

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik

Bodenbelastung und Bodenbeanspruchung unterschiedlicher Fahrwerkskonfigurationen

Rupert Geischer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. J. Meyer

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. H. Bernhardt
2. Univ.-Prof. Dr. H. Auernhammer (i. R.)

Die Dissertation wurde am 11.01.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 10.05.2011 angenommen.

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Texten und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne Zustimmung des Autors urheberrechtswidrig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 2011

Im Selbstverlag: Rupert Geischeder

Bezugsquelle: Technische Universität München

Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik

Am Staudengarten 2

85354 Freising

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Für die Freiräume und Unterstützung von Seiten des damaligen Arbeitgebers möchte ich mich stellvertretend bei Institutsleiter Herrn Dr. G. Wendl bedanken.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H. Auernhammer und Herrn Prof. Dr. H. Bernhardt als Doktorvater für das entgegengebrachte Vertrauen, mir als FH-Absolventen die Promotion zu ermöglichen. Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Dr. M. Demmel und Herrn R. Brandhuber. Ihren intensiven Bemühungen verdanke ich das Zustandekommen und das Gelingen der Promotion, die durch den Wohlfahrtsfond der deutschen Zuckerindustrie gefördert wurde. Stellvertretend möchte ich Herrn Direktor Köhler (Südzucker) für die Förderung des dreijährigen Fahrwerksversuchs bei Zuckerrübenroder danken. Einen persönlichen Dank möchte ich Herrn Prof. Dr. Roland Bauer aussprechen. Seiner Motivation bereits zur Zeit meines FH-Studiums in Weihenstephan ist es zu verdanken, dass ich das Ziel Promotion geschafft habe. Seinen Ratschlägen verdanke ich mein berufliches Vorankommen.

Bei Herrn Prof. Dr. J. Meyer bedanke ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und der vorübergehenden Übernahme meiner Promotion als Doktorvaters während der Vakanz der Professur am Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik. Des Weiteren möchte ich mich bei meinem Chef Herrn Ch. Haller bedanken, der das Promotionsprojekt nach meiner Zeit in Weihenstephan befürwortet hat und mir die notwendigen Freiräume zur Fertigstellung im Rahmen meiner beruflichen Tätigkeit als Projektleiter bei der HARAIN Maschinenbau GmbH und als Produktmanager der WM-Kartoffeltechnik ermöglicht hat.

Schließlich gilt ein großer Dank den Kollegen vom Institut für Landtechnik und Tierhaltung, dem Institut für Agrarökologie und dem Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik. Allen Helfern und Kollegen, die tatkräftig die Arbeit unterstützt haben und mir in den personalintensiven Feldprobenahmen zur Seite standen. Der Bodendruckmannschaft, die trotz Arbeitsspitzen im Frühjahr und Herbst, die hohe Anzahl an Bodenproben (mehr als 4.000 Stechzylinder in den Jahren 2004 - 2006) durch das große Engagement erst ermöglicht haben. Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Dr. Stanzl, der mich mit viel Erfahrung und persönlichem Einsatz im Bereich der Messtechnik immer unterstützt hat.

Nicht zuletzt gebührt meiner Familie ein ganz herzlicher Dank. Meinen Eltern, die mich zu Studium und Promotion ermuntert und mir die notwendigen Freiräume ermöglicht haben. Und meiner Partnerin Steffi die mich in den Abschnitten des Zusammenschreibens unterstützt und motiviert hat.

„Deshalb habe ich nun eingesehen, dass in diesen und anderen ähnlichen Fällen man nicht ohne weiters vom kleinen Maßstab auf den großen schließen dürfe; manche Maschine gelingt im kleinen, die im großen nicht bestehen könnte.“

(Galileo Galilei)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	14
Abkürzungen, Einheiten und Symbole	17
1 Einleitung	19
2 Problemstellung	21
3 Stand des Wissens	23
3.1 Grundlagen der Bodenmechanik	23
3.1.1 Bodenbelastung, Bodenbeanspruchung und Bodenverdichtung	24
3.1.1.1 Bodenverdichtungen	25
3.1.1.2 Anthropogene Bodenverdichtungen	26
3.1.2 Bodenkundliche Zusammenhänge	28
3.1.3 Technische Zusammenhänge	33
3.2 Bodenbeanspruchung durch landwirtschaftliche Fahrzeuge.....	50
3.3 Fahrwerke	53
3.3.1 Aufgaben und Anforderungen von Fahrwerken	53
3.3.2 Fahrwerkskomponenten.....	54
3.3.3 Fahrwerkskonfiguration und Aufbau	69
3.3.4 Einordnung landwirtschaftlicher Fahrwerke	76
3.3.4.1 Gesetzliche Vorgaben - Straßenverkehr.....	76
3.3.4.2 Bodenbelastung - Bodenbeanspruchung.....	78
4 Zielsetzung	84
5 Material und Methoden	89
5.1 Standortbeschreibung	91
5.2 Eingesetzte Fahrwerkstechnik.....	93
5.3 Fahrzeugparameter.....	95
5.4 Messprogramm auf den Parzellen.....	95
5.4.1 Dynamischer Druck - Messsysteme	96
5.4.2 Wahl der Schlauchdrucksonde	98
5.4.3 Dynamische Druckmessung.....	99
5.4.4 Eindringwiderstandsmessung - Penetrometer	105
5.4.5 Bodenphysikalische Kennwerte.....	106
5.4.5.2 Gesamtporenvolumen und Luftkapazität	107
5.4.6 Statistische Analyse der Messwerte	108

6	Ergebnisse	110
6.1	Standortanalyse - Bodenfeuchte	110
6.2	Maschinenparameter.....	112
6.3	Simulation mit TASC 2.0	113
6.4	Dynamische Bodendruckmessung	116
6.4.1	Analyse der Restdrücke	125
6.4.2	Dynamische Druckmessung unter Einbeziehung der Belastungsdauer	126
6.5	Eindringwiderstands- und Spurtiefenmessung.....	127
6.6	Bodenphysikalische Untersuchungen.....	130
7	Diskussion der Ergebnisse	141
7.1	Standortanalyse	141
7.2	Fahrzeugparameter.....	143
7.2.1	Rad- und Laufwerklasten.....	143
7.2.2	Mittlerer Kontaktflächendruck	144
7.3	Simulierte Druckspannungen (TASC 2.0).....	147
7.4	Bodendruckmessung mit Schlauchdrucksonden	150
7.4.1	Radfahrwerke.....	152
7.4.2	Gummibandlaufwerk (reibschlüssig).....	158
7.4.3	Gewichteter mittlerer verdichtungswirksamer Bodendruck (GMPw)	163
7.5	Eindringwiderstand.....	164
7.6	Fahrspursetzungen	167
7.7	Bodenphysikalische Parameter in Verbindung mit den Schadverdichtungsgrenzwerten	168
7.7.1	Trockenrohddichte	168
7.7.2	Gesamtporenvolumen, Luftkapazität und Luftleitfähigkeit.....	169
8	Schlussfolgerungen	173
9	Zusammenfassung	176
	Summary	179
	Literaturverzeichnis	181
	Anhang	192

