflügtem Ackerboden stark ein. Hier wurde durch die Kontaktflächenformel von MC KYES (1985) für weiche Böden mit $A = \text{Reifenbreite} \times \text{Reifendurchmesser} \times 0,5$ eine Verbesserung der Ergebnisse erreicht. Für Pflegereifen auf konservierend bearbeitetem Boden wurde mit $A = \text{Reifenbreite} \times \text{Reifendurchmesser} \times 0,27$ nach INNS & KILGOUR (1978) gerechnet.

Gleichzeitig wurden durch die Reduktion des Konzentrationsfaktor auf $vk = 3$ die Schätzungen für 40 cm Bodentiefe ebenfalls verbessert (Tab. 4.6.1-1 und Abb. 4.6.1-5). Die Bodendrücke unter den Pflegereifen (hier bis zu einer Reifenbreite von 32 cm) werden durch die Berechnung in 40 cm Tiefe nach wie vor stark überschätzt, da sie sich bis in den Unterboden fast vollständig abbauen (siehe Kap. 4.5.3). Es wurde daher für sie letztendlich mit einem Konzentrationsfaktor von $vk = 2$ gerechnet (Abb. 4.6.1-5, siehe gemessene Spannungen im niedrigen Bereich von 0-30 kPa).

Durch diese Annahmen konnte die Schätzung des Bodendrucks nach NEWMARK deutlich verbessert werden (Abb. 4.6.1-5). Die Ergebnisse liegen zum großen Teil innerhalb eines Toleranzbereiches von ± 30 kPa, was dem Mittelwert der Streuungen der Messwerte in 40 cm Tiefe (Streuung der Ergebnisse von drei Druckdosen) entspricht, wobei die höchste Streuung bei den gemessenen Werten bei gepflügtem Boden bei 75 kPa und bei konservierend bearbeitetem Boden bei 105 kPa liegt. Angesichts der starken Streuung der Messwerte ist die Prognosegenauigkeit mit einer mittleren absoluten Differenz von 16 kPa (Pflug) bzw. 31 kPa (Kons.) und einem Root Mean Square Error (RMSE) von 20 kPa (Pflug) bzw. 36 kPa (Kons.) relativ gut. Bei konservierend bearbeitetem Boden sind die Abweichungen der Schätzwerte von den gemessenen Werten etwas stärker.

Tabelle 4.6.1-1: Güte der Schätzung des Bodendrucks (nach NEWMARK) im Vergleich zur Messung; dargestellt als mittlere absolute Differenz und Root Mean Square Error (RMSE) in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung und Bodenhorizont (B = Reifenbreite; D = Reifendurchmesser; PR = Pflegereifen, TR = Terrareifen)

Berechnung über Bodentiefe	Bearbeitung	Kontaktfläche	Konzentrationsfaktor	Mittlere absolute Differenz [kPa]	RMSE [kPa]	Bestimmtheitsmaß der Korrelation
0 – 40 cm	Pflug Kons.	B x D x 0,27 B x D x 0,27	vk 4 vk 4	26 39	35 53	0,61 0,51
0 - 40 cm	Pflug	B x D x 0,27 (PR: B x D x 0,5)	vk 3 (PR: vk 2)	16	20	0,82
	Kons.	B x D x 0,13 (PR, TR: B x D x 0,27)	vk 3 (PR: vk 2)	31	36	0,76

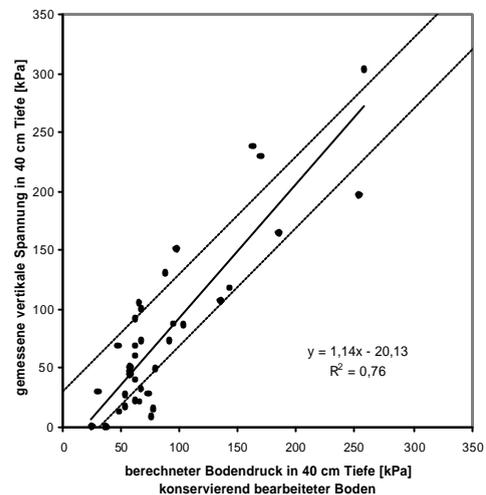
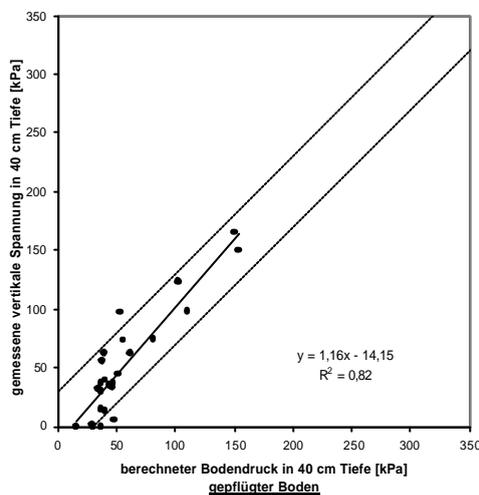


Abbildung 4.6.1-5: Korrelation gemessener vertikaler Spannungen (n = 3, DMS-Sensor) im Boden mit berechneten Bodendrücken (nach NEWMARK) in gepflügten und konservierend bearbeiteten Boden in 40 cm Tiefe bei hoher Bodenfeuchte (Wasserspannung $p_F = 2$); Konzentrationsfaktor vk = 3 (Pflgereifen: vk = 2); Kennzeichnung eines Toleranzbereiches von ± 30 kPa (= Mittelwert der Streuungen der Messwerte)

4.6.2 Diskussion

Mit der Schätzgleichung nach NEWMARK ist es möglich, Bodendrücke (in 40 cm Tiefe) mit einer relativ guten Prognosegüte zu berechnen. Für die Prognose der Bodendrücke im Oberboden ist dieses einfache Berechnungsverfahren nur bedingt geeignet. Zum großen Teil werden die gemessenen Bodendrücke unterschätzt. Dies deckt sich mit Ergebnissen von HAMMEL (1994) und

KELLER u. ARVIDSON (2004), die eine Unterschätzung der Bodendrucke bei Annahme einer homogenen Kontaktfläche beschreiben.

Der Grund für die starken Abweichungen der berechneten Bodendrucke von den gemessenen im Oberboden liegt in den von vielen Autoren (HAMMEL 1994; KELLER et al. 2002, KELLER 2004, KELLER u. ARVIDSSON 2004; KOOLEN et al. 1992; KÜHNER 1997, TRAUTNER 2003) beschriebenen, ungleichmäßigen Spannungsverteilungen innerhalb der Kontaktfläche. Die starken Streuungen der gemessenen Bodendrucke im Oberboden (siehe Kap. 4.5) sind ein Indiz für diesen Sachverhalt.

Die Schätzung nach NEWMARK (1942) bzw. SÖHNE (1953) geht von einer gleichmäßigen Spannungsverteilung innerhalb der Kontaktfläche aus. SÖHNE (1953) hatte festgestellt, dass sich die Spannungsunterschiede bereits in geringer Bodentiefe angleichen. Heute geht man aber davon aus, dass Unterschiede in der Spannungsverteilung innerhalb der Kontaktfläche tiefer in den Boden hinabreichen (KELLER 2004). Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass sich die Reifen und die Radlasten seit den Untersuchungen von SÖHNE (1953) verändert haben.

Verschiedene Autoren (GYSI, 2001; KELLER 2004; SOMMER et al. 2003) geben Lösungsvorschläge zur Einschätzung der Spannungsverteilungen in der Kontaktfläche vor.

Die Verbesserung der Prognose der Bodendrucke bei konservierend bearbeitetem Boden durch Annahme einer nur halb so großen Reifenkontaktfläche bei Normalquerschnittsreifen könnte dadurch zustande kommen, dass auf festem Boden die Druckunterschiede innerhalb der Kontaktfläche noch größer sind oder tiefer reichen und dadurch die maximalen Bodendrucke in 20 und 40 cm Tiefe höher sind.

Gewisse Abweichungen der Prognoseergebnisse von den gemessenen Werten werden auch der Tatsache geschuldet sein, dass die Radlasten der Maschinen nicht gewogen werden konnten, sondern auf Grundlage von Maschinenangaben und Bunkerinhalten geschätzt wurden. Außerdem konnten dynamische Effekte, z.B. Gewichtsverlagerung durch die Zugkräfteinwirkung während der Fahrt, nicht berücksichtigt werden.

Die Verwendung des Konzentrationsfaktors $vk = 3$ für gepflügten und konservierend bearbeiteten Boden über die gesamte Bodentiefe ist eine Anpassung zur Verbesserung der Schätzergebnisse. Der Faktor $vk = 3$ stellt einen gemittelten Wert für die Druckausbreitung in den verschiedenen Bodenhorizonten der unterschiedlichen Böden dar (nur Art der Bodenbearbeitung wurde unterschieden). Als konstanter Wert entspricht er der Annahme einer gleichmäßigen Druckausbreitung im Boden. In Wirklichkeit kann der Konzentrationsfaktor aber weder räumlich noch zeitlich betrachtet eine Konstante sein (SÖHNE 1953; DEFOSSEZ und RICHARDS, 2002). Tatsächlich wird die Druckausbreitung in die Tiefe bei jeder Messung in Abhängigkeit der Spannungsverteilung unter dem Fahrwerk, der Bodeneigenschaften und der Wasserspannung sehr heterogen verlaufen. In gepflügten, weicheren Böden wird möglicherweise ein Teil der Spannungsenergie durch Bodenverformung umgewandelt und dadurch vermindert, ansonsten wird sich hier die Spannung im Oberboden enger um die Lotrechte und tiefer nach unten fortpflanzen als im festeren Boden (siehe DVWK, 1995). Im stabileren, hier konservierend bearbeitetem Boden ist es möglich, dass der Druck stärker

kompensiert wird (WIERMANN 1998) oder im Gegenteil sich sogar stärker und direkter nach unten ausbreitet (TRAUTNER 2003, KELLER 2004).

Um gesicherte Erkenntnisse bei der Druckausbreitung zu gewinnen und mehr Sicherheit bei der Einschätzung der Kontaktfläche und Druckverteilung innerhalb der Kontaktfläche auf konservierend bearbeitetem Boden zu erlangen, sind weitergehende Untersuchungen sinnvoll.

Insgesamt ergibt sich aus den Betrachtungen zudem, dass Messungen zur Spannungsausbreitung im Boden bei dynamischer Belastung nötig sind, um die tatsächliche Bodenbeanspruchung besser einschätzen zu können. Gerade im Hinblick auf die aktuelle Maschinenausstattung in der Landwirtschaft liegen hierzu derzeit nur wenig Erkenntnisse vor.

Die Modellannahmen der NEWMARK-Gleichung sind eine starke Vereinfachung der Realität, die den komplexen Verhältnissen unter den Reifen und im heterogenen Boden im Detail nicht gerecht werden können. Dennoch sind die Prognoseergebnisse für den Unterboden hinreichend gut. Der Vergleich zwischen den Prognosewerten und den Messergebnissen auf gepflügten und konservierend bearbeiteten Böden zeigt eine relativ gute Übereinstimmung der Werte. Die Prognosegüte für gepflügte Standorte übertrifft noch die der konservierend bearbeiteten Standorte, was mehrere Ursachen, z.B. geringerer Einfluss des Reifeninnendrucks, homogeneres Gefüge im Oberboden, haben kann.

Das dargestellte einfache Modell eignet sich demnach für die Schätzung zu erwartender Bodendrucke unter landwirtschaftlichen Maschinen bei hoher Bodenfeuchte im Unterboden von gepflügten und von konservierend bearbeiteten Böden. Es kann somit statt aufwendiger Bodendruckmessungen in der landwirtschaftlichen Beratung eingesetzt werden. Es zeichnet sich dadurch aus, dass es insgesamt relativ einfach ist, da es wenige Eingangsdaten benötigt. Dies ist in Anbetracht der vorhandenen knappen finanziellen Mittel und Zeit in der landwirtschaftlichen Beratung ein wichtiger Gesichtspunkt.