Abbildungsverzeichnis

Nummer		Seite
1.	Belastung, Beanspruchung und Verdichtung des Bodens (verändert nach Sommer, 1985)	24
2.	Durch die semilogarithmische Darstellung der idealisierteren Drucksetzungskurve	25
3.	Auswirkungen der Bodendichte auf den Ertrag (Frielinghaus et al., 2001)	26
4.	Verdichtungskurve von Schwarzerdeböden nach Sommer, 1986, (die Kurve wurde an Hand von Proben des Oberbodens ermittelt)	30
5.	Druckausbreitung im Boden in Abhängigkeit von der Bearbeitungsintensität (Brunotte, 2007)	32
6.	Tiefenverteilung der mechanischen Eigenfestigkeit (= Vorbelastung; [kPa]) in einer Parabraunerde aus Löss in Abhängigkeit von der Bewirtschaftungsweise (Horn, 2001). Ap = Durch Pflugarebeit gelockerter Oberboden; Al = Oberbodenhorizont aus dem Tonteilchen ausgewaschen wurden; Bt = Unterbodenhorizont in den Ton eingewaschen wurde	33
7.	Höhere Last bewirkt bei gleich bleibendem Reifeninnendruck (P_i) einen höheren vertikalen Spannungseintrag (S_v) in den Boden, der bis in tiefere Bodenschichten wirkt (Chamen et al., 2003)	35
8.	Gemessener Bodendruck in 10 cm Tiefe bei unterschiedlichen Reifeninnendrücken (Weißbach, 2003)	36
9.	Gleiche Last bei höherem Reifeninnendruck (P_i) bewirkt vor allem im Oberboden einen deutlich höheren Spannungseintrag (Tijink und van der Linden, 2000)	37
10.	Dreidimensionale Darstellung einer Kontaktflächendruckverteilung, Reifen T22, Fülldruck 3 bar, Achslast 30 kN (Ebel, 2006)	39
11.	Schematischer Vergleich der Druckverteilung unter den Aufstandsflächen von Rad- und Raupenlaufwerken (Höfflinger und Porkriefke, 1993)	40
12.	Zweidimensionale Darstellung der Druckverteilung unter dem Gummiband eines Raupentraktors mit 160 kN Last und einer Gummibandbreite von 60 cm (Weißbach und Winter, 1996)	41
13.	Vergleich der Druckspitzen bei einer dynamischen Druckmessung in Längsrichtung unter Gummibandlaufwerken bei einer Bandspannung von 80 kN (links) und 160 kN (rechts) (Obermeier-Hartmann et al., 2006)	42
14.	Relative Verdichtungswirkung mit unterschiedlicher Überrollhäufigkeit und gleicher Gesamtlast auf einem Sandboden (verändert nach Tijink et al., 1995)	47
15.	Einfluss der Mehrfachüberrollung mit hohen Lasten (Keller und Arvidsson, 2004)	49

Nummer		Seite
16.	Zusammenhang Reifengröße und Radlast bei gleichem Kontaktflächendruck (Söhne, 1953)	50
17.	Einfluss der Radlast und des Kontaktflächendruckes bei Radialreifen auf die Verteilung des Bodendruckes (Tijink und Spoor, 2004, abgeändert nach Söhne, 1953)	51
18.	Aufbau eines Radialreifens, wie er heutzutage als Standardreifen an landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen zu finden ist (Steinkampf, 1974)	55
19.	Vergleich der maximalen Tragfähigkeit bei 100 kPa (1 bar) und einem Geschwindigkeitsbereich 10 km/h von Reifen mit unterschiedlichen Durchmesser, Reifenbreite und Felgengröße (Datengrundlage Reifentabelle Michelin, 2007)	56
20.	Maximale Tragfähigkeit großvolumiger Reifen für den Einsatz an schweren Erntemaschinen bei 10 km/h und zyklischer Belastung in Abhängigkeit des Reifeninnendruckes im Feld. Zum Vergleich gewogene Radlasten zweiachsiger KRB6 mit vollem Bunker	57
21.	Einflussfaktoren des zu wählenden Reifeninnendruckes	58
22.	Das Klein-Raupen-Modell „Oliver HG 42“ der Oliver-Corporation, Cleveland, Ohio, USA beim Pflügen 1942 (Köhler, 1949)	63
23.	Aufbau eines formschlüssigen Laufwerks mittels separaten Antriebsrades (verändert nach VDI 6101, 2007)	64
24.	Aufbau eines Gummibandlaufwerks mit kraftschlüssigem (reibungsschlüssigem) Antrieb und integriertem Vorgelegegetriebe (verändert nach Obermeier-Hartmann et al., 2006)	65
25.	Querschnitt eines Gummigurtbandes in dem der Aufbau ersichtlich ist	67
26.	Auf dem Markt angebotenen Raupentraktorentchnik	68
27.	Umrüslösungen für Standardtraktoren	68
28.	Übersicht von aktuell in der Landwirtschaft eingesetzten Anhängerfahrwerken	70
29.	Übersicht von aktuell in der Landwirtschaft verwendeten Fahrwerkskombinationen auf Zugmaschinen	72
30.	Bauraumvergleich zwischen Rad- und Bandlaufwerk bei gleicher Traglast (Obermeier-Hartmann et al., 2006)	77
31.	Gemessener Bodendruck mit Schlauchdrucksonden unter den Fahrwerken zweier verschiedener Mähdrescher mit drei Fahrwerksvarianten in Abhängigkeit von der Bodentiefe. Gemessen auf sandigem Lehm bei einer Bodenfeuchte von 16,2 Gew.-% (Weißbach, 2001)	80

Nummer		Seite
32.	Vergleich typischer Spurmuster verschiedener Fahrwerkskonfigurationen von KRB bei ganzheitlichem Befahren	82
33.	Zugkraftvergleich zwischen Rad- und Raupentraktor bei unterschiedlichem Schlupf (Weißbach, 2003)	83
34.	Zusammenhang höherer Radlast und vergrößerter Aufstandsfläche mit der erhöhten Tiefenwirkung bei gleich bleibendem Kontaktflächendruck (Söhne, 1953)	85
35.	Darstellung des Zusammenhangs zwischen Bodennutzung und der messbaren Auswirkungen. Die kursiv dargestellten Bereiche, stellen die Besonderheit und den Schwerpunkt des Versuchansatzes dar	88
36.	Randomisierter Feldversuch; 5 Überrollungssituationen (ÜS) mit je sechs Feldwiederholungen	90
37.	Lage der Versuchsfläche in Neuburg an der Donau Ortsteil Feldkirchen (Google Earth, 2007)	92
38.	Korngrößenverteilung im Oberboden (Bearbeitungshorizont) (links) und im Unterboden (rechts)	92
39.	Erzeugte Fahrspuren durch den KRB6 mit dem Bandlaufwerk auf der Vorderachse und dem Zwillingrad auf der Hinterachse (verändert nach Fa. Grimme, 2004)	94
40.	Zweiachsiger KRB6 bei spurversetzter Fahrt (Fa. Holmer, 2004)	94
41.	Ballastierter Mittelsitztraktor JCB Fastrac 2115 4WS beim Anlegen der einfach überrollten Spur durch die „Hundegangfahrt“	95
42.	Messprogramm in den Befahrungsparzellen innerhalb und neben der befahrenen Spur	96
43.	Links: DMS-Messdose nach Cooper (1957) zur vertikalen Druckerfassung (eindimensional). Rechts: ein so genannter Stress State Transducer (SST), der vom USDA National Soil Dynamics Laboratory Auburn Alabama selbst hergestellt wurde. Dieser kann die Drücke aus sechs verschiedenen Richtungen erfassen	97
44.	Einbau des SST-Sensors (links) und des DMS-Sensors (rechts). In beiden Fällen muss der Sensor durch eine Grube seitlich der Messstelle installiert werden	97
45.	Schlauchdrucksonde des Instituts für Landtechnik und Tierhaltung	99
46.	Lanze zum Vorstechen der Sondenkanäle	101
47.	Messanordnung der Schlauchdrucksonden für die vier Beprobungstiefen	102
48.	Messschrieb in 20 cm und 50 cm Tiefe bei einer Überfahrt mit vier Rädern. (Vordruck zwischen 28 und 31 kPa)	103

Nummer		Seite
49.	Einsatz des Penetrometers zur Messung des Eindringwiderstandes	106
50.	Gegenüberstellung von Wassergehalt (WG) und Feldkapazität (FK) im Oberboden am 20.4.2006	111
51.	Gegenüberstellung von Wassergehalt (WG) und Feldkapazität (FK) im Unterboden am 20.4.2006	111
52.	Mit TASC 2.0 simulierte Hauptdruckspannung der jeweiligen Fahrwerksvarianten	114
53.	Vergleich Druckzwiebelausbreitung der unterschiedlich belasteten Gummibandlaufwerke	115
54.	Simulationsvergleich des Bodendruckes zwischen den beiden Radfahrwerken	115
55.	Verlauf des dynamischen Druckes in vier Tiefen während der einmaligen Überfahrt mit dem Gummibandlaufwerk. Bandlast: 113 kN, rechnerischer Kontaktflächendruck: 62 kPa	116
56.	Verlauf des dynamischen Druckes in den vier Tiefen während der zweimaligen Überfahrt mit dem Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 und einer Radlast von 51,5 kN, Kontaktflächendruck: 69 kPa, $p_i = 70$ kPa	117
57.	Verlauf des dynamischen Druckes in vier Tiefen während viermaliger Überfahrt mit dem Radialreifen der Dimension 540/65 R28 und einer Radlast von 23,5 kN, Kontaktflächendruck: 74 kPa. $p_i = 60$ kPa	118
58.	Mittlere maximale Bodendrucke unter den Laufwerksrollen des Gummibandlaufwerkes, Last 113 kN	119
59.	Mittlere maximale Bodendrucke der zweifachen Überrollung mit einem Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 und einer Radlast von 51,5 kN, $p_i = 70$ kPa	120
60.	Mittlere maximale Bodendrucke der vierfachen Überrollung mit einem Radialreifen der Dimension 540/65 R28 und einer Radlast von 23,5 kN, $p_i = 60$ kPa	121
61.	Vergleich der Trendlinien der Überrollungssituationen in 20 und 40 cm Bodentiefe	122
62.	Gemittelte Verläufe der Druckspitzen über die Messtiefen der jeweils letzten Überrollung (durch Rad bzw. Laufwerksrolle)	123
63.	Druckabbau der drei Belastungsvarianten über die Bodentiefe	124
64.	Vergleich von Bodendruck (Tiefe 20 und 30 cm), Kontaktflächendruck und Reifeninnendruck der jeweiligen Fahrwerke	125
65.	Gemessene Restdrücke nach der jeweils letzten Überrollung durch Luftreifen oder das Antriebsrad des Gummibandlaufwerkes	126

Nummer		Seite
66.	Darstellung des „gewichteten mittleren verdichtungswirksamen Bodendruckes“ (GMPw) über die Messtiefen	127
67.	Eindringwiderstände der einzelnen fünf Belastungsvarianten	128
68.	Maximale Eindringwiderstände der drei Belastungsvarianten bis in einer Tiefe von 30 cm	129
69.	Luftkapazität im Oberboden (15 – 20 cm) der unbefahrenen Beprobungsbe- reiche	132
70.	LK im Krumbereich der fünf Überrollungssituationen (1 – 5) aus den jeweils sechs Beprobungsnestern je Wiederholung	133
71.	Ausgangsniveau der unbefahrenen Beprobungsstellen im Unterboden (38 – 43 cm)	134
72.	LK im Unterboden der fünf Überrollungssituationen aus den jeweils sechs Beprobungsnestern je Wiederholung vor der Befahrung	134
73.	Vergleich des Parameters Luftkapazität im befahrenen und unbefahrenen Bereich der Krume bei sechsfacher Feldwiederholung (ns = nicht signifikant; *s = signifikant bei $\alpha < 5\%$; **s = signifikant bei $\alpha < 1\%$)	135
74.	Vergleich der LK der fünf Überrollungssituationen aus den sechs Bepro- bungsnestern der befahrenen und unbefahrenen Bereiche des Oberbodens	136
75.	Vergleich des Parameters Luftkapazität im befahrenen und unbefahrenen Bereich des Unterbodens (ns = nicht signifikant; *s = signifikant bei $\alpha < 5\%$; **s = signifikant bei $\alpha < 1\%$)	137
76.	Vergleich der Streuung des Parameters LK der fünf Überrollungssituationen aus den jeweils sechs Beprobungsnestern, neben und im überrollten Bereich des Unterbodens	138
77.	Gegenüberstellung der pneumatischen Leitfähigkeit zwischen befahrenen und unbefahrenen Beprobungsstellen im Krumbereich (15 -20 cm) (ns = nicht signifikant; *s = signifikant bei $\alpha < 5\%$; **s = signifikant bei $\alpha < 1\%$)	139
78.	Vergleich der pneumatischen Leitfähigkeit im Unterboden (38 – 43 cm) (ns = nicht signifikant; *s = signifikant bei $\alpha < 5\%$; **s = signifikant bei $\alpha < 1\%$)	140
79.	Eindringwiderstandsmessung auf den nicht befahrenen Bodenstellen	142
80.	Messung der Druckverteilung verschiedener Traktorenreifen bei unterschied- lichen Reifeninnendrücken mittels Drucksensormatten (Degrell, 2006)	146

Nummer		Seite
81.	Mit Sensormatten gemessene Druckverteilung (in 10 cm Tiefe) unter einem reibschlüssig angetriebenen Gurtbandlaufwerk (Weißbach et al., 1996)	147
82.	Gegenüberstellung der Auswirkung unterschiedlicher Fehlerbetrachtungen für Bodendruckwerte, die innerhalb des Vordruckniveaus lagen	151
83.	Gegenüberstellung der durchschnittlichen Differenzbodendrücke beider Radialreifenvarianten über die Messtiefen (20 – 40 cm)	155
84.	Vereinfachte zweidimensionale Modelldarstellung der idealisierten Druckausbreitung über die Bodentiefe zweier unterschiedlicher Lasten und Aufstandsflächen bei rechnerisch gleichem Kontaktflächendruck (verändert nach Zelenin, 1950)	156
85.	Vergleich des Druckabbaus der beiden Radvarianten zwischen erster und letzter Überrollung. Als Ausgangsbasis wurde der mittlere Bodendruck in 20 cm mit angegeben	158
86.	Bodendruckmessung mit Schlauchdrucksonden in einer Tiefe von 20 cm unter dem Bandlaufwerk	159
87.	Druckverlauf unter einem Laufwerk CAT 65 von Caterpillar in einer Tiefe von 10 cm (Weißbach, 1994)	160
88.	Schlauchdrucksondenmessung unter Bandlaufwerk mit 142 kN (Bunker voll) im November 2004; Messtiefe 45 cm; Bodenfeuchte 23,5 Gew.-%; Bodenart uT 4 (stark schluffiger Ton)	161
89.	Schlauchdrucksondenmessung unter dem Bandlaufwerk mit 113 kN (Bunker leer) im April 2006; Messtiefe 40 cm; Bodenfeuchte 24 Gew.-%; Bodenart sL (sandiger Lehm)	161
90.	Gegenüberstellung des Ausgangsniveaus in oberster Messtiefe sowie der Abbaurate über die Tiefenbereiche unter dem Gummiraupenlaufwerk	162
91.	Messung der Bodendeformation in einer Bodenrinne unter Laborbedingungen. Verglichen wurde ein 900 mm breiter Luftreifen mit 105 kN und einem Reifeninnendruck von 190 kPa mit einem 120 kN schwerem Gummibandlaufwerk (Ansorge und Godwin, 2006)	163
92.	Eindringwiderstandsmessung der drei Fahrwerksvarianten im Vergleich zur Kontrolle	164
93.	Eindringwiderstandsmessung in der Bodenrinne unter Rad- und Raupenlaufwerken mit unterschiedlicher Ausführung (Ansorge und Godwin, 2008). In der Legende sind die jeweiligen Bereifungen mit Radlast und Reifeninnendruck angegeben. T12 und T10.5 steht für die jeweilige Last des Raupenlaufwerkes	166

Nummer	Seite
94. Pneumatische Luftleitfähigkeit des unbefahrenen und befahrenen Bodens im Krumbereich (15 – 20 cm)	170
95. Einfluss der Dichtlagerung des Oberbodens auf den Ertrag von Sommerweizen (Geischeder et al., 2010)	172
96. Befahrbarkeitsmodell vereinfacht nach Tijinki und Spoor (2004)	175
97. Übersicht der Beprobungspartellen und dem Befahrungsmuster mit den unterschiedlichen Fahrwerken. ÜS I – V stehen für die fünf Überrollungssituationen mit: I = Band 112 kN; II = Rad 51,5 kN; III = 2 x Rad 51,5 kN; IV = 1 x Rad 23,5 kN und V = 4 x Rad 23,5 kN. Als Leitparameter wurden die Luftkapazitätswerte für die beiden Probenahmetiefen sowie der unbefahrenen und befahrenen Bereiche angegeben	192