Eine Verbesserung des Schätzmodells ist vor allem in Hinsicht der Wirkung verringerter Reifeninnendrücke, der Prognose des Kontaktflächendrucks bzw. der Druckverteilung in der Kontaktfläche sowie der Druckentwicklung in verschiedenen bearbeiteten Böden zukünftig im Rahmen weiterer Untersuchungen anzustreben.

4.7 Schätzmodelle für die Vorbelastung

4.7.1 Vergleich der Mess- mit Schätzwerten

Die Messung der mechanischen Belastbarkeit von Böden ist relativ aufwendig und lässt darum kaum flächenhafte Untersuchungen zu. In verschiedenen Publikationen werden daher Regressionsgleichungen zur Berechnung der Vorbelastung angegeben (DVWK 234, 1995; ATV-DVWK 901, 2002; DIN 19688, 2000). Sie basieren vor allem auf Untersuchungen von LEBERT (1989) und NISSEN (1999). Die Vorbelastung wird dabei anhand der Bodenparameter Trockenrohdichte, Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität, Totwasseranteil, Kohäsion, Winkel der inneren Reibung und Gehalt an organischer Substanz bodenartbezogen berechnet. Die selten vorliegenden Parameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung können in Abhängigkeit der Bodenart und Gefügestruktur aus Schätztabelle abgeleitet werden.

Im Folgenden wurden für die Standorte Lüttewitz, Methau, Littdorf, Köllitsch R, Köllitsch K, Köllitsch L1, Zschortau, Seehausen und Sprotta die Vorbelastungen über die Regressionsgleichungen nach DVWK 234; ATV-DVWK 901 und DIN 19688 berechnet und mit den gemessenen Werten (P_v bei 45 Minuten Setzung) verglichen. Dabei wurden für den Standort Lüttewitz die Scherparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung geschätzt, während für die anderen Standorte gemessene Werte vorlagen.

Die Ergebnisse werden in Tab. 4.7.1-1 als bodenartbezogene Mittelwerte der verschiedenen berechneten und der gemessenen Vorbelastungen mit den Standardabweichungen nebeneinander dargestellt. Bei der Schätzung mit dem DIN-Modell wurden besonders für Uls-Böden (hier am Standort Zschortau) nur sehr niedrige Werte berechnet. Bei der gepflügten und tief konservierend bearbeiteten lockeren Krume wurden die Ergebnisse sogar negativ, trotz erforderlichen Trockenrohdichten von $> 1,30 \text{ g/cm}^3$. Diese zwei Ergebnisse wurden mangels Plausibilität bei der weiteren Auswertung weggelassen.

Der Mittelwert der Vorbelastung aller 40 Proben liegt beim DVWK-234-Modell bei 142 kPa, beim ATV-DVWK 901-Modell bei 109 kPa, beim DIN-Modell bei 66 kPa und bei der Messung bei 100 kPa. Die Mittelwerte der Schluff- und Lehm Böden liegen beim ATV-DVWK 901-Modell denen der Messung am nächsten. An die gemessenen Vorbelastungen der lehmigen Sande und des Sandbodens (nur jeweils ein beprobter Boden) kommen keine Schätzwerte der verschiedenen Modelle besonders nah heran.

Tabelle 4.7.1-1: Bodenartbezogener Vergleich gemessener (pF 1,8) und geschätzter Vorbelastungen (nach DVWK 234, 1995; ATV-DVWK 901, 2002; DIN 19688, 2000) an acht sächsischen Standorten; dargestellt sind die Mittelwerte, Standardabweichung in (); n = Anzahl der beprobten Horizonte

Bodenart	n	Messwert [kPa]	Schätzwert		
			DVWK 234 (1995) [kPa]	ATV-DVWK 901 (2002) [kPa]	DIN-19688 (2000) [kPa]
Ut4	14	125 (24)	192 (60)	110 (14)	95 (13)
Ut3	7	85 (22)	110 (43)	102 (16)	41 (23)
Uls	5	104 (26)	126 (37)	94 (29)	15 (14)
Slu	6	95 (24)	100 (55)	107 (36)	60 (22)
Su2	2	54 (21)	108 (23)	118 (16)	33 (39)
Sl4	1	66	189	94	107
Sl3	1	92	134	157	48
Sl2	1	69	129	168	41
Ss	1	27	201	172	134
Lt2	2	99 (6)	69 (49)	81 (15)	66 (34)
alle Horizonte	40	100 (32)	142 (63)	109 (27)	66 (35)

Tabelle 4.7.1-2: Güte der Schätzung der Vorbelastung mit verschiedenen Modellen im Vergleich zur Messung (Mittlere absolute Differenz, Root Mean Square Error (RMSE) und Bestimmtheitsmaße (R²) zwischen den gemessenen Vorbelastungen (pF 1,8; 40 Horizonte) und den Modellergebnissen

	Messung - DVWK 234 (1995)	Messung - ATV-DVWK 901 (2002)	Messung - DIN-19688 (2000)
Mittlere absolute Differenz [kPa]	45	32	45
RMSE [kPa]	70	43	55
RMSP [%]	124	101	82
R ²	0,21	0,00	0,02

Als Maße für die Güte der Modellergebnisse sind in Tab. 4.7.1-2 die mittleren absoluten Differenzen, die Root Mean Square Errors (RSME), die mittleren prozentualen Fehler (RMSP) und die Bestimmtheitsmaße der Korrelation zwischen Messung und Modell angegeben. Die mittlere absolute Differenz und der RMSE zwischen gemessenen und berechneten Werten sind beim ATV-DVWK 901-Modell am kleinsten. Prozentual gesehen, d.h. in RMSP weichen die Schätzergebnisse des DIN-Modells im Mittel am geringsten von der Messung ab und beim DVWK-234-Modell am höchsten (einzelne Werte werden bis zu 600% überschätzt). Insgesamt betrachtet unterschätzt das DIN-Modell größtenteils die gemessenen Werte (Abb. 4.7.1-1), während das DVWK-234 Modell sie meist überschätzt.

Die Korrelation der gemessenen und berechneten Einzelwerte ist bei allen Modellen nur sehr gering (Tab. 4.7.1-1 und Abb. 4.7.1-2). Das Bestimmtheitsmaß der Korrelation ist beim DVWK 234 Modell mit R²=0,21 noch am besten.

Damit gibt das DVWK 234 Modell den Trend: zunehmende berechnete Vorbelastung bei zunehmenden Messwerten, noch am besten wieder. Die Abweichung der berechneten Werte von den Messwerten ist aber hier im Mittel am höchsten, wobei vor allem sehr hohe Abweichungen stark ins Gewicht gefallen.

Zusammengefasst betrachtet zeigt sich, dass die Schätzung der Vorbelastung mit den drei verschiedenen Modellen keine hinreichend gute Übereinstimmung zur gemessenen Vorbelastung der verschiedenen Standorte ergibt.

Lediglich über die Mittelwertbildung über alle gemessenen und die mit den jeweiligen Modellen geschätzten Vorbelastungen ist eine Übereinstimmung zu erzielen. Wobei die Mittelwerte, der mit dem ATV-DVWK 901-Modell geschätzten Vorbelastungswerte mit denen der Messungen im Ganzen noch am besten übereinstimmen.

Für die Einschätzung der Vorbelastung eines ausgesuchten Standortes bzw. einer bestimmten Bodenart liefern die vorliegenden Modelle zum derzeitigen Stand daher noch zu unsichere Ergebnisse.

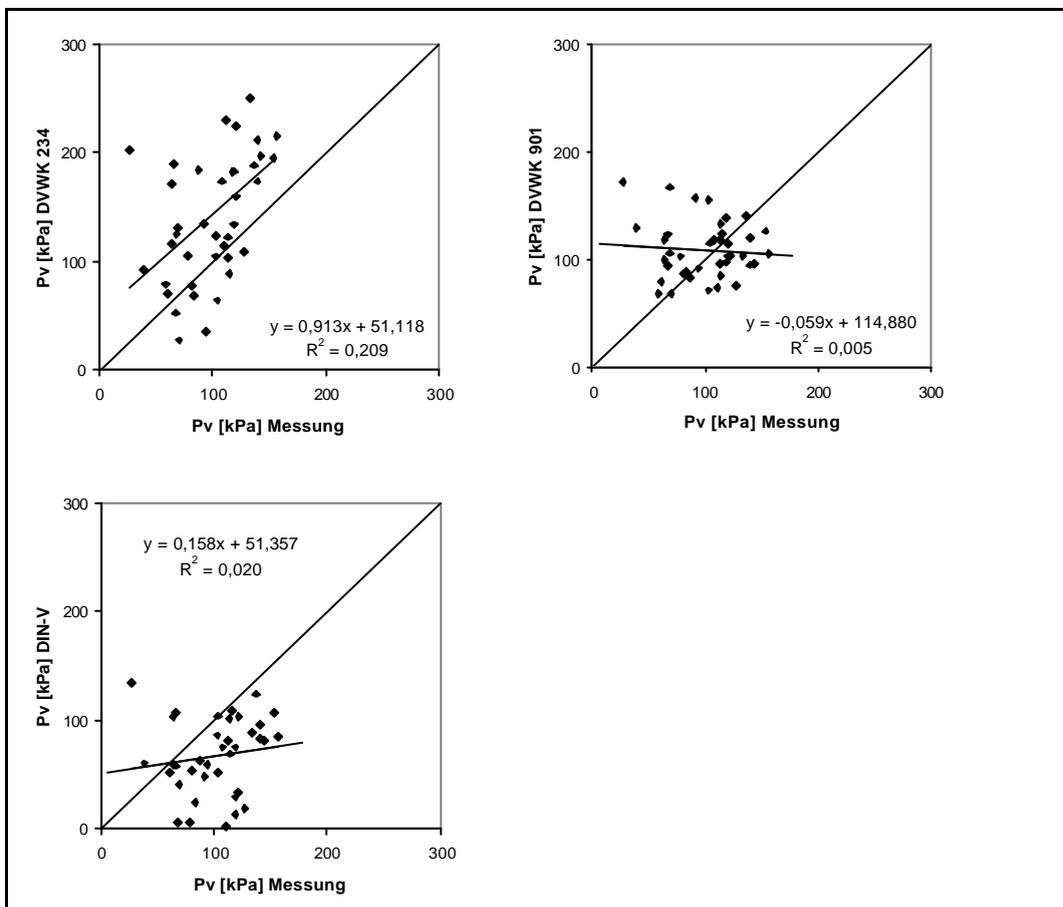


Abbildung 4.7.1-1: Korrelationen zwischen gemessenen Vorbelastungen (pF 1,8) und berechneten Werten nach DVWK 234-, ATV-DVWK 901- und DIN 19688-Modell (mit dargestellten Regressionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße)

4.7.2 Diskussion

Bei der Berechnung der Vorbelastung über Regressionsgleichungen nach DVWK 234; ATV-DVWK 901 und DIN 19688 für die ausgesuchten Standorte ergeben sich, wie oben dargestellt, oft starke Abweichungen zu den gemessenen Werten. Das DVWK-234-Modell überschätzt häufig die Vorbelastungen während das DIN-Modell sie eher unterschätzt. Hierfür könnten verschiedene Ursachen möglich sein:

Bei der Anwendung der Modellrechnungen sind die gemessenen Scherwiderstandsparameter eingesetzt worden. Im Vergleich zu den in den Modellen zur Verfügung gestellten Schätzwerten der Scherparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung sind die gemessenen Werte zum Teil sehr verschieden. LEBERT & HORN (1992) weisen aber darauf hin, dass bei den von ihnen vorgeschlagenen Regressionsmodellen (DVWK 234; 1995) für Landschaften außerhalb Bayerns die Scherwiderstandsparameter separat ermittelt werden müssen. Es wurden daher die zur Verfügung stehenden, gemessenen Scherparameter zur Berechnung benützt.

Weiterhin ist zu beachten, dass die Schätzmodelle auf der Basis von Vorbelastungsmessungen mit 23 Stunden Setzungsdauer kalibriert wurden.