Tabellenverzeichnis

Nummer		Seite
1.	Einteilung der Porendurchmesser (Blume, 1984)	25
2.	Kritische Werte für physikalische Bodenparameter in der Literatur	27
3.	Richtwerte für das optimale Porenvolumen und die Luftkapazität nach Bodenarten (Czeratzki, 1972)	29
4.	Richtwerte für die optimale Lagerungsdichte nach Bodenarten (Petelkau und Seidel, 1982)	29
5.	Regressionskoeffizienten zur Ermittlung der Kontaktfläche nach Diserens (2002)	38
6.	Vergleich von Untersuchungen zur Bodenverdichtung durch Landmaschinen mit Berücksichtigung des Faktors „Belastungsdauer“	46
7.	Zusammenfassung der Ergebnisse nach Bolling (1987) aus der Untersuchung zur mehrmaligen Befahrung mit einer Radlast von 25 kN; Bodenart: sL; Trockenrohdichte: 1,4 g/cm ³ ; Wassergehalt: 17,5 Vol.-%	48
8.	Untersuchungen zum Einfluss auf den Ertrag und Wirkung von Fahrverkehr auf landwirtschaftliche Flächen.	52
9.	Potenzial eines Radialtraktorreifens (Auszug aus Michelin Reifentabelle, 2007)	58
10.	Gegenüberstellung der Leistungsdaten des Michelin Traktorstandardreifens und des neu entwickelten XeoBib Reifens (Schlee et al., 2003)	60
11.	Übersicht von Nachrüstraupensätzen, die Anstelle der Reifenfelge auf den Naben von Traktoren und Endantrieben selbstfahrender Erntemaschinen montiert werden können	69
12.	Beispiele für Dreirad-/Fünfradfahrzeuge für minimalen Spuranteil und ganzheitliches Überfahren der Fläche	74
13.	Beispiele von Spezialfahrwerken in der Landwirtschaft	75
14.	Bodenschonende Breitreifen für Großmähdrescher mit 85 – 90 kN Radlast (verändert nach Rademacher und Weißbach, 2004)	77
15.	Spuranteil verschiedener KRB6 mit „Hundeganglenkung“ bei einer Arbeitsbreite von drei Metern und 900 mm breiten Vorderachsreifen	81
16.	Vergleich des Schlupfes bei unterschiedlichen Zugkraftbeiwerten zwischen Traktoren mit Zwillingsbereifung und Gummibandlaufwerk (Weißbach, 2003)	83

Nummer		Seite
17.	Gegenüberstellung der technischen Daten eines Mähdreschers von 1964 und 2004	85
18.	Versuchsansatz der Fahrwerkskonfigurationen	90
19.	Aufstellung der Fruchtfolge und der Grundbodenbearbeitung von 2003 – 2005	93
20.	Rad- und Bandlasten (Leergewicht mit ausgehobenem Rodeaggregat und Schmutz) der ausgewählten KRB6 während des Feldversuchs in Haardorf, Niederbayern (Geischeder et al., 2007)	93
21.	Festlegung und Einteilung der Druckklassen	105
22.	Klassifizierung von Porendurchmesser und Bodenkennwerte nach Hartge und Horn (1989), abgeändert durch Bodenparameter	107
23.	Maschinenparameter bei Versuchsdurchführung am 19. April 2006	112
24.	Zur Simulation der im Feld gemessenen Fahrzeugparameter (Raddimension / Radlast / Reifeninnendruck) und festgestellten Bodeneigenschaften (Bodenart / Lockerungstiefe/Oberbodenfestigkeit) wurden diese in das Programm TASC 2.0 (Diserens, 2010) eingegeben und getestet	113
25.	Signifikanz der maximalen Eindringwiderstände zwischen den drei Varianten mit der Gesamtbelastung von ca. 100 kN je Bodenstelle (ns = nicht signifikant; *s = signifikant bei $\alpha < 5\%$; **s = signifikant bei $\alpha < 1\%$)	130
26.	Zusammenfassung der Spurtiefe und der maximalen Eindringwiderstände mit Tiefenangabe aller Überrollungssituationen	130
27.	Zusammenfassung der nicht grafisch dargestellten bodenphysikalischen Parameter	131
28.	Aufstellung der Mittelwerte verdichtungsrelevanter Bodenparameter auf den unbefahrenen Bodenstellen	141
29.	Gesamtgewichte und Radlasten von KRB6 mit gefülltem Bunker auf der Seligenstädter Maschinenvorführung 2006	143
30.	Gegenüberstellung der gemessenen Radlasten und Aufstandsflächen der daraus berechneten mittleren Kontaktflächendrücken und den Simulationsergebnissen von TASC 2.0	144
31.	Form und Größe der im Feld ermittelten Kontaktflächen	145
32.	Gegenüberstellung der Bodendrücke der mit dem Rechenmodell TASC 2.0 simulierten Druckausbreitungen	149
33.	Durchschnittliche Druckerhöhung (Einfach- und Mehrfachüberrollung) in den Messtiefen der beiden Radvarianten	153

Nummer		Seite
34.	Zusammenstellung der signifikanten (x) Verformungen (GPV und LK) in den zwei Beprobungstiefen bei den dreijährigen Überrollungsversuchen mit KRB6	174
35.	Gemessene Bodendrucke mit den Schlauchdrucksonden. Die Einzelwerte stellen die Maximaldrücke jeder Messung dar	193
36.	Fehleranalyse durch Verrechnung verschiedener Vordrücke bei der Überrollungssituation mit dem Gummibandlaufwerk	194
37.	Zusammenfassung der Bodendruckveränderungen unter den verschiedenen Überrollungssituationen	195
38.	Berechnung des GMPw für die drei Gesamtbelastungsvarianten	196

Abkürzungen, Einheiten und Symbole

A	Fläche
AB	Arbeitsbreite
Al	Oberbodenhorizont aus dem Tonteilchen ausgewaschen wurden (l = lessiviert)
Ap	Durch Pflugarebeit gelockerter Oberboden (p von Pflug)
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Bt	Unterbodenhorizont in den Ton eingewaschen wurde (t = Ton)
DBV	Deutscher Bauernverband
DMS	Dehnungsmessstreifen
c	Konzentration
EU	Europäische Union
FAL	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
F_G	Gewichtskraft
FK	Feldkapazität
GPV	Gesamtporenvolumen
GMD	Gewogenen Mittleren Durchmesser
GMPw	Gewichteter Mittlerer verdichtungswirksamer Bodendruck
kPa	Kilo Pascal = bar = kg/cm ²
KRB 6	Sechsstufiger Köpfrödebunker (selbstfahrender Zuckerrübenvollernter)
LK	Luftkapazität
n	Anzahl
nFK	nutzbare Feldkapazität
Pi	Reifeninnendruck
PL	pneumatische Leitfähigkeit
PV	Porenvolumen
RKL	Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft
R ²	Bestimmtheitsmaß
s	Standardabweichung
SST	Soil Stress Transducer
StVO	Straßenverkehrsordnung
StVZO	Straßenverkehrszulassungsordnung
Sv	Spannung vertikal
t	Zeit
TASC	Tyres/Tracks and Soil Compaction
TW	Totwasser
ÜS	Überrollungssituation
UADA	United States Department of Agriculture
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VDI-MEG	Max Eyth Gesellschaft im Verein Deutscher Ingenieure
VK	Variationskoeffizient
Vol.	Volumen
v. n.	verändert nach

V_{\max}	Maximale Vorfahrtsgeschwindigkeit
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
%	Prozent
§	Paragraph
§§	Paragrafen
x"	Zoll engl. Inch (2,54 mm)
Ø	Durchschnitt

1 Einleitung

Die Landwirtschaft im 21. Jahrhundert steht vor großen Herausforderungen. Der Klimawandel, die Ernährung der schnell wachsenden Weltbevölkerung bei Verknappung der fossilen Brennstoffe stellen die Landwirtschaft vor neue Aufgaben. Eine zentrale Rolle spielen hierbei der Umgang mit dem Boden und seine Bewirtschaftung.

Der Boden ist für die Landwirtschaft eine endliche und nicht erneuerbare Ressource. Dieser limitierte Produktionsfaktor wird durch den Siedlungs- und Straßenbau weiter verknappt. Der Flächenverbrauch hierfür betrug in Deutschland zwischen 1996 und 2006 durchschnittlich 117 ha pro Tag (DBV Situationsbericht, 2007). Dadurch steht auch für die Nahrungsmittelproduktion immer weniger Fläche zur Verfügung. Neben der Funktion als Pflanzenstandort erfüllt der Boden weitere wichtige Aufgaben wie die Speicherung und Filterung von Wasser. Der Boden dient außerdem als Puffer- und Transportmedium der eingebrachten Stoffe. Somit erfüllt der Boden wichtige Aufgaben zum Trink- und Hochwasserschutz. Als Kohlenstoffspeicher sind Böden für den Klimaschutz von Bedeutung.

In der Landwirtschaft dient der Boden als Wuchsraum und Nährstoffspeicher für Pflanzen sowie als Fahrbahn für landwirtschaftliche Maschinen. Durch die anhaltende Rationalisierung und den voranschreitenden Strukturwandel in der Landwirtschaft werden immer größere und leistungsfähigere Landmaschinen zur Bewirtschaftung der Nutzflächen eingesetzt. Zusätzlich zur Rationalisierung ist die Ertragssteigerung ein wesentlicher Faktor zur Erhöhung der Produktivität. Neben den pflanzenbaulichen Aspekten wie Düngung und Züchtung sind vor allem die natürlichen Rahmenbedingungen, wie Witterung und Bodenbonität hierfür verantwortlich. Um auf den jeweiligen Standorten maximale Erträge erreichen zu können, müssen die natürlich gegebenen Bodenfunktionen erhalten und gefördert werden. Ziel muss es sein, dass ein möglichst hoher Anteil der Niederschlagsmenge vom Boden aufgenommen und gespeichert werden kann, um für die Pflanzen während der Vegetation zur Verfügung zu stehen.