Für die in Sachsen gemessenen Werte gilt lediglich eine Setzungsdauer von 45 Minuten. Nach (HORN, 1991) dürfte diese kürzere Setzungsdauer eher den Bedingungen einer Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen entsprechen. Da mit zunehmender Setzungsdauer der Vorbelastungswert eher abnimmt, dürften die gleichen Messwerte bei 23 Stunden Setzung eher noch niedriger werden und dann möglicherweise näher an der DIN-Schätzung liegen und sich stärker von den anderen Schätzungen entfernen.

PAUL (2004) wiederum erhielt bei der Messung der Vorbelastung an Thüringer Böden, mit fünfmaliger Kurzzeitbelastung (keine Zeitangabe) mit Be- und Entlastung, Vorbelastungswerte, die gut mit den Schätzwerten nach DVWK 234 (Kalibrierungsdaten: 23 Stunden Setzungsdauer) übereinstimmen, dargestellt an vier untersuchten Böden bzw. sechs Horizonten. Dies kann bedeuten, dass der Setzungsdauer keine entscheidende Bedeutung zukommt.

Es bleibt daher zunächst ungeklärt, weshalb die Schätzwerte für die dargestellten Böden häufig stark von den gemessenen Werten abweichen.

Da die Anwendungen den Vorgaben entsprechen, wird davon ausgegangen, dass die Regressionsgleichungen zur Schätzung der Vorbelastung auf die dargestellten untersuchten Böden in Sachsen nicht übertragbar sind. Möglicherweise sind die Bodeneigenschaften der gemessenen Standorte im Vergleich zu denen der Kalibrierungsstandorte zu verschieden.

Untersuchungen anderer Autoren bestätigen eine unsichere Übertragbarkeit der Regressionsmodelle auf weitere, nicht zur Modellerstellung verwendete, und damit unabhängige Datensätze. Untersuchungen von SCHÄFER-LANDEFELD & BRANDHUBER (2001) an 195 Bodenhorizonte in Bayern zeigen ebenfalls einen nur geringen Zusammenhang zwischen modellierten und gemessenen Vorbelastungswerten. Sie kommen zu dem Schluss, dass die Regressionsmodelle in DVWK-

1997 (entspricht ATV-DVWK 901) und in DIN 19688 für die Beschreibung ihrer Daten nicht geeignet sind.

NISSEN (1999) zeigte in seiner Arbeit, dass mit den Regressionsgleichungen in DVWK 234 (1995) Schätzfehler von 58 bis 85 % auftreten und FELDWISCH (2000) ermittelte mit Daten von sächsischen Bodendauerbeobachtungsflächen erhebliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Modelle. Der DVWK-234-Ansatz führte auch hier zu überwiegend höheren Vorbelastungswerten im Vergleich zum DIN-Modell. Außerdem führt FELDWISCH (2000) in seiner Arbeit auch erhebliche interne Widersprüche der Modelle auf, die vor allem der mangelnden physikalischen Plausibilität der einzelnen Gleichungen geschuldet sind.

LEBERT & SCHÄFER (2005) unterschieden daher in einem weiteren Schritt die Eignung der verschiedenen Modelle zur Vorhersage der Vorbelastung nach der Bodenart. Durch Abgleich der berechneten Vorbelastungen von 46 Bodendauerbeobachtungsflächen in Niedersachsen mit vorhandenen gemessenen Vorbelastungsdaten aus dem ganzen Bundesgebiet (aus LEBERT 1989 und NISSEN 1999) schlagen sie geeignete Regressionsgleichungen in Abhängigkeit der Bodenart für Niedersachsen vor. Eine Überprüfung der Übertragbarkeit der Modelle durch gemessene niedersächsische Werte erfolgte nicht.

Fazit:

Die Verwendbarkeit der Schätzmodelle in Sachsen bleibt unsicher. Der Vergleich von gemessenen Vorbelastungen mit den Schätzwerten zeigte bei allen verwendeten Modellen eine nur geringe Übereinstimmung.

Für Sachsen wird daher zunächst vorgeschlagen, sich bodenartbezogen an den vorhandenen Messwerten zu orientieren. Eine Erweiterung der Datenbasis ist zweckmäßig, um möglichst noch standortspezifischere Aussagen treffen zu können.

4.8 [Entscheidungshilfe Bodendruck](#)

4.8.1 Grundlagen

Das Ziel der Entscheidungshilfe Bodendruck ist es, maschinen- und standortspezifisch abzuschätzen, welches Verdichtungsrisiko bei der Befahrung feuchter Böden besteht.

Hierzu stellt das Vorbelastungskonzept nach DVWK (1995) die Grundlage dar. Um das Verdichtungsrisiko bei der Befahrung durch verschiedene Maschinen und Geräte beurteilen zu können, ist es nötig, die Bodenbelastung im Verhältnis zur Stabilität des Bodens zu bewerten. Hierbei ist die Vorbelastung (Kap. 4.3.1) als Orientierungswert für die Bodenstabilität ein geeigneter Parameter. Die vertikale mechanische Beanspruchung des Bodens kann anhand von gemessenen oder berechneten Bodendruckwerten in geeigneter Weise eingeschätzt werden (Kap. 4.5 und 4.6).

Aufgegriffen wurde diese Verfahrensweise in modifizierter Form bereits durch den sogenannten „Belastungsquotient“ nach PAUL (1993), welcher Bestandteil des Umweltaudits gemäß „KUL“ (Kriterien umweltverträglicher Landbewirtschaftung) nach ECKERT et al. (1999) ist. Hierbei wird die Belastungssituation eines Betriebes bzw. Produktionsverfahrens im Durchschnitt aller belastungsintensiven Arbeiten betrachtet und bewertet. Eine Zuordnung zu einzelnen Maschinen erfolgt nicht. Das Schweizer Modell „TASC“ von DISERENS & SPIESS (2004) zur Bewertung der mechanischen Beanspruchung von Böden baut im Grundsatz auch auf das Vorbelastungskonzept, orientiert sich hierbei allerdings an den im Rahmen von Befahrungsversuchen an ausgesuchten Standorten festgestellten Veränderungen des Bodengefüges. Im Gegensatz zum Vorgehen nach KUL ist das Vorgehen bei „TASC“ darauf ausgerichtet einzelne Maschinen zu bewerten.

Die Konzepte „Belastungsquotient“ und „TASC“ haben das Vorbelastungskonzept zum Teil modifiziert. Während dieses auf die Erhaltung eines insgesamt optimalen Zustandes des Bodengefüges ausgerichtet ist, sind die Konzepte „Belastungsquotient“ und „TASC“ mehr auf den pflanzenbaulich noch tolerierbaren Gefügestand ausgerichtet. Dadurch wird z.B. lockeren Böden eine „tolerierbare Verdichtung“ zugestanden. Für die Bezugsgröße Bodenstabilität wird hierbei ein bodenart- und standortabhängiger Referenzwert der Vorbelastung bestimmt, der jeweils mit bestimmten Gefügeeigenschaften (Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit bzw. effektive Lagerungsdichte) korreliert. Er wird jeweils Bodenart bezogen anhand der Regressionsmodelle nach LEBERT (1989) und Datensätzen von Qasem et al. 2000 und FAL 2003 (zitiert in DISERENS und SPIESS 2004) bestimmt.

Gemeinsam ist beiden Modellen, dass die Gefährdungseinschätzung für feuchte Bodenverhältnisse vorgenommen wird. „TASC“ betrachtet die Verdichtungsgefahr bei einer Wasserspannung um Feldkapazität von pF 1,8, während das Modell „Belastungsquotient“ von pF 2,5 ausgeht. Bei beiden Modellen stehen die untere Krume und der Unterboden im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Das Konzept für die Entscheidungshilfe Bodendruck in Sachsen beinhaltet verschiedene Komponenten der oben genannten Ansätze. Zum einen hat es das Vorbelastungskonzept nach DVWK (1995) zur Grundlage. Zum anderen dient sie, wie das Modell „TASC“, der Bewertung einzelner Maschinen und Arbeiten bei feuchten Bodenbedingungen im Bereich der Feldkapazität.

Bei den Untersuchungen zur Vorbelastung in Sachsen hat sich herausgestellt, dass die Ableitung der Vorbelastung aus physikalischen Bodendaten durch die Pedotransferfunktionen nach DVWK 234 (1995), ATV-DVWK 901 (2002) und DIN 19688 (2000) in Sachsen nicht zu befriedigenden Ergebnissen führt (Kap. 4.7) und auch die Korrelation der Vorbelastung zu den Gefügeeigenschaften Trockenrohdichte, Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit nicht besonders hoch war (Kap. 4.4). Daher orientiert sich die Entscheidungshilfe zunächst an vorhandenen Messwerten. Allerdings werden nur solche Werte verwendet, bei denen die Parameter für die ökologische Funktionalität gut bis ausreichend im Sinne der Grenzwertbetrachtung nach LEBERT et al. (2004) und WERNER & PAUL (1999) eingestuft wurden. Dieser Gefügezustand soll möglichst erhalten werden.

Da bisher nicht flächendeckend Vorbelastungswerte in Sachsen vorliegen, verwendet die Entscheidungshilfe das bodenartbezogene Mittel vorhandener Messwerte mit Streubreite als Orientierungsgröße (siehe Kap. 4.3, Tab. 4.3.1-3). Für die Darstellung einer Vorbelastungsspanne spricht der Umstand, dass der Vorbelastungswert nach KELLER (2004) und BERLI et al. (2003) ohnehin kein exakter Grenzwert am Übergang vom elastischen zum plastischen Bereich ist, sondern eher einen Bereich charakterisiert, in dem plastische Gefügeveränderungen eintreten können (siehe Kap. 4.3).

Zu erwähnen ist, dass verschiedentlich die Verwendbarkeit der Vorbelastung als Orientierungswert für die mechanische Beanspruchung von Böden in Frage gestellt wird, da sie im Labor mittels Langzeitbelastung (hier 45 Minuten je Laststufe, meist 23 h) ermittelt wird, während die Befahrung durch landwirtschaftliche Maschinen eine Kurzzeitbelastung im Sekundenbereich darstellt. Hierzu ist festzustellen, dass diese Frage zwar nicht abschließend geklärt ist, trotzdem aber die vorliegenden Werte im Rahmen der betrieblichen Beratung eine geeignete Orientierung geben. Insbesondere ist hier der Vorsorgeaspekt zu beachten. So kann davon ausgegangen werden, dass eine kurzzeitige mechanische Beanspruchung, die im Streubereich der Vorbelastung des Bodens liegt, sehr wahrscheinlich zu keiner weiteren plastischen Verformung des Bodengefüges führt. In diese Abwägung sind zudem zwei weitere Aspekte mit einzubeziehen:

1. In der Regel erfolgt die Bodenbeanspruchung im Rahmen von Mehrfachüberrollungen mehrmals im Jahresverlauf.
2. Die vorliegenden Messungen zum Spannungseintrag zeigen eine starke Streuung der kurzzeitigen Beanspruchung. Die Werte liegen zum Teil zwei- bis dreifach über der Vorbelastung.

Eventuell enthält der jeweilig verwendete Wert der Vorbelastung gewisse Reserven, die derzeit aber nicht spezifiziert werden können, die aber sicherlich im Sinne der Vorsorge vertretbar sind.

Vorbehaltlich zukünftig weitergehender Klärungen der Sachverhalte, ist das Vorgehen daher im Rahmen der Betriebsberatung und zur Konkretisierung der Vorsorge geeignet und zweckmäßig.

Im Mittelpunkt der Entscheidungshilfe steht der Unterboden (hier in 40 cm Tiefe), da bei der Vorsorge gegen schädliche Gefügeveränderungen vor allem der Schutz des Unterbodens gefordert ist. Gefügeregenerationen durch Bodenbearbeitung oder Bodenleben sind in dieser Tiefe nur sehr eingeschränkt bzw. sehr langsam möglich, dadurch können Verdichtungen jahrzehntelang bestehen bleiben.

Die zugrunde gelegte Bodenfeuchte nahe Feldkapazität bei einer Wasserspannung von pF 1,8 stellt einen sehr druckempfindlichen Zustand der Böden dar und kommt unter anderem häufiger im Frühjahr sowie im Spätsommer und Herbst vor (Abb. 4.8.1-1). Nach starken Niederschlägen können im unteren Krumbereich und im Unterboden noch hohe Bodenfeuchten vorhanden sein, selbst wenn sich die Bodenoberfläche als wieder befahrbar darstellt (siehe Abb. 4.1: Zeitraum 16.10.-07.11.2001).

Da derartige Differenzierungen (Ober-/Unterboden) in der Praxis nicht möglich sind, orientiert sich die Entscheidungshilfe vorsorglich an den druckempfindlichen Bodenzuständen, die in der Praxis auftreten.

Für die Einschätzung der Bodenbeanspruchung wird die NEWMARK-Gleichung (DVWK 1995) verwendet. Die im Kapitel 4.7 erläuterten Anpassungen der Gleichung an die Bodendruckmessungen erlauben eine relativ gute Schätzung der Bodendrucke in 40 cm Bodentiefe. Die Ergebnisse können daher als gute Annäherung an die Wirklichkeit gesehen werden.

Bei der Konzipierung der Entscheidungshilfe wurde Wert darauf gelegt, dass das Modell mit so wenig Eingangsparametern wie möglich auskommt, weil in der landwirtschaftlichen Praxis und Beratung gewöhnlich wenig Zeit und Mittel zur Verfügung stehen, diese zu erheben. Zudem soll das Modell möglichst leicht verständlich und einfach anzuwenden sein, um Eingang in die Praxis zu finden.

In Ermangelung entsprechender Daten ist die Entscheidungshilfe zunächst nicht für Ackerböden mit einem hohen Steinanteil oder organische Böden ausgelegt.

Die Wirkung von veränderten Reifeninnendrückerücken kann nur dann eingeschätzt werden, wenn die Innendrückerücken entsprechenden Aufstandsflächen bekannt sind.

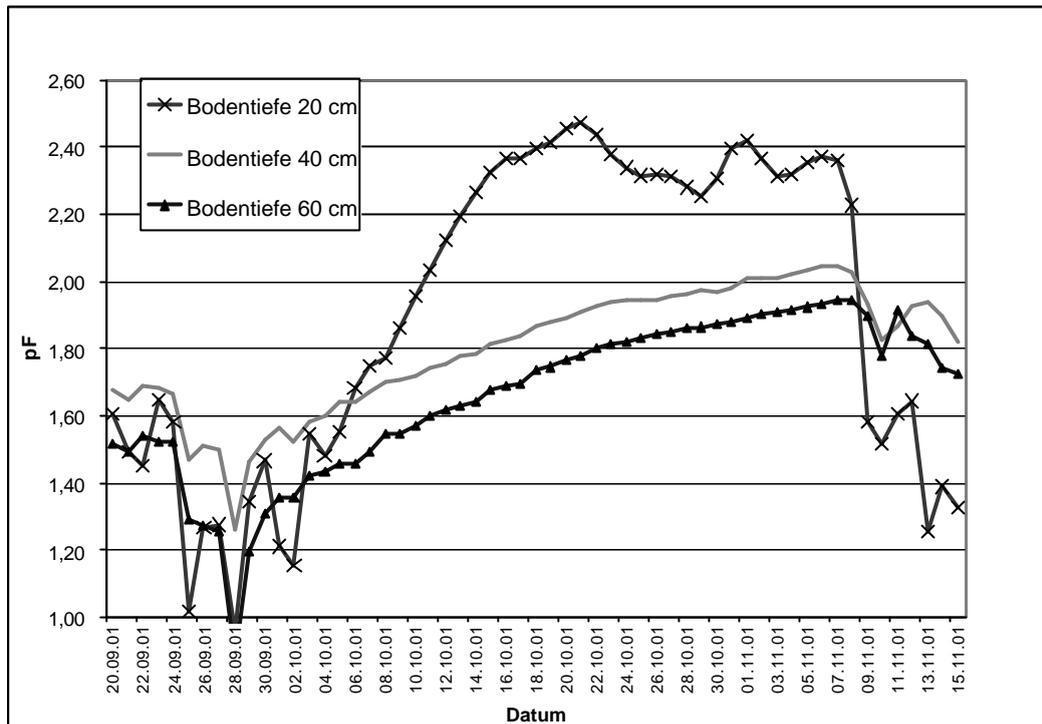


Abbildung 4.8.1-1: Verlauf der Wasserspannung in verschiedenen Bodentiefen im Herbst 2001 in Köllitsch (Körnungsart: SI 4)

4.8.2 Ziel der „Entscheidungshilfe Bodendruck“

Die „Entscheidungshilfe Bodendruck“ ist konzipiert, um für den Einsatz von bestimmten Maschinen und -kombinationen auf dem Acker einen vergleichenden Überblick zur mechanischen Beanspruchung des Bodens zu geben. Dadurch können Optimierungsmöglichkeiten im Maschineneinsatz im Sinne eines vorsorgenden Bodengefügeschutzes sichtbar werden. Der Berater bzw. Landwirt kann anhand der Analyse einschätzen, welche Möglichkeiten und Grenzen in seinem Betrieb zum bodengefügeschonenden Maschineneinsatz bestehen und ein entsprechendes Bewusstsein entwickeln.

Nur so ist das Optimierungspotenzial in einem Betrieb zu erkennen und zu nutzen. Hierbei ist die Entscheidungshilfe im Rahmen der aktuellen Einsatzplanung nutzbar, z. B. bei der bodenfeuchteabhängigen Entscheidung zur Fahrwerksausstattung (z.B. Zwillingsreifeneinsatz). Ferner kann bei der Neuanschaffung von Maschinen und Reifen der Aspekt der Bodenschonung überprüft werden.

Das Erkennen diesbezüglicher Grenzen von Maschinen ist auch insofern wichtig, weil so konkretere Anforderungen zum Bodengefügeschutz gegenüber der Landmaschinenindustrie formuliert werden können.

4.8.3 Vorgehen

Für die Berechnung zu erwartender Bodendrücke und mittleren Kontaktflächendrücke sowie anschließender Analyse der Gefährdungssituation wurde eine einfache Excel-Anwendung entworfen. In nachvollziehbaren Schritten werden dabei für jeden Arbeitsgang eines Betriebes die zu erwartenden Bodendrücke (vertikal) für den Unterboden berechnet und der Stabilität des Bodengefüges (mechanische Vorbelastung) gegenübergestellt (Abb. 4.8.3-1).

Liegen die berechneten Bodendrücke der Maschinen im Bereich der Vorbelastung der betreffenden Bodenart, ist die Wahrscheinlichkeit gering, dass der Boden sich durch deren Einsatz weiter verdichtet. Liegt der Bodendruck von Maschinen über dem Bereich der üblichen Vorbelastung, kann hingegen der Einsatz dieser Maschinen bei feuchten Bodenbedingungen möglicherweise zu einer allmählichen Verdichtung des Unterbodengefüges führen.

In der Excel-Anwendung erscheinen nach Eingabe der Maschinendaten (statische Radlast, Reifendurchmesser und -breite, siehe Abb. 4.8.3-2) die berechneten mittleren Kontaktflächendrücke und Bodendrücke (numerisch und graphisch) der Arbeitsgänge in 40 cm Bodentiefe für die verschiedenen Bodenarten (Lehm, Schluff und Sand).

Die einzelnen Maschinen lassen sich untereinander kombinieren und es wird jeweils der Arbeitsgang benannt bzw. zugewiesen. Mit der Zuweisung des Arbeitsganges sind verschiedene Berechnungsalgorithmen zum Beispiel bezüglich der Ausgangsbodentiefe (konventionelles Pflügen), Hinterachsbelastung des Traktors bei Grundbodenbearbeitung, verbunden (Abb. 4.8.3-3).

Dies ermöglicht einen guten Überblick über die Maschinenausstattung eines Betriebes und lässt in einer Gesamtsicht die bei hoher Bodenfeuchte kritischeren Maschinen und Arbeitsgänge erkennen.

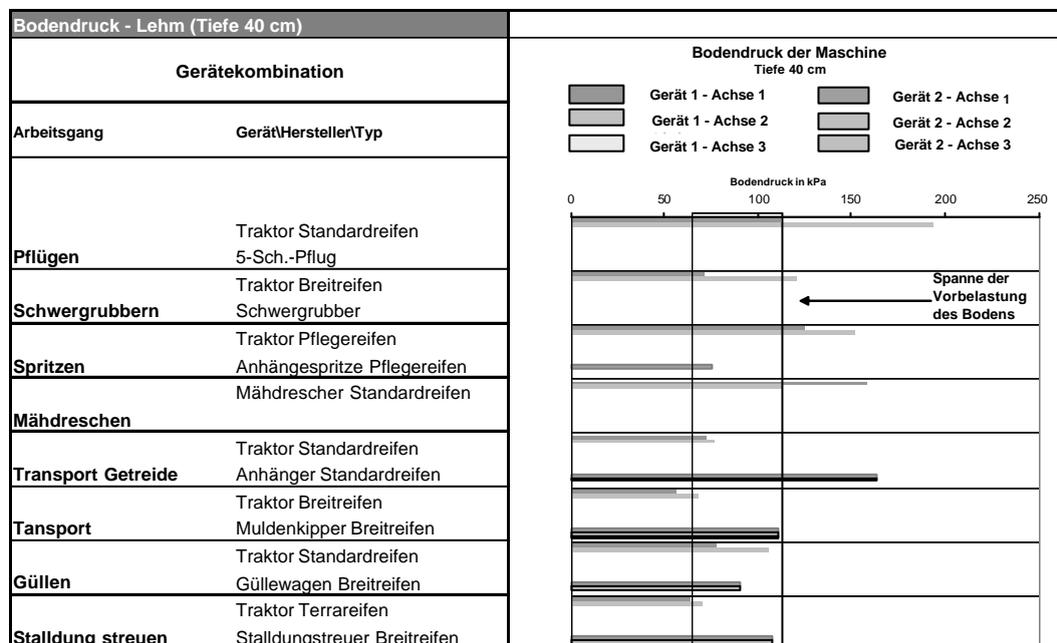


Abbildung 4.8.3-1: Ausgabemaske der Entscheidungshilfe Bodendruck (Beispiel: Ist-Analyse der Arbeitsgänge) für einen Lehmstandort

Grunddaten		Achse 1 (vorn)				
Nr.	GerätHerstellerTyp	Gesamtlast des Anbaugerätes (vorn) [kg]	Dimension	Radlast [kg]	Reifen Ø [cm]	Reifen Breite [cm]
59	Wender_Krone_Swadro 1250		500/50-17	184	94	50
60	Schwader_Fella_TS630/Hydro	650	215/65-15 6PR	325	65	21
61	Ballenladewagen_Delitzsch_BLW 2.2	600	11.5/80-15.3 LX	1850	87	29
62	Güllewagen_Annaburger_HTS100.27	1500	16.0/70-20	2875	110	42
63	Güllewagen_Annaburger_HTS102.27	2000	550/60-22.5	3000	124	55
64	Güllewagen_Fuchs_PT14T	1500	600/55-26.5	4125	133	59
65	StallDStreuer_Annaburger_HTS 100.04	1550	550/60-22.5	3000	124	55
66	StallDStreuer_Annaburger_HTS 141.04	2000	600/55-26.5	4000	133	59
67	Muldenkipper_Annaburger_HTS 29.12	2000	700/50-22.5	4500	127	70
68	Muldenkipper_Fliegel_TDK 180	2000	600/55-22.5	4500	124	60
69	Muldenkipper_Annaburger_HTS 20.12	1800	600/55-26.5	4550	133	59
70	Anhänger_HW80_Lomma_ZDK1802_U		18R 22.5	4500	115	46
71	Anhänger_HW80_Lomma_Neuaufb_(f_Getr_)		16/70-20	3000	110	42
72	Anhänger_HW80_Lomma_Neuaufb_(f_Häcks_)		12R20	3000	105	33
73	Anhänger_Fortschritt_HW80.11_(Normalaufbaut_)		16/70-20 ND	2750	110	42
74	Rübenroder_Kleine_SF10		(v)710/70R38	6500	193	72
75	Scheibenmäher_Krone_AMT 4000 CV	1200	15/55-17	600	85	39