Die durch zunehmende Technisierung immer größer und schwerer werdenden Maschinen stellen scheinbar eine Diskrepanz zwischen Bodenfruchtbarkeit einerseits und Rationalisierungsfortschritt andererseits dar, was zu kontroversen Diskussionen führt. Die hohe Heterogenität und Variabilität der Böden erschwert eine einheitliche Aussage hinsichtlich Befahrbarkeit, Belastbarkeit und Lastgrenzen durch Landmaschinen.

Schlagworte wie das Prinzip der nachhaltigen landwirtschaftlichen Produktion und die „gute fachliche Praxis“ beschreiben den Umgang mit moderner Technik zur wettbewerbsfähigen und umweltschonenden Bewirtschaftung aller genutzten Böden. Konkrete Hinweise sind im Bundes-Bodenschutzgesetz (1998) verankert, wobei der Boden neben Wasser und Luft als drittes schutzwürdiges Medium gilt.

„Die Vorsorge gegen das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen (§§ 7, 17 BBodSchG) und die Abwehr daraus resultierender Gefahren (§§ 4, 17 BBodSchG) sind in diesem Gesetz rechtlich geregelt. Die Vorsorgepflicht innerhalb der landwirtschaftlichen Bodennutzung wird durch die Einhaltung von Grundsätzen der guten fachlichen Praxis erfüllt. Dabei ist Bodenbearbeitung standortangepasst durchzuführen, sind Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion zu vermeiden, die biologische Aktivität des Bodens, der standorttypische Humusgehalt und naturbetonte Strukturelemente zu erhalten und zu fördern“ (BMU, 1998).

In der Ende 2007 veröffentlichten VDI Richtlinie 6101 „Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden“ werden konkrete Entscheidungshilfen zur Befahrbarkeit von unterschiedlichen, landwirtschaftlich genutzten Böden definiert. Die Richtlinie leitet aus dem bisherigen Stand des Wissens zur Interaktion zwischen Maschine und Boden und dem Stand der Landtechnik bodenschonende Maßnahmen zur Maschinenauswahl und zum Maschineneinsatz ab. In der Praxis sind Radlasten, Kontaktflächen drücke und Reifeninnendrucke der Befahrbarkeit anzupassen. Zu Grunde gelegt wurden unter anderem die Schemata von Befahrbarkeitsleitlinien einer EU-Arbeitsgruppe (Chamen et al., 2003; Sommer, 1984). Hierbei wird die Befahrbarkeit je nach Vorbelastung des Bodens in vier potenzielle Empfindlichkeitsklassen eingeteilt, wobei die Bodenfeuchte berücksichtigt wird. Die Kernaussage lautet: 200 kPa Reifeninnendruck bei trockenen Bodenbedingungen und 100 kPa bei feuchten Verhältnissen sollen nicht überschritten werden. Generell gilt es die Fruchtbarkeit der Böden zu erhalten und zu verbessern. Hierfür müssen alle ackerbaulichen, pflanzenbaulichen und landtechnischen Maßnahmen ergriffen werden, um die Risiken einer Schädigung durch mechanische Überbeanspruchung zu vermeiden bzw. zu minimieren. In der nachfolgenden Problemstellung wird die Interaktion zwischen Maschine und Boden aufgezeigt und konkretisiert.

2 Problemstellung

Der zunehmende Bedarf pflanzlicher Produkte zur Bereitstellung von Nahrungsmitteln, Futtermitteln für die Tierhaltung und als Rohstoff für die Erzeugung von biogenen Brennstoffen wie Biogas und Biodiesel oder die stoffliche Nutzung (BMELVL, 2007 und DBV, 2008) erfordert auch in Zukunft eine sichere Ertragsfähigkeit landwirtschaftlicher Nutzflächen.

Die Auswirkungen der klimatischen Änderungen führen zu einer Beeinflussung der bisherigen natürlichen Gegebenheiten (Stock, 2007). Diese können sich langfristig negativ auf die Ertragsfähigkeit der Böden auswirken. Gerade bei extremen Witterungsverhältnissen, wie z. B. der länger anhaltenden Sommertrockenheit 2003, wurde dies am unterdurchschnittlichen Getreideertrag sichtbar (DBV, 2008). Die klimatischen Änderungen bedürfen mehr denn je eines anspruchsvolleren Wassermanagements. Eine zentrale Rolle spielt hierfür ein funktionsfähiger Boden, der nach Möglichkeit die gesamte Niederschlagsmenge aufnehmen und speichern kann, um den Pflanzen bei Bedarf zur Verfügung zu stehen.

Bodenverdichtungen wirken sich direkt auf die Umwelt aus, da unter anderem die Wasserdurchlässigkeit des Bodens abnimmt und so z. B. das Bodenerosionsrisiko zunimmt (Horn et al., 1995). In einer Veröffentlichung von van der Ploeg et al. (2006) wird der oberflächliche Wasserabfluss als Folge der zunehmenden Unterbodenverdichtung genannt, worauf die Entstehung von Hochwasser zurückzuführen sei. Laut van der Ploeg et al. (2006) ist die zunehmende Bodenverdichtung eine Folge der steigenden Radlasten von Landmaschinen. Als Konsequenz daraus sollten diese zukünftig per Gesetz beschränkt werden. Im Gegensatz zum Gartenbau ist es in der Landwirtschaft nicht üblich, eine strikte Trennung zwischen Wuchsraum für Pflanzen und Fahrbahn für die Maschinen einzuhalten. Je nach Bewirtschaftungssystem, Maschinenarbeitsbreite und Fruchtfolge verändert sich der Flächenanteil, der von Vegetation zu Vegetation befahren und unbefahren bleibt. Generell birgt die maschinelle Bewirtschaftung der Böden ein Risiko hinsichtlich Verdichtungen. In der agrarwissenschaftlichen Literatur wird von dieser Tatsache seit Beginn der landwirtschaftlichen Technisierung berichtet. Der Einsatz von schweren Landmaschinen kann die Bodenfunktionen, durch eine stetige Zunahme der Bodenverdichtung, beeinträchtigen (Söhne, 1953; Gill und Vanderberg, 1967; Petelkau et al., 1988; Dürr et al., 1994). Den Einfluss auf das Pflanzenwachstum und den Ertrag durch das Befahren landwirtschaftlicher Nutzflächen mit Landmaschinen haben unter anderem von Chamen et al. (2003) und Håkansson (2005) umfassend beschrieben. So konnte Håkansson et al. (1985) zeigen, dass sich in einem Langzeitversuch jede Art der Befahrung langfristig ertragsmindernd auswirkt.

Der eingangs erwähnte Trend hin zu immer leistungsfähigeren Maschinen geht einher mit zunehmenden Maschinenmassen und der damit verbundenen Erhöhung der Radlast (Weißbach, 2001). Laut Schulze-Lammers et al. (2001) und Weißbach (2003) soll die Verringerung der Überrollhäufigkeit und das niedrigere Leistungsgewicht, verbunden mit den sich verringernden Feldarbeitstagen, die Radlaststeigerung ausgleichen und Schädigungen vermeiden. Der Trend hin zu höheren Lasten bei den Transportfahrzeugen, wie z. B. Güllefässern, Transport-, Ladewägen usw., ist besonders deutlich zu erkennen. Der starke Anstieg bei der Nutzung regenerativer Energie hat zur Folge, dass hohe Tonnagen an Biomasse innerhalb kurzer Zeit vom Feld abgefahren und große Mengen an Gärsubstratresten auf die Felder zurückgeführt werden müssen. Dabei steigt neben den Fahrzeugmassen auch der Fahrverkehr auf den Feldern (Weißbach, 2001).

Der wirtschaftliche Einsatz von leistungsfähigen Großmaschinen erfordert eine hohe Auslastung. Damit steigt die Gefahr, dass die Böden zu ungünstigen Zeitpunkten wie beispielsweise bei nassen Bedingungen im Herbst oder im Frühjahr befahren werden. Daraus erwächst grundsätzlich die Sorge, dass die Bodenfunktionen geschädigt werden, indem es zu so genannten Schadverdichtungen im Ober- und Unterboden kommen kann. Da der Unterboden von Reparaturmaßnahmen nur schwer oder kaum erreicht wird, besteht dort die Gefahr von irreparablen Schädigungen, die sich langfristig auf die Ertragsfähigkeit auswirken (Etana und Håkansson, 1994; Håkansson und Reeder, 1994).