Abbildung 4.8.3-2: Ausschnitt aus der Eingabemaske für die Maschinendaten

Gerätekombinationen						
Nr.	Frontballastierung bzw. Gewicht Frontanbaugerät [kg]	Gerätekombination		Arbeitsgang	Beschreibung Arbeitsgang	
1		Traktor_John Deere_4055	3-Sch.-Pflug_Frost_MOS	Pflügen		
2		Traktor_John Deere_7710	5-Sch.-Pflug_Lemken_Vari-Opal	Pflügen		
3		Traktor_Fendt_Favorit 824	6-Sch.-Pflug_Rabe_Marabu Varian	Pflügen		
4		Traktor_Case_MXM 155	Schwergrubb_Köckerling_SGB7/2	Schwergrubbern		
5		Traktor_Ford (New H_)_8870	Schwergrubb_Rabe_GH385	Schwergrubbern		
6		Traktor_Fendt_Favorit 824	Scheibenegge_Rabe_Seedler48	Scheibeneggen		
7		Traktor_Ford (New H_)_8870	leichte ScheibEgge_Väderstad_Car	Scheibeneggen		
8		J.D. 7710 mit Zwilling (hint.) f. Bo-	Saatbettkomb_BBG_Europak 6000	Anderes		Saatbettbereitung
9		Traktor_John Deere_7710	Saatbettkomb_BBG_Europak 6000	Anderes		Saatbettbereitung
10		Tr. Fendt Fav.824 (mit Zwilling hin	Saatbettkomb_BBG_Multipak MPK*	Anderes		Saatbettbereitung
11		Traktor_Fendt_Favorit 824	Saatbettkomb_BBG_Multipak MPK*	Anderes		Saatbettbereitung
12		Traktor_John Deere_4755	Bestellkomb_Amazon_AD302	Anderes		Aussaat

Abbildung 4.8.3-3: Excel-Tabellenblatt zur Gerätekombination und Zuweisung des Arbeitsganges (alle eingegebenen Maschinen erscheinen automatisch in den Pull-Down-Menüs)

In der Abb. 4.8.3-1 ist beispielhaft die Analyse der Bodendrucke für 8 Arbeitsgänge auf Lehmboden dargestellt. Die zu erwartenden Bodendrucke sind als horizontale Balken im Balkendiagramm abgebildet und sind den jeweils auf der rechten Seite aufgelisteten Maschinen zugeordnet. Der Bereich der üblichen Vorbelastung (Mittelwerte der gemessenen Vorbelastungen dieser Bodenart) ist im Diagramm sichtbar. In diesem Beispiel übersteigen die Arbeitsgänge Pflügen, Schwergrubbern, Spritzen und Dreschen sowie der Transport von Getreide den Bereich der Vorbelastung. Hier sollte daher der Bedarf zur Vorsorge näher geprüft werden.

Insbesondere unter feuchten Bodenbedingungen sollten für diese Arbeitsgänge vorsorglich bodendruckmindernde Lösungen gesucht werden. Diese könnten z.B. wie folgt aussehen: Pflügen wird durch Onland-Pflügen ersetzt, die Pflegereifen der Spritze werden durch Standardreifen ausgetauscht, der Mähdrescher wird bei hoher Bodenfeuchte mit Zwillingssreifen gefahren und der Getreideanhänger wird im beladenen Zustand nicht mehr über Ackerboden gezogen. Im Ergebnis liegen die Bodendrücke im Unterboden beim Pflügen, Spritzen und Dreschen im Bereich der Vorbelastung (Abb. 4.8.3-4). Sind technische Änderungen an den Maschinen zur Minderung (z.B. Montage von Zwillingssreifen des Bodendrucks nicht möglich), dann bleibt z. B. die Möglichkeit trockenere Bodenbedingungen abzuwarten oder die Radlasten durch geringeren Befüllungsgrad der Maschine zu senken.

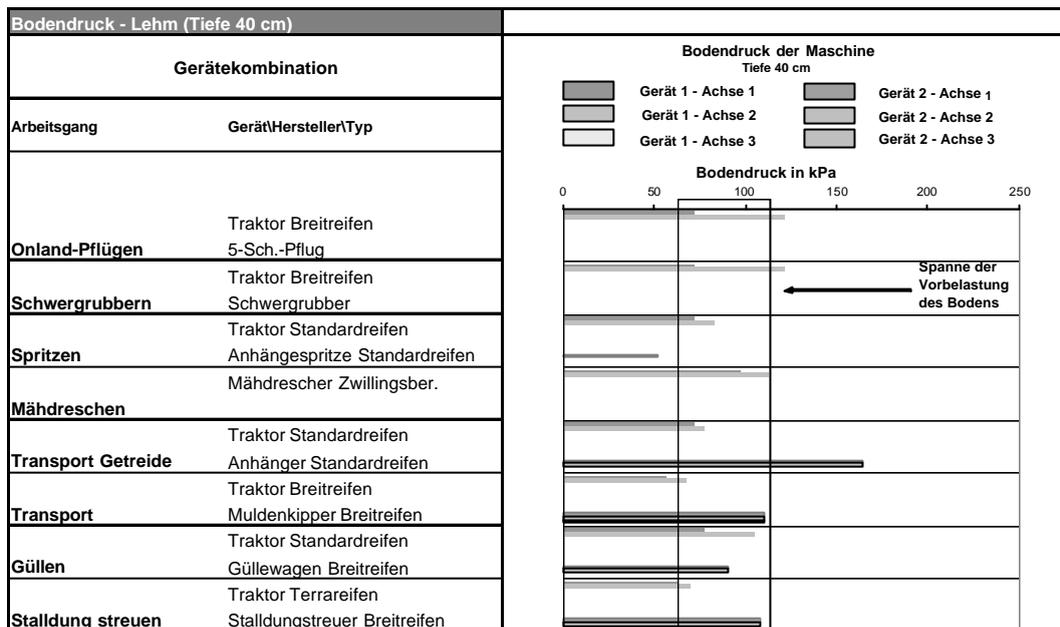


Abbildung 4.8.3.4: Ausgabemaske der Entscheidungshilfe Bodendruck (Analyse Anpassungsmaßnahmen) für einen Lehmstandort

5 Zusammenfassung

Mit der Untersuchung der mechanischen Belastbarkeit von 32 Praxisschlägen unterschiedlicher Bodenbearbeitung an 16 Standorten in Sachsen wurde eine erste Quantifizierung der Bodenstabilität repräsentativer Standorte gewonnen. Gleichzeitig konnte durch die Maschinenerhebung in 22 sächsischen Agrarbetrieben und durch Bodendruckmessungen unter 33 Maschinenkonstellationen in über 80 Messungen auf verschiedenen Praxisschlägen ein umfassender Überblick zur mechanischen Beanspruchung verschiedener Landmaschinen und bodengefügeschonender Maßnahmen gewonnen werden. Aus den daraus abgeleiteten Erkenntnissen wurde eine rechnergestützte Entscheidungshilfe zum bodengefügeschonenden Maschineneinsatz für Sachsen entwickelt.

Untersuchungen zum Gefügestand der 32 unterschiedlich bearbeiteten Ackerschläge ergaben, dass die Ausgleichs- und Regelungsfunktionen des Gas- und Wasserhaushaltes in den Böden durch überwiegend hohe gesättigte Wasserleitfähigkeiten gegeben waren. Die Luftkapazitäten in den Unterböden waren aber bei einem Drittel der untersuchten Schluff- und Lehmstandorte mit weniger als 5 Vol.-% dennoch in einem pflanzenbaulich kritischen Bereich.

Die Druckstabilitäten der meisten Böden liegen im Ober- und Unterboden in einem mittleren Vorbelastungsbereich von 60 kPa bis 120 kPa. Dabei lässt sich ein deutlicher Einfluss der Bodenart erkennen. Die sandigen Diluvial-Standorte sowie die Auenstandorte hatten mehrheitlich sehr geringe bis mittlere Vorbelastungen von unter 30 kPa bis 90 kPa, während die lehmigen Lößstandorte und die lehmigen Diluvial-Standorte überwiegend mittlere bis sehr hohe Vorbelastungen (60 kPa - 150 kPa) aufwiesen.

Konservierend bearbeitete Oberböden (in 20 cm Bodentiefe) sind erwartungsgemäß stabiler als die gepflügten Vergleichshorizonte. Sie haben in der unteren Krume im Mittel eine gleich hohe Vorbelastung wie im Unterboden. In den Unterböden unterscheiden sich die Vorbelastungen an einem Standort in Abhängigkeit des Bodenbearbeitungssystems kaum.

Da die Luftkapazitäten im Unterboden vor allem bei den strukturschwachen Schluffböden (kohärentes oder plattiges Gefüge) sehr gering sind und mit steigenden Vorbelastungen tendenziell noch weiter abnehmen, ist besonders bei diesen Böden eine weitere Überschreitung der Vorbelastung durch mechanische Belastung zu vermeiden.

Die Maschinenerhebung und die Bodendruckmessungen zeigen, dass die deutlich höchsten mechanischen Bodenbeanspruchungen bei der organischen und mineralischen Düngung, dem Mähdrusch, dem Erntetransport und bei den Zuckerrübenrodern festzustellen sind. Die Beanspruchung des Bodens übersteigt die mittlere gemessene Vorbelastung zum Teil um das zwei- bis dreifache, so dass hinsichtlich des Bodengefügeschutzes Anlass zur Vorsorge besteht. Daher sollten vorrangig für diese Maschinengruppen Minderungsmaßnahmen ergriffen bzw. weiterentwickelt werden.

Die Wirksamkeit von bodengefügeschonenden Maßnahmen (Onland-Pflügen, Reifeninnendruckabsenkung, Einsatz von Zwillingstreifen und Gleisbändern) konnte durch die vorliegenden Untersuchungen bestätigt werden. Bezüglich hoher Radlasten (über vier Tonnen) zeigte sich, dass durch

überproportionale Kontaktflächenvergrößerung durch Zwillingsreifen oder Gleisbänder eine schonende Lastabstützung bei feuchten Bodenverhältnissen möglich ist. Wichtig ist eine gleichmäßige Lastverteilung in der Aufstandsfläche.

Insgesamt lässt sich aus den Untersuchungen ableiten, dass unter feuchten Bodenbedingungen mittlere Kontaktflächendrücke der Fahrwerke im Bereich von 100 kPa im Sinne der Vorsorge günstig sind.

Der Einfluss der Form des Bodenbearbeitungssystems auf die Druckausbreitung im Boden konnte anhand der Untersuchungen nicht abschließend geklärt werden. Auf manchen Standorten konnte kein Unterschied in der Druckentwicklung in 20 oder 40 cm festgestellt werden. Auf anderen Standorten hingegen führte entweder die konventionelle oder noch häufiger die konservierende Bodenbearbeitung zu höheren Spannungen im Boden.

Anhand der Bodendruckmessungen wurde die Schätzung der Bodendrücke nach NEWMARK für die „Entscheidungshilfe Bodendruck“ verbessert. Diese ist konzipiert, um für den Einsatz von bestimmten Maschinen und -kombinationen auf dem Acker einen vergleichenden Überblick zur mechanischen Beanspruchung des Bodens zu geben. Ziel ist es, für den Landwirt oder Berater sichtbar zu machen, welche Optimierungsmöglichkeiten und Grenzen zum Maschineneinsatz in seinem Betrieb im Sinne eines vorsorgenden Bodenschutzes bestehen und die Entwicklung eines entsprechenden Bewusstseins dafür zu fördern.

6 Literatur

- AG BODEN (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Auflage, Hannover
- AKKERMANN, M. H., M. GIESKA, O. HANSEN & H.-O. WEUSTHOFF (1999): Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit von Böden für die Bemessung von Versickerungsanlagen. *Wasser & Boden* 51(10), 15 - 19
- ALAKUKKU, L., J. AHOKAS, & A. RISTOLAINEN (2002): Response of clay soil macroporosity to stress caused by tracked tractors. In: M. PAGLIAI und R. JONES (eds.), *Sustainable land management – environmental protection: a soil physical approach*. *Advances in Geocology*, Catena Verlag, Reiskirchen, vol. 35, 319 - 338
- ARVIDSON, J., A. TRAUTNER, J. J. H. van den AKKER & P. SCHJONNING (2001): Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. *Soil & Tillage Research* 60, 79 - 89
- ARVIDSON, J., A. TRAUTNER & T. KELLER (2002): Influence of tyre inflation pressure on stress and displacement in the subsoil. In: PAGLIAI, M., JONES, R. (Hrsg.) *Advances in Geocology* Catena Verlag, Reiskirchen, 35, 331 - 338
- ARVIDSON, J., E. SJÖBERG & J. J. H. van den AKKER (2003): Subsoil compaction by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. III. Risk assessment using a soil water model. *Soil & Tillage Research* 73, 77 - 87
- ARVIDSSON, J. & T. KELLER (2004): Soil precompression stress. I. A survey of Swedish arable soils. *Soil & Tillage Research* 77, 85 - 95
- ATV-DVWK (2002): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden, Teil III: Methoden für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung. GFA Ges. zur Förderung der Abwassertechnik, Hennef, ATV-DVWK-Merkblatt 901
- BECHER, H. H. (2004): Ist der Konzentrationsfaktor k eines aggregierten Bodens als steuernde Größe der mechanischen Druckverteilung in Böden eine Konstante? *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167. 525 - 531
- BERLI, M., J. M. KIRBY, S. M. SPRINGMANN & R. SCHULIN (2003): Modelling compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery under various moisture conditions in Switzerland. *Soil & Tillage Research* 73, 57 - 66
- BERLI, M., B. KULLI, W. ATTINGER, M. KELLER, J. LEUENBERGER, H. FLÜHLER, S.M. SPRINGMANN & R. SCHULIN (2004): Compaction of agricultural and forest subsoils by tracked heavy construction machinery. *Soil & Tillage Research* 75, 37 – 52
- BML (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN), 1999: Bekanntmachung der Grundsätze und Handlungsempfehlungen zur guten fachlichen Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung nach § 17 Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) vom 17.3.1998. Bundesanzeiger Nr. 73 vom 20.04.1999
- BMVEL (2002): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Boden-erosion. Bonn
- BOIZARD; H.; G. RICHARD; M. BRANCOURT-HULMEL & J. GUERIF (2000): Effect of Cropping Systems on Change in Bulk Density, Penetration Resistance and hydraulic Conductivity in Subsoil. *Advances in Geocology* 32, 233 - 241
- BÖLLING, W. H. (1971): *Zusammendrückung und Scherfestigkeit von Böden - Anwendungsbeispiele und Aufgaben*. Springer, Wien, 194 S.
- BRUNOTTE, J., M. WEISSBACH, H. ROGASIK, E. ISENSEE & C. SOMMER (2000): Zur guten fachlichen Praxis beim Einsatz moderner Zuckerrüben-Erntetechnik. *Zuckerrübe* 49, 34 - 40
- BRUNOTTE, J., C. SOMMER, E. ISENSEE & P. WEISSKOPF (2005): Der Boden unter Druck. *Landtechnik* 3/2005, 150 - 151
- BUNDESBODENSCHUTZGESETZ (1998): Gesetz zum Schutz des Bodens. Bundesgesetzblatt Jahrgang 1998 Teil I
- 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

- CHAMEN, W. C. T. (2003): Protection of the subsoil through improved field practices. Schutz des Unterbodens durch verbesserte Bearbeitungspraxis In: Landbauforschung Völkenrode, 256, 17 - 28
- CHAMEN, W. C. T., L. ALAKUKKU, S. PIRES, C. SOMMER, G. SPOOR, F. TIJINK & P. WEISSKOPF (2004): Qualitative strategies as guidelines for avoiding subsoil compaction in farming systems. Internet: <http://www.alterra-research.nl/pls/portal30/docs/folder/subsoil/subsoil/index.htm>
- CZERATZKI, W. (1972): Die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand. Landbauforschung Völkenrode, Jg. 22, Heft 1, 29-36
- DEFOSSEZ, P. & G. RICHARD (2002): Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. Soil & Tillage Research 67, 41 - 64
- DIN VORNORM 19688 (2000): Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit und Verdichtungsempfindlichkeit von Böden. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DISERENS, E. (2002): Ermittlung der Reifen-Kontaktfläche im Feld mittels Rechenmodell - Eine Wichtige Voraussetzung, um die Bodenbeanspruchung im Ackerbau zu beurteilen. Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Schweiz, 582
- DISERENS, E & SPIESS, E. (2004) : Wechselwirkung zwischen Fahrwerk und Ackerboden - TASC: Eine PC-Anwendung zum Beurteilen und Optimieren der Bodenbeanspruchung. Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Schweiz, 613
- DÜRR, H.J., H. PETELKAU & C. SOMMER (1994): Literaturstudie Bodenverdichtung. Bericht aus dem Institut für Betriebstechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) im Auftrag des Umweltbundesamtes, unveröffentlicht
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau), 1995: Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden (Teil I). Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, DVWK-Merkblatt 234
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau), 1997: Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden (Teil II). Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, DVWK-Merkblatt 235
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau), 1998: Bodenverdichtung - Grundlagen für eine nachhaltige Landbewirtschaftung aus bodenkundlicher Sicht. Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, DVWK - Materialien 4
- ECKERT, H.; G. BREITSCHUH & D. SAUERBECK (1999): Kriterien umweltverträglicher Landwirtschaft (KUL) – ein Verfahren zur ökologischen Bewertung von Landwirtschaftsbetrieben. Agrobiological Research, 52, 57 - 76
- 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
- FELDWISCH, N. (2000): Untersuchungs- und Handlungskonzepte für verdichtungsempfindliche Standorte in Sachsen. Studie für das sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie, Bosch & Partner, Bergisch Gladbach
- FLEIGE, H., R. HORN & M. WEISSBACH (1999): Bodenerosion in Fahrspuren und mögliche Erosionsschutzmaßnahmen. Wasser & Boden, 51. Jg. H. 12, 33 - 36
- FLEIGE, H. & R. HORN (2001): Stabilitätskennwerte von Ober- und Unterböden in Abhängigkeit von Wasserspannung, Bodenart und Gefügeform auf der Basis der CA - Database „Subsoil Compaction“. Mitteilungen der deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Band 96, Heft 1, 69 – 86
- GILL, W. R. & G. E. VANDENBERG (1967): Soil dynamics in tillage and traction. Agric. Handbook, 316, ARS, USDA
- GRÄSLE, W. & B. NISSEN (1996): Bestimmung der Vorbelastung bei verhinderter und zugelassener Seitendehnung – Teil 1: Theoretische Grundlagen und Auswertungsverfahren. Mittlgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch, 80, 327-330
- GYSI, M. (1999): Zusammenhang zwischen Kontaktfläche und Pneuinnendruck. AGRAR Forschung, Jg. 1999, 9 - 12

- GYSI, M. (2000): Soil compaction due to heavy agricultural wheel traffic. Diss. ETH No. 13910
- GYSI, M. (2001): Bodenverdichtung: Vorbelastung als Stabilitätsmaß. Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Schweiz, 566
- HAMMEL, K. (1993): Spannungsverteilung und Bodenverdichtung unter profilierten Reifen am Beispiel zweier Böden unter Grünland. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte, Universität Hohenheim, Heft 14
- HAMMEL, K. (1994): Soil stress distribution under lugged tires. *Soil & Tillage Research* 32, 163 - 181
- HARTGE, K. H., R. HORN (1991): Einführung in die Bodenphysik. Enke, Stuttgart
- HARTGE, K. H. & R. HORN (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden. Enke, Stuttgart
- HARTGE, K. H. & R. HORN (2002): Gedanken zum derzeitigen Verdichtungsstatus von Ackerböden und zur Nachhaltigkeit ihrer Nutzung. In: *Wasser & Boden*, 54. Jg. H. 10, 34 - 38
- HOOGHOUT, S. (1937): Die Bohrlochmethode zur Ermittlung der Durchlässigkeit des Bodens. *Proc. 3. Lom. ISSS A 12-14, B 42 - 57*, Zürich
- HORN, R. (1981): Eine Methode zur Ermittlung der Druckbelastung von Böden anhand von Drucksetzungsversuchen. *Z. f. Kulturtechn. u. Flurber.*, 22, 20 - 26
- HORN, R. (1983): Die Bedeutung der Aggregierung für die Druckfortpflanzung im Boden. *Z. f. Kulturtechn. u. Flurber.*, 24, 238 - 243
- HORN, R. (1999): Verdichtung von Böden - Überlegungen zum Prozess und zur Prognose der mechanischen Belastbarkeit. *Wasser & Boden*, 51. Jg. H. 5, 9 - 13
- HORN, R., M. LEBERT & N. BURGER (1991): Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ-Messungen. *Bayrisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen - Materialien* 73
- HORN, R. & M. LEBERT (1994): Soil Compactability and Compressibility. In: Soane, B.D. und C. van Ouwerkerk (Hrsg.) (1994): *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, Amsterdam, 45 - 69
- HORN, R. & J. ROSTEK (2000): Subsoil compaction processes – state of knowledge. In: HORN, R., J. J. H. van den AKKER & J. ARVIDSSON, (Eds.). *Subsoil compaction: Distribution, processes and consequences*. *Advances in Geoecology*, Catena Verlag, Reiskirchen, vol. 32, 44 - 54
- HORN, R. & H. FLEIGE (2001): Prediction of the mechanical Strength and Ecological Properties of Subsoils for a Sustainable Land use. *Landnutzung und Landentwicklung* 42, 23 – 30
- HORN, R. & H. FLEIGE (2003): A method for assessing the impact of load mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil & Tillage Research* 73, 89 - 99
- INNS, F. M. & J. KILGOUR (1978): *Agricultural tyres*. Dunlop, 69 pp
- ISENSEE, E. (1990): Bodenbelastung durch Mechanisierungsverfahren in der Rübenernte. *Agrartechnik* 40, 356 – 358
- ISENSEE, E., M. WEIßBACH, C. SOMMER & J. BRUNOTTE (2001): Bodenschonung mit moderner Technik – Grundlagen und Empfehlungen. KTBL, Arbeitsunterlagen, Bestellnr. B / 2001
- JASINSKI, B. & M. LEBERT (2003): New method for monitoring tire-soil individual stresses. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft* 256, 73 - 78
- KELLER, T. (2004): Soil compaction and soil tillage – studies in agricultural soil mechanics. Doctoral thesis Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala, ISSN 1401 – 6249
- KELLER, T., A. TRAUTNER & J. ARVIDSSON (2002): Stress distribution and soil displacement under a rubber-tracked and a wheeled tractor during ploughing, both on-land and within furrows. *Soil & Tillage Research* 68, 39 - 47
- KELLER, T. & J. ARVIDSSON (2004): Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil & Tillage Research* 79, 191 - 205
- KIRBY, J. M., (1994): Simulating soil deformation using a critical-state model. *Europ. J. Soil Sci.* 45, 239 - 248
- KOOLEN, A. J. & H. KUIPERS (1983): *Agricultural Soil Mechanics*. Springer-Verlag