Der wirtschaftliche Druck zu leistungsfähigeren und somit zu größeren und schwereren Maschinen, die länger auf dem Feld eingesetzt werden können, steht im scheinbaren Widerspruch zur Bodenschonung und wird in der Fachliteratur unterschiedlich bewertet. Die Maschinenhersteller haben mit neuen Fahrwerkskonzepten (Allradlenkung/Tridemfahrwerke), einer Vergrößerung der Aufstandsflächen sowie mit der Weiterentwicklung von Reifen- und Raupentechnologie für die Landwirtschaft reagiert.

Die gesetzlichen Auflagen hinsichtlich der maximalen Maschinenabmessungen zur Straßenfahrt stehen in Konkurrenz zur technischen Umsetzbarkeit groß dimensionierter Fahrwerke.

Die Frage nach leistungsfähigen und zugleich bodenschonenden Fahrwerken ist komplex. Die Sichtung der Literatur ergibt z. T. widersprüchliche Aussagen was den bodenschonenden Einsatz von Gummibandlaufwerken oder von mehrachsigen Fahrwerken anbelangt. Auch bleibt die Frage nach einem Bewertungsmodell für Fahrwerke offen, das Fahrwerke landwirtschaftlicher Maschinen in typischen Feldeinsatz vergleichbar macht.

3 Stand des Wissens

Nachfolgend sollen die Zusammenhänge beim Befahren landwirtschaftlicher Böden mit Landmaschinen an Hand von den in der Literatur beschriebenen Ergebnissen zusammengefasst dargestellt werden. Die Haupteinflussfaktoren auf die Bodenbeanspruchung sind die boden- und fahrzeugspezifischen Parameter. Nachfolgend wird auf die grundsätzlichen Zusammenhänge der Bodenmechanik eingegangen und die in der Literatur verwendeten Begriffe definiert.

3.1 Grundlagen der Bodenmechanik

Wenn durch ein Fahrwerk im Boden ein Spannungsfeld erzeugt wird, kann von einer Bodenbeanspruchung gesprochen werden. Diese sich im Boden ausbreitenden Spannungen können als Druckzwiebelmodell dargestellt werden, das auf Grundlagenarbeiten zur landtechnischen Bodenmechanik von Söhne (1951, 1952, 1953) zurückgeht.

Als Folge der Bodenbeanspruchung tritt eine Verformung des Bodens ein, welche in der Regel zu einer Zunahme der Lagerungsdichte führt. Nach Söhne (1952) lässt sich die Verformung in zwei Arten differenzieren:

- Von einer elastischen Bodenverformung wird gesprochen, wenn die Verformung durch eingeschlossene Luft und Humusbestandteile im Boden nach der Überfahrt wieder aufgehoben wird. Der Boden „federt“ wieder in die Ausgangslage zurück.
- Eine plastische Verformung entsteht im Wesentlichen durch die Sackungsverdichtung. Söhne (1952) definiert diese Art der Bodenverformung über eine Verringerung des Porenvolumens als Folge des ausgeübten Druckes. Hierbei werden die mit Luft und Wasser gefüllten Poren regelrecht ausgepresst.

Für das Bodenleben und das Pflanzenwachstum stellt die plastische Verformung auf Ackerböden das entscheidende Problem dar. Sommer (1985) unterschied bei der Ursachenforschung zwischen der mechanischen Belastung, der Beanspruchung des Bodens und der Bodenverformung als Auswirkung des einwirkenden Bodendruckes. Das Modell nach Sommer (1985) zur Beschreibung des Lasteintrages in den Boden bei einer Radüberrollung ist in Abb. 1 dargestellt.

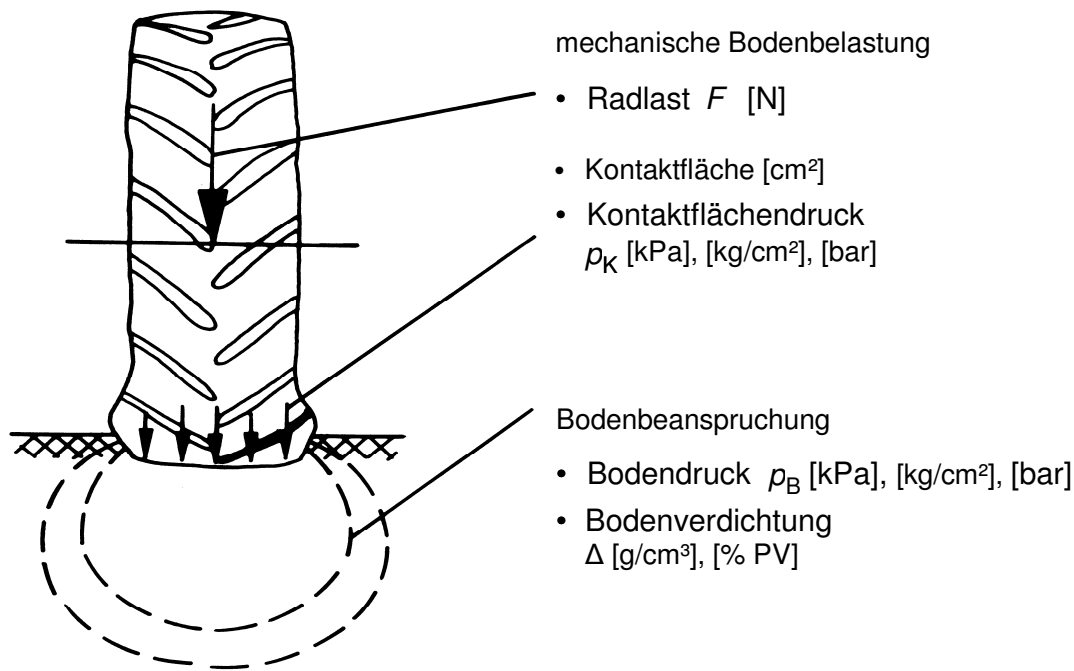


Abb. 1: Belastung, Beanspruchung und Verdichtung des Bodens (verändert nach Sommer, 1985)

Zur Bodenbelastung kann alles gezählt werden was sich auf bzw. über der Ackeroberfläche abspielt und sich dabei auf den Boden abstützt. Zur Bodenbeanspruchung dagegen zählen die Auswirkungen, die sich im Boden durch die Belastung einstellen bzw. messtechnisch erfasst werden können.

3.1.1 Bodenbelastung, Bodenbeanspruchung und Bodenverdichtung

Nach Sommer (1985) wird von einer elastischen Bodenverformung gesprochen, wenn die eingeleitete Spannung (durch Bodenbeanspruchung) im Betrag kleiner als die Vorbelastung (Normalspannung) ist. Der Boden gibt somit nach, jedoch ohne eine bleibende Verformung zurück zu behalten. Er ‚trägt‘ die Last entlang der Wiederverdichtungskurve, wobei die Eigenstabilität nicht überschritten wird. Ist die eingeleitete Spannung im Betrag größer als die Vorbelastung, so gibt der Boden nach und die Bodenverformung bleibt dauerhaft bestehen. Die Traglast und somit die Eigenstabilität des Bodens wurden überschritten, eine plastische Bodenverformung verläuft entlang der Erstverdichtungsgeraden. In der Abb. 2 gezeigten Darstellung nach dem Modell von Hartge und Horn (1999) ist der Zusammenhang zwischen elastischer und plastischer Verformung beschrieben. Grundsätzlich verringert sich die Porenziffer des Bodens mit der Erstbelastung. Bei der elastischen Verformung nimmt die Porenziffer nach der Entlastung wieder zu, jedoch nicht auf Höhe des Ausgangsniveaus. Durch eine wiederholte Belastung verringert sich die Porenziffererhöhung nach der Entlastung. Findet keine Porenziffererhöhung nach einer Entlastung statt, wird von einer plastischen Verformung gesprochen.