- KOOLEN, A. J., P. LERINK, D. A. G. KURSTJENS, J. J. H. van den AKKER & W. B. M. ARTS (1992): Prediction of aspects of soil-wheel systems. *Soil & Tillage Research* 24, 381 – 396
- KOWALEWSKY, H.-H. & K. KÖLLER (1995): Welche Reifen für landwirtschaftliche Fahrzeuge? Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft, DLG – Merkblatt 266
- KRASCHINSKI, S. (2001): Ein verfahrens technischer Beitrag zum angepassten Befahren von Niedermoorgrünland. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI-MEG 373, 99
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft), Hrsg., (1986): Bodenverdichtungen. KTBL-Schrift 308
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft), Hrsg., (1999): Bodenbearbeitung und Bodenschutz. Schlußfolgerungen für die gute fachliche Praxis. KTBL-Arbeitspapier 266
- KÜHNER, S. (1997): Simultane Messung von Spannungen und Bodenbewegungen bei statischen und dynamischen Belastungen zur Abschätzung der dadurch induzierten Bodenbelastungen. Dissertation, Schriftenreihe des Institutes für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel, Band 39
- 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 (1991): A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil & Tillage Research* 19, 275 - 286
- 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
- LEBERT, M. & G. SPRINGOB (1994): Zur Rekultivierung von Lößböden (II): Wirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf die Unterbodenstruktur junger, planierter Flächen. *Z. Kulturtechnik u. Landentw.* 35, 300 - 310
- LEBERT, M., R. HORN & C. SOMMER (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden / Regelungen zur Gefahrenabwehr. Umweltbundesamt, Texte 46 / 04
- LEBERT, M. & W. SCHÄFER (2005): Verdichtungsgefährdung niedersächsischer Ackerböden. *Bodenschutz* 2, 05 (5)
- LUFA Thüringen (1993): Verfahren zur Schätzung der Druckbelastbarkeit von Ackerböden. Abschlußbericht Themen-Nr. 70001 307 / 1993 (unveröffentlicht)
- MC KYES, E. (1985): *Soil Cutting and Tillage*. Developments in Agricultural Science, Elsevier, Amsterdam, 7, 217 pp,
- MÜLLER, W.; M. RENGER & P. BENECKE (1970): Bodenphysikalische Kennwerte wichtiger Böden, Erfassungsmethodik, Klasseneinteilung und kartographische Darstellung. *Beih. Geol. Jb. Bodenkundl. Beiträge* 99, 13 - 70
- NEWMARK, N. M. (1942): Influence charts for computation of stress in elastic foundations. *Engineering Exp. Stat. Bill. Series No. 338, Univ. of Illinois Bull.* 40 (2), Urbana
- NISSEN, B. (1999): Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland - bodenphysikalischer Ansatz. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel, Nr. 50
- PAUL, R. (1993): Verfahren zur Schätzung der Druckbelastbarkeit von Ackerböden. Schriftenreihe Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA) Thüringen, Nr. 70001307 / 1993
- PAUL, R. (1999): Zur Verdichtungsgefährdung im Rahmen des Bodengefügeschutzes auf großen Flächen. Kolloquium Friedrich Schiller Universität Jena 06.05.1999
- PAUL, R. (2004): keine pauschalen Grenzen - unterschiedlicher Boden verträgt unterschiedliche Radlasten. *Neue Landwirtschaft* 10, 40 - 44

- PETELKAU, H. (1984): Auswirkungen von Schadverdichtungen auf Bodeneigenschaften und Pflanzenertrag sowie Maßnahmen zu ihrer Minderung. Tag.-Ber., Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR 227, 25 - 34, Berlin
- PETELKAU, H., C.-R. GÄTKE, M. DANNOWSKI, K. SEIDEL & J. AUGUSTIN (1988): Bodenphysikalische Grundlagen für die Steuerung der Grundbodenbearbeitung. Tag.-Bericht: "Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit und der Erträge durch wissenschaftlichen Fortschritt", 5.-7. Juli 1988, FZB Müncheberg, 362 – 378
- PETELKAU, H., K. SEIDEL & M. FRIELINGHAUS (1998): Ermittlung des Verdichtungswiderstandes von Böden des Landes Brandenburg und Bewertung von Landmaschinen und landwirtschaftlichen Anbauverfahren hinsichtlich der Beeinträchtigung von Bodenfunktionen durch die Verursachung von schwer regenerierbaren Schadverdichtungen. Abschlussbericht 1998, Müncheberg
- PETH, S. (2004): Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelastung von Böden bei der Rentierweidewirtschaft an borealen Wald- und subarktisch-alpinen Tundrenstandorten. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel, Nr. 64,
- POODT, M. P., A. J. KOOLEN & J. P. van den LINDEN (2003): FEM analysis of subsoil reaction on heavy wheel loads with emphasis on soil preconsolidation stress and cohesion. Soil & Tillage Research 73, 67 - 76
- REYNOLDS, W. D. & D. E. ELRICK (1986): A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity-pressure head relationship. Groundwater Monitoring Review 6, 84 – 95
- RUHM, E., zitiert von SOMMER, C. (1985): Ursachen und Folgen von Bodenverdichtungen sowie Möglichkeiten zu ihrer Verminderung. Landtechnik 40, 9, 378 - 384
- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (2004): Sächsischer Agrarbericht 2003
- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (2005): Sächsischer Agrarbericht 2004
- SCHÄFER-LANDEFELD, L. & R. BRANDHUBER (2001 a): Regressionsmodelle zur Bestimmung der mechanischen Vorbelastung von Böden – Ein tragfähiges Konzept?. Bodenschutz 2 / 01, 48 - 52
- SCHÄFER-LANDEFELD, L. und R. BRANDHUBER (2001 b): Die "mechanische Vorbelastung": Eine geeignete Grundlage zur Beurteilung der Verdichtungsgefährdung von Ackerböden?. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, 5. Jhrg., 1 / 01
- SCHLICHTING, E., H. - P. BLUME & K. STAHR (1995): Bodenkundliches Praktikum. 2. neu bearbeitete Aufl., Blackwell – Berlin
- SCHMIDT, W., O. NITZSCHE, S. KRÜCK & M. ZIMMERMANN (2002): Entwicklung von dauerhaft umweltgerechten Landbewirtschaftungsverfahren im sächsischen Einzugsgebiet der Elbe. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FKZ: 0339588; BMBF. Internet: http://www.smul.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfi/Fachinformationen/Ressourcenschutz/download/Elbe_Endbericht.pdf
- SEMMELE, H. (1993): Auswirkungen kontrollierter Bodenbelastungen auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch-mechanische Kenngrößen von Ackerböden. Schriftenreihe Inst. f. Pflanzenern. u. Bodenkunde, Universität Kiel, Heft 26
- SEMMELE, H. & R. HORN (1994): Spannung und Spannungsverteilung in Ackerböden aufgrund von Befahrungen. Wissenschaftliche Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Sonderheft 147, 41 - 59
- 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
- SOMMER, C. (1985): Ursachen und Folgen von Bodenverdichtungen sowie Möglichkeiten zu ihrer Verminderung. Landtechnik 9, 378 - 384
- SOMMER, C. (1998): Ein Konzept zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen in der pflanzlichen Produktion. Bodenschutz 1 / 98, 12 - 16

- SOMMER, C. & M. ZACH (1992): Managing traffic-induced soil compaction by conservation tillage. *Soil & Tillage Res.* 24, 319 - 336
- SOMMER, C. & J. BRUNOTTE (2001): Bodenschadverdichtungen Technische Möglichkeiten zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen in der pflanzlichen Produktion. *Landtechnik*, 56. Jg. H. 5, 314 – 315
- SOMMER, C. & J. BRUNOTTE (2003): Lösungsansätze zum Problembereich Bodenschadverdichtung in der Pflanzenproduktion. *Landnutzung und Landentwicklung* 44, 220 - 228
- SOMMER, C.; M. LEBERT, L. JAKLINSKI & B. JASINSKI (2003): Bodenschadverdichtung Strategien und Techniken zum physikalischen Bodenschutz. *Landtechnik*, 58. Jg., H. 2, 94 - 95
- STEINKAMPF, H., J. BARTELS, G. OLFE & M. ZACH (1994): Belastungssimulation im Feldversuch und Ermittlung des Bodendruckes. *Wissenschaftliche Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Sonderheft 147*, 7 - 22
- TIJINK, F. G. J. (2003): Technical guidelines to avoid soil compaction in cropping systems with sugar beet (*Beta vulgaris* L.). Verfahrenstechnische Leitlinien zur Vermeidung von Bodenverdichtungen in der Zuckerrübenproduktion (*Beta vulgaris* L.), In: *Landbauforschung Völknerode 256*, 39 - 47
- TRAUTNER, A. (2003): On soil behaviour during field traffic. Doctoral thesis Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala
- TRAUTNER, A., J. ARVIDSON (2003): Subsoil compaction caused by machinery traffic on a Swedish Eutric Cambisol at different soil water contents. *Soil & Tillage Research* 73, 107 - 118
- VAN DEN AKKER, J. J. H. & G. J. CARSTJENS (1989): Reliability of pressure cells to measure traffic-induced stress in the topsoil-subsoil interface. *Proc. 4th Eur. Conf. ISTVS, Wageningen, Netherlands, Vol. 1*, 1 - 7
- WEISSKOPF, P., U. ZIHLMANN, C. WIERMANN, R. HORN, T. ANKEN & E. DISERENS (1999): Einfluss des Pflügens auf das Bodengefüge. *Agrarforschung* 6 (8), 293 - 296
- WEISSKOPF, P., U. ZIHLMANN, C. WIERMANN, R. HORN, T. ANKEN & E. DISERENS (2000): Influence of conventional and onland-ploughing on soil structure. *Catena Verlag, Reiskirchen, Advances in Geocology* 32, 73 - 81
- WERNER, D. & W. THÄMERT (1989): Zur Diagnose des physikalischen Bodenzustandes auf Produktionsflächen. *Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd.* 33, 729 – 739
- WERNER, D. & R. PAUL (1993): Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Landbewirtschaftungssystemen, Einschätzung der Verdichtungsgefährdung. *Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA) Thüringen, Abschlussbericht*
- WERNER, D. & R. PAUL (1999): Kennzeichnung der Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. *Wasser & Boden* 51 / 12, 10 – 14
- WERNER, D & B. WERNER (2001): Verdichtung und Regeneration des Gefüges eines schluffigen Tonbodens: Bodenphysikalische, computertomographische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen. *Plant Nutr. Soil Sci.*, 164, 79 - 90
- WIERMANN, C. (1998): Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lößbürtiger Ackerstandorte. *Schriftenreihe Inst. f. Pflanzenern. u. Bodenkunde, Universität Kiel, Heft 45*
- WIEßBACH, M. (2001): Neue Reifenkonzepte zur Bodenschonung. *Landtechnik*, 56. Jg. H. 2, 72 - 73
- XIANG, J., B. R. SCANLON, W. F. I. MULLICAN, L. CHEN & R. S. GOLDSMITH (1997): A multistep constant-head borehole test to determine field saturated hydraulic conductivity of layered soils. *Advances in Water Resources* 20, 45 – 57

Arbeitsgang	Standort	Datum	eingesetzte Technik	Reifenabfolge bei Überfahrt	Radlast ⁽¹⁾ [kg]	Reifeninnen- druck [bar]	Wassersp- annung pF-Wert		gemessener Bodendruck [kPa] n=3				Mes- sung bei Über- fahrt		
									geplügter Boden		konservierend bearbeiteter Boden			Direktsaat	
							20 cm	40 cm	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm		20 cm	40 cm
Mähreschen:	Köllitsch	09.08.01	Claas Lexion 450	650/75R32 (v)	8295	2,8	2	2	272	165	330*	304	1. ÜF		
				500/60-26.5 (h)	3553	H2O	2	2	241	123	309	230			
	Methau	16.08.01	MF 38	800/65R32 (v)	8100	2,8	2,5	2,5		258	115		1. ÜF		
				500/60-22.5 (h)	2150	2,0	2,5	2,5		319	35				
	Methau	16.08.01	MF 7276	800/65R32 (v)	8200	2,8	2,5	2,5		327	251		1. ÜF		
				500/60-26.5 (h)	2340	2,0	2,5	2,5		155	76				
	Zschortau	30.06.02	Claas Lexion 480	650/75 R32 (v)	8800	3,0	3	3			259		1. ÜF		
				500/70R24 (h)	2800	2,6	3	3			46				
	Frohburg	10.08.04	Claas Lexion 480	800/65R32 (v)	9000	2,5	3	3-4		180	1		1. ÜF		
				600/55-26.5 (h)	3000	2,5	3	3-4		n.b.	n.b.				
										194	1			2. ÜF	
										212	0				
									276	1		3. ÜF			
									270	1					
Oberwinkel	11.08.04	Claas Lexion 450 (mit Stripper)	710/75R34+20.8R42 (v)	8246		2,5	2,5						1. ÜF		
			mit Zwillingreifen 710/75R34 (v; innen)		1,0	2,5	2,5		6	3					
			an der Vorderachse 500/60-26.5 (h)	2649	1,5	2,5	2,5		2	2				2. ÜF	
										19	6				
										29	4				
	12.08.04	Claas Lexion 450	710/75R34+20.8R42 (v)	8295		2,5	2							1. ÜF	
			mit Zwillingreifen 710/75R34 (v; innen)		1,0	2,5	2			39	1				
			an der Vorderachse 20.8R42 (v; außen)		1,0	2,5	2			8	1				1. ÜF
				500/60-26.5 (h)	2649	1,5	2,5	2			78	0			
	Threna	22.08.04	Claas Lexion 480	200 x 65 cm (v)	10050		2,5-	32,5-	3		80	0		1. ÜF	
mit Gleisband 500/70R24 (h)				3000	3,9	2,5-	32,5-	3		313	0				
										331	0		2. ÜF		
									n.b.	0					
Threna	24.11.04	Claas Lexion 480	200 x 65 cm (v)	10050		2	2		213	51		1. ÜF			
			mit Gleisband 500/70R24 (h)	3000	3,9	2	2		387	118					
Rübenroden:	Littdorf	05.11.01	Holmer Terrados	800/65R32 (v)	8000	2,0	2,5	2,5	129	65	281	263	1. ÜF		
				73x44.00-32 (h)	8000	1,5	2,5	2,5	318	233	313	319			
	Großstolpen	07.11.03	Euro-Tiger	800/65 R 32 (v)	8500	2,1	3	4		48			1. ÜF		
73x44.00-32 (m)				11000	2,5	3	4		83						
66x43.00-25 (h)				8000	1,9	3	4		60						
Kartoffelroden:	Frohburg	06.10.03	Grimme KS 3000A	270/95R48 (v)	3000	2,5	3	4		335	80		1. ÜF		
				mit Gleisband 210 x 64 cm (h)	9500		3	4		76	32				
	Frohburg (Elbi)	19.10.04	Grimme KS 3000A	270/95R48 (v)	3000	2,1	2	2		24	9		1. ÜF		
				mit Gleisband 210 x 64 cm (h)	9500		2	2		60	17				
Frohburg	06.10.03	Dewulf R 4000	320/90R46 (h; links)	3040	2,4	3	4		301	142		1. ÜF			
			66x 43.00-25 (h; rechts)	4180	2,5	3	4		102	47					

Arbeitsgang	Standort	Datum	eingesetzte Technik	Reifenabfolge bei Überfahrt	Radlast ⁽¹⁾ [kg]	Reifeninnen- druck [bar]	Wassersp- annung pF-Wert		gemessener Bodendruck [kPa] n=3				Mes- sung bei Über- fahrt		
									geplügter Boden		konservierend bearbeiteter Boden			Direktsaat	
							20 cm	40 cm	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm		20 cm	40 cm
Erntetransport:	Methau	16.08.01	Traktor MF3690	540/65R30 (v)	1520	1,4	2,5	2,5			89	19		1. ÜF	
				20,8R42 (h)	2280	1,8	2,5	2,5			101	28			
				Conow	385/65R22,5 (v)	3355	5,0	2,5	2,5			242	57		
					385/65R22,5 (h)	3355	5,0	2,5	2,5			236	41		
				Conow	385/65R22,5 (v)	3355	5,0	2,5	2,5			148	32		
				385/65R22,5 (h)	3355	5,0	2,5	2,5			251	40			
Köllitsch	09.08.01	Fendt 824		600/65R34 (v)	1600	1,2	2	2	103	33	111	45		1. ÜF	
				710/70R38 (h)	2345	1,2	2	2	179	56	188	106			
				Lomma	445/65R22,5 (v)	4750	6,8	2	2	330*	150	330*	185		
					445/65R22,5 (h)	4750	6,8	2	2	330*	220	330*	200		
				Lomma	445/65R22,5 (v)	4750	6,8	2	2	330*	174	317	197		
				445/65R22,5 (h)	4750	6,2	2	2	330*	230	330*	209			
Köllitsch	09.08.01	Traktor John Deere 4755		480/70R30 (v)	1400	1,0	2	2	66	30	134	40		1. ÜF	
				710/70R38 (h)	3500	1,6	2	2	133	74	157	88			
				Annaburger HTS 20.12	600/55-26.5 (v)	4500	2,4	2	2	189	98	291	165		
					600/55-26.6 (h)	4500	2,4	2	2	188	94	312	190		
Zschortau	30.06.02	Traktor Deutz Agroton 200		600/70R30 (v)	1160	1,1	3	3				133		1. ÜF	
				710/70R38 (h)	3090	1,6	3	3				134			
				Annaburger HTS 32.12	650/55R26.5 (v)	5033	3,0	3	3				162		
					650/55R26.5 (m)	5033	3,0	3	3				237		
					650/55R26.5 (h)	5033	3,0	3	3				281		
Frohburg	06.10.03	Traktor John Deere 6920 S		480/65R28 (v)	1201	1,6	3	4			98	10		1. ÜF	
				600/65R38 (h)	2764	1,3	3	4			261	58			
				Kamper TW 800	24R20.5 (v)	6250	3,1	3	4			397	88		
					24R20.5 (m)	6250	3,3	3	4			331	64		
					24R20.5 (h)	6250	3,5	3	4			380	91		
Oberwinkel	12.08.04	Traktor Case 7140		480/70R30 (v)	1400	0,9	2,5	2				13	0	2. ÜF	
				710/75R34 (h)	2600	0,9	2,5	2				39	0		
				HW80	385/65R22,5 (v)	3950	9,0	2,5	2				402		1
					385/65R22,5 (h)	3950	9,0	2,5	2				418		1
				HW80	16-20 (v)	3825	4,5	2,5	2				404		0
					16-20 (h)	3825	4,5	2,5	2				391		0
Überladewagen: (Getreide)	Oberwinkel	12.08.04	Traktor Case 7140	480/70R30 (v)	1400	0,9	2,5	2				2	0	2. ÜF	
				710/75R34 (h)	3600	0,9	2,5	2				11	0		
				Überladewagen (Eigenbau)	710/75R34	4500	0,9	2,5	2				11		0

Arbeitsgang	Standort	Datum	eingesetzte Technik	Reifenabfolge bei Überfahrt	Radlast ⁽¹⁾ [kg]	Reifen-nen-druck [bar]	Wassersp-annung pF-Wert	gemessener Bodendruck				Mes-sung bei Über-fahrt				
								geplügter Boden		konservierend bearbeiteter Boden			Direktsaat			
								20 cm	40 cm	20 cm	40 cm		20 cm	40 cm		
Gülle:	Köllitsch	09.08.01	Traktor John Deere4755	480/70R30 (v)	1400	1,0	2	2	92	15	130	92	1. ÜF			
				710/70R38 (h)	3250	1,6	2	2	170	45	172	131				
			HTS 102.27	550/60-22.5 (v)	3000	2,4	2	2	181	75	130	107				
				550/60-22.5 (h)	3000	2,4	2	2	209	109	161	117				
	Köllitsch	09.08.01	Traktor Fendt 824	600/65R34 (v)	1600	1,2	2	2			132	48	1. ÜF			
				710/70R38 (h)	3500	1,2	2	2			217	151				
			Fuchs	600/55-26.5 (v)	4000	2,2	2	2			300	238				
				600/55-26.6 (h)	4000	2,2	2	2			296	250				
	Methau	22.08.01	Terragator	66x43.00-25NHS (m)	8400	2,5	2,5	2,5			307	260	1. ÜF			
				66x43.00-25NHS (h)	8400	2,5	2,5	2,5			317	267				
											300	189	2. ÜF			
											297	198				
Traktoren mit verschiedenen Reifen:	Methau		TraktorMF3690	540/65R30 (v)	1520	1,5	2	2	131	31	144	22	1. ÜF			
				20.8R42 (h)	2280	1,0	2	2	169	33	81	15				
			TraktorMF3690	480/70R30 (v)	1520	1,5	2	2	169	40	142	32				
				580/70R42 (h)	2280	1,3	2	2	135	35	120	29				
			TraktorMF3690	48x25.00-20NHS (v)	1520	0,8	2	2	0	0	0	0				
	66x43.00-25NHS (h)	2280		0,8	2	2	30	0	40	30						
	Köllitsch	23.05.01	Traktor Fendt	Pflegereifen (v)	n.b.	1,8	n.b.	n.b.	178	13	89	3	1. ÜF			
				Pflegereifen (h)	n.b.	n.b.	n.b.	242	14	171	8					
	Traktoren mit verschiedenen Reifeninnen-drücke:	Köllitsch (Rüsterg.)	07.06.01	Traktor JohnDeere	480/70R30 (v)	1400	1,0	2	-	-	143	61	1. ÜF			
					710/70R38 (h)	2500	1,6	2	-	-	171	73	2. ÜF			
										125	52	143	35	3. ÜF		
										149	55	152	39	1. ÜF		
										141	62	137	33	2. ÜF		
										149	73	159	40	3. ÜF		
									1,0	2	-	-	-	-	1. ÜF	
									0,8	2	-	-	-	-	2. ÜF	
												81	37	125	59	3. ÜF
												100	43	133	71	1. ÜF
												122	49	170	70	2. ÜF
												161	71	130	74	3. ÜF
									1,0	2	79	37	203	69	1. ÜF	
									1,6	2	144	63	225	100	2. ÜF	
												143	65	207	104	3. ÜF
												148	67	228	104	1. ÜF
												133	67	207	107	2. ÜF
												136	77	218	139	3. ÜF
					1,0	2	128	59	157	19	1. ÜF					
					0,8	2	142	76	137	31	2. ÜF					
								209	108	152	53	3. ÜF				
								167	84	96	36	1. ÜF				
								164	95	157	59	2. ÜF				
								136	88	105	61	3. ÜF				

v = Vorderachse; m = Mittelachse; h = Hinterachse; ÜF = Überfahrt; - = Messensoren ausgefallen; n.b. = nicht bekannt
* = Messgrenze bei 330 kPa erreicht
1) statische Radlast: Berechnung siehe Kapitel "Methoden"

Unser Dank gilt

- den 22 Betrieben der Betriebsbefragung für ihre umfassende Maschinenerhebung,
- den vielen Betrieben, die ihre Flächen für eine bodenphysikalische und –mechanische Untersuchung zur Verfügung gestellt haben,
- den zahlreichen Betrieben, die während ihrer Arbeitszeit Maschinen, Fläche und Zeit zur Verfügung gestellt haben, um Bodendruckmessungen durchführen zu können.

Impressum

- Herausgeber:** Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
August-Böckstiegel-Straße 1, 01326 Dresden
Internet: www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/publikationen
- Autoren:** Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
Fachbereich Pflanzliche Erzeugung
Henning Stahl, Karin Marschall, Helmut Götze
Gustav-Kühn-Str. 8
04159 Leipzig
Telefon: 0341 / 9174 - 122
Telefax: 0331 / 9174 - 111
E-Mail: Henning.Stahl@leipzig.lfl.smul.sachsen.de
- Redaktion:** siehe Autoren
- Endredaktion:** Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
Birgit Seeber, Ramona Scheinert, Matthias Löwig
Telefon: 0351/2612 - 345
Telefax: 0351/2612 - 151
E-Mail: birgit.seeber@pillnitz.lfl.smul.sachsen.de
- ISSN:** 1861-5988
- Redaktionsschluss:** September 2005

Für alle angegebenen E-Mail-Adressen gilt:
Kein Zugang für elektronisch signierte sowie für verschlüsselte elektronische Dokumente

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.