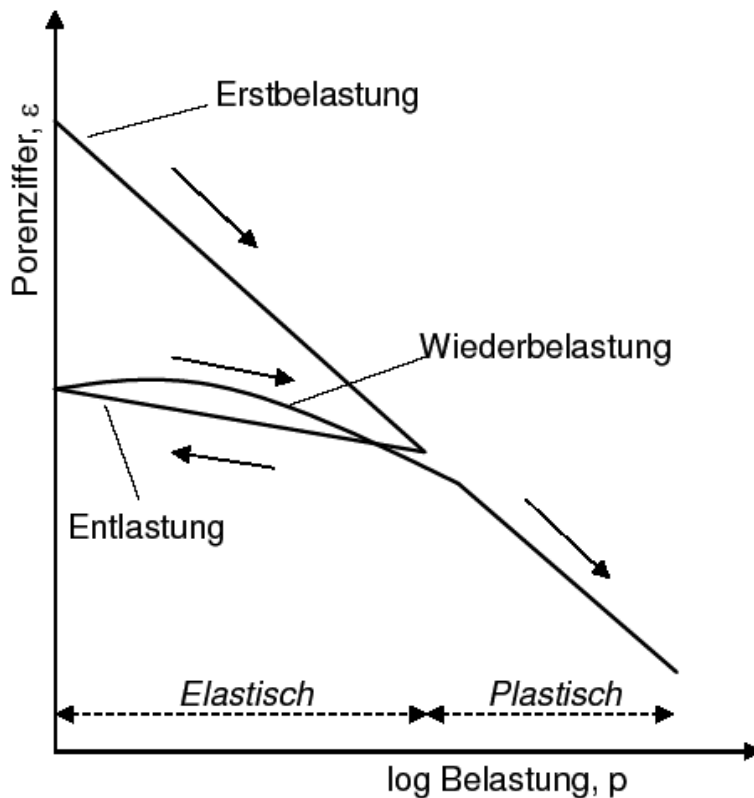


Abb. 2: Durch die semilogarithmische Darstellung der idealisierten Drucksetzungskurve entsteht eine Gerade. Der Grenzübergang zwischen Erstverdichtungs- und Wiederverdichtungsast ergibt die Vorbelastung, die zur Vorhersage des Verhaltens des Bodens bei gegebenen Belastungen verwendbar ist (Hartge und Horn, 1999)

3.1.1.1 Bodenverdichtungen

Generell wird von einer Bodenverdichtung gesprochen, wenn infolge mechanischer Belastung, z. B. bei der Überfahrt mit einer Maschine, die Bodendichte $[g/cm^3]$ zunimmt (Scheffer und Schachtschabel, 1979). Dabei wird hauptsächlich der Anteil der luftgefüllten Grobporen verringert (vgl. Tab. 1), weil sich die wassergefüllten Poren nicht oder nur wenig komprimieren lassen.

Tab. 1: Einteilung der Porendurchmesser (Blume, 1984)

Porentyp	Durchmesser
weite Grobporen	$\geq 50 \mu m$
enge Grobporen	$< 50 - 10 \mu m$
Mittelporen	$< 10 - 0,2 \mu m$
Feinporen	$< 0,2 \mu m$

Wenn eine Bodenverdichtung zu Gefügeveränderungen führt die anhaltende negative Auswirkungen auf die Funktionen des Bodens haben, liegt eine Bodenschadverdichtung vor, wobei zumeist das Wurzelwachstum eingeschränkt wird (Dumbeck, 1986; Harrach und Vorderbrügge, 1991; Sommer und Brunotte, 2003).

3.1.1.2 Anthropogene Bodenverdichtungen

Nicht jede Verdichtung des Bodens stellt eine Schadverdichtung dar. In bestimmten Situationen ist dieser Effekt erwünscht. Der Packer wird nach dem Pflug eingesetzt, um den überlockerten Oberboden rückzuverfestigen und den Kapillarwasseraufstieg zu gewährleisten. Anders ist dies im nicht regelmäßig gelockerten krumennahen Unterboden zu beurteilen. Hier bewirken Bodenverdichtungen über das Maß der Bodenfestigkeit hinaus das Gegenteil. Eine so genannte plastische Verformung kann zu einer nachhaltigen Störung der Bodenfunktionen führen.

Bei plastischer Verformung kollabieren zuerst die Grobporen (Sommer, 1986), da sie durch ihre Großvolumigkeit die geringste Festigkeit aufweisen. Im weiteren Verlauf werden die Bodenpartikel solange horizontal verschoben, bis das Kräftegleichgewicht aus Spannungseintrag auf der einen und der Stabilität der Festpartikel und des Bodenwassers auf der anderen Seite wiederhergestellt ist. Dadurch wird die Kornkontaktzahl erhöht (Lebert et al., 1991), der Anteil der weiten Grobporen verringert sich (= Verringerung des Porenvolumens), die Feinporen bleiben unbeeinflusst (Wilde, 2000). Nach Entlastung bleibt eine Bodenverformung zurück. Diese wird als eine Schadverdichtung bezeichnet, wenn die Bodenfunktionen (Produktions-, Lebensraum- und Regelungsfunktion) negativ beeinflusst sind (Abb. 3).

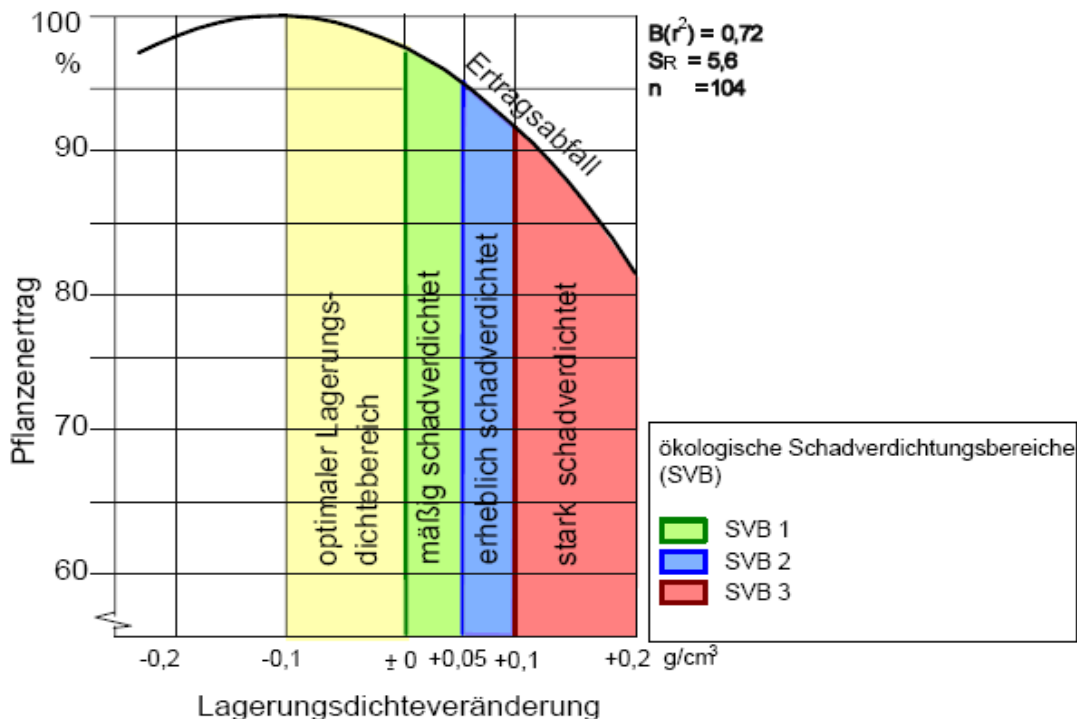


Abb. 3: Auswirkungen der Bodendichte auf den Ertrag (Frielinghaus et al., 2001)

3.1.1.3 Schadverdichtungsgrenzwerte

Die in der Literatur festgelegten Schadverdichtungsgrenzwerte geben Auskunft, ob mit Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen zu rechnen ist. Modelle, die zur Abschätzung des Risikos dienen, wurden auf der Annahme von Schadverdichtungsgrenzwerten erstellt. Zu nennen sind u. a. die SVGK nach ZALF (Schadverdichtungsgefährdungsklassen nach dem Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung) und das TASC (Tyres/Tracks And Soil Compaction) der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik Tänikon. Grundannahme ist, dass nur dann mit Schadverdichtungen zu rechnen ist, wenn die Bodenbeanspruchung die Bodenbelastbarkeit übersteigt. Im TASC-Modell erfolgt die Belastungseinschätzung anhand der Vorbelastung, in den SVGK an den im Oberboden maximalen Trockenrohdichten, die mit einem Ertragsrückgang korrelieren. Als wesentlich sind die Trockenrohdichte und das Gesamtporenvolumen in der Literatur herausgestellt (Weißbach, 1994). Eine Übersicht von Grenzwerten verschiedener Bodenparameter sind in Tab. 2 zusammengefasst dargestellt.

Tab. 2: Kritische Werte für physikalische Bodenparameter in der Literatur

Parameter	Werte	Erläuterung	Autor
Trockenrohdichte	> 1,60 g/cm ³ > 1,45 g/cm ³ > 1,20 g/cm ³	Sand Lehm Ton	Czeratzki, 1972
	> 1,32 – 1,61 g/cm ³	abhängig von der Bodenart	Frielinghaus et al., 2001
Gesamtporenvolumen	≤ 44 Vol.-%	Lehm	Czeratzki, 1972
	≤ 40 Vol.-%	Lehm	Kuntze et al., 1988
	≤ 39 Vol.-%	Lehm	Scheffer u. Schachtschabel, 1992
Luftkapazität (bei pF 2,0)	≤ 15 Vol.-% ≤ 10 Vol.-% ≤ 12 Vol.-%	für den Oberboden Sand Lehm Ton	Czeratzki, 1972
	≤ 8 Vol.-%	für den Oberboden	Wernder und Paul, 1999
	≤ 5 Vol.-%	für den Unterboden	
	≤ 5 Vol.-%	verdichtete Böden	Smith und Dickson, 1990
	≤ 10 Vol.-%	unverdichtete Böden	Stepniewski et al., 1994
	5 – 8 Vol.-%	für den Unterboden	Stepniewski et al., 1994

Für die Luftleitfähigkeit existieren wenige Schadverdichtungsgrenzwerte. Knoch (1966) nimmt eine Einteilung in Klassen von geringen bis hohen Werten in Volumen-Prozent (Vol.-%) vor. Für den Wasserhaushalt existiert u. a. eine Klassifizierung von der Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde (1994), ebenfalls mit einer Einstufung von geringen bis hohen Werten.

3.1.2 Bodenkundliche Zusammenhänge

Die Bodenbedingungen beeinflussen das Wurzel- und somit das Pflanzenwachstum sowie die Befahrbarkeit mit Maschinen (Sommer, 1985). Da der Boden als Fahrbahn und Pflanzenstandort dient, müssen die Eigenschaften des Bodens bekannt sein, um einer möglichen Gefährdung vorzubeugen und die Risiken bei Befahrung und Bodenzustand abschätzen zu können. Kuntze (1983) zeigte den Zusammenhang zwischen dem Bodengefüge und der Durchwurzelbarkeit und somit der mechanischen Stabilität der Böden. Außerdem werden die für das Pflanzenwachstum optimalen Faktoren, wie Bodenwasser, Bodenluft, Bodenwärmehaushalt sowie Speicherung und Transport von Nährstoffen beeinflusst (Sommer, 1985). Die für das Pflanzenwachstum notwendigen Bodenbedingungen stehen den Voraussetzungen des Bodens zur Nutzung als Fahrbahn entgegen (Sommer, 1985). Je nach Eigenstabilität des Bodens zur Zeit des Befahrens ist der Boden mehr oder weniger tragfähig.

Nach Weißbach (2003) ist die Eigenstabilität definiert als der Spannungsbetrag, welchen der Boden in der Lage ist aufzunehmen, ohne sich dabei zu verformen. Als messbare Größe der Eigenstabilität dient die Vorbelastung, auf die folgende endogene Faktoren verändert nach Weißbach (2003), einen Einfluss ausüben:

- Porenvolumen
- Lagerungsdichte
- Bodenfeuchte
- Bodenart
- Schichtung
- Bodenbearbeitungsintensität

3.1.2.1 Porenvolumen

Das Porenvolumen beschreibt den prozentualen Anteil des Bodenvolumens, der nicht aus Feststoffen besteht und mit Luft oder Wasser gefüllt ist. Bei einem hohen Feststoffanteil und somit hoher Lagerungsdichte ist der Porenanteil geringer, wodurch der Boden tragfähiger ist. Die Poren sind jedoch für ein optimales Pflanzenwachstum erforderlich, da sie die Durchwurzelung, Wasserverfügbarkeit, Erwärmung und Durchlüftung des Bodens erleichtern. Je nach Bodenart liegt das optimale Porenvolumen zwischen 40 und 47 Vol.-% des Bodenvolumens (Czeratzki, 1972). Czeratzki (1972) sowie Petelkau und Seidel (1982) definierten unterschiedliche bodenphysikalischer Richtwerte. In Tab. 3 sind die optimalen Porenvolumina mit den Luftkapazitäten aufgeführt.

Tab. 3: Richtwerte für das optimale Porenvolumen und die Luftkapazität nach Bodenarten (Czeratzki, 1972)

Bodenbestandteile	Porenvolumen [Vol.-%]	Luftkapazität [Vol.-%]
Sand	40	15
Lehm	45	10
Ton	47	12

3.1.2.2 Lagerungsdichte

Die Bodenpartikelsortierung bestimmt maßgeblich die Ausprägung der Lagerungsdichte unverdichteter Böden. Die Lagerungsdichte in $[g/cm^3]$ ergibt sich aus der so genannten Vorbelastung der Böden und variiert über die Bodentiefe. Die lockeren Schichten weisen einen höheren Anteil an Grobporen auf, in denen überwiegend Luft eingeschlossen ist. Diese lockeren Böden neigen bereits bei geringen Lasten zur Verdichtung und werden als verdichtungsempfindlich eingestuft. Vorverdichtete Böden bzw. Bodenschichten weisen eine höhere Tragfähigkeit auf, da eine größere Reibfläche zwischen den Bodenpartikeln ausgebildet ist (Horn, 1986). In Tab. 4 sind analysierte Richtwerte zur Lagerungsdichte der unterschiedlichen Bodenarten dargestellt.

Tab. 4: Richtwerte für die optimale Lagerungsdichte nach Bodenarten (Petelkau und Seidel, 1982)

Bodenbestandteile	Lagerungsdichte [g/cm³]
Sand	1,51 – 1,53
Lehmiger Schluff	1,41 – 1,46
Ton	1,28 – 1,30

3.1.2.3 Bodenfeuchte

Je nach Porengröße und Wassersättigung des Bodens ist die enthaltene Wassermenge unterschiedlich. Der Einfluss der Bodenfeuchte auf das Verdichtungsverhalten ist sehr ausgeprägt und reicht vom plastischen Fließen nasser Böden bis zu harten Aggregaten bei Trockenheit (Hartge, 1971). Bei hoher Bodenfeuchte wirkt sich das Wasser destabilisierend auf den Boden aus, da sich ein Gleitfilm zwischen den Bodenteilchen bildet und damit die Verschiebung der Bodenteilchen erleichtert wird. Horn (1988) erklärte die Befahrbarkeit der Böden in Verbindung mit der Bodenfeuchte. Die Bodenstabilität hängt von der Ausbildung von Wassermenisken zwischen den Mineralteilchen ab. Bei einer geringen Bodenfeuchte wird die Stabilität des Bodens erhöht, da die Spannung der Wassermenisken stärker wirkt. Je

kleiner die Bodenteilchen (z. B. bei Ton) sind, desto größer ist die Teilchenoberfläche, die wiederum eine größere Kontaktfläche für die Wassermenisken bietet. Trocknet ein Tonmineral aus, so erhöht sich die Spannung und es entstehen festere Bodenaggregate. Bei Laborversuchen hat Bolling (1987) Ergebnisse von Garcia (1967) bestätigt, wonach ein steigender Wassergehalt eine geringere Bodenstabilität zur Folge hat. Der Effekt wird umso größer, je kleiner die Ausgangsdichte der Bodenprobe ist.

3.1.2.4 Bodenart

Jede Bodenart, die sich aus der Zusammensetzung und dem Anteil an Ton, Schluff und Sand ergibt, ist durch eine andere natürliche Stabilität charakterisiert. Es kann keine unabhängige Betrachtung der Bodenart ohne Berücksichtigung des Wassergehaltes durchgeführt werden, da dieser das Verhalten der Böden deutlich beeinflusst. Wie bereits beschrieben, sind Böden mit hohem Tonanteil unter trockenen Bedingungen gut tragfähig und bei feuchten Verhältnissen sehr verdichtungsempfindlich. Ein trockener tonreicher Boden stellt somit eine gute Fahrbahn für den landwirtschaftlichen Verkehr dar. In Abb. 4 ist die Verdichtungskurve für Schwarzerdeböden dargestellt, die hohe Porenvolumina aufweisen. Die nach Sommer (1985) berechnete Kurve verdeutlicht eine Abnahme des Porenvolumens von 5 Vol.-% bei einer Bodendruckerhöhung von 50 auf 286 kPa.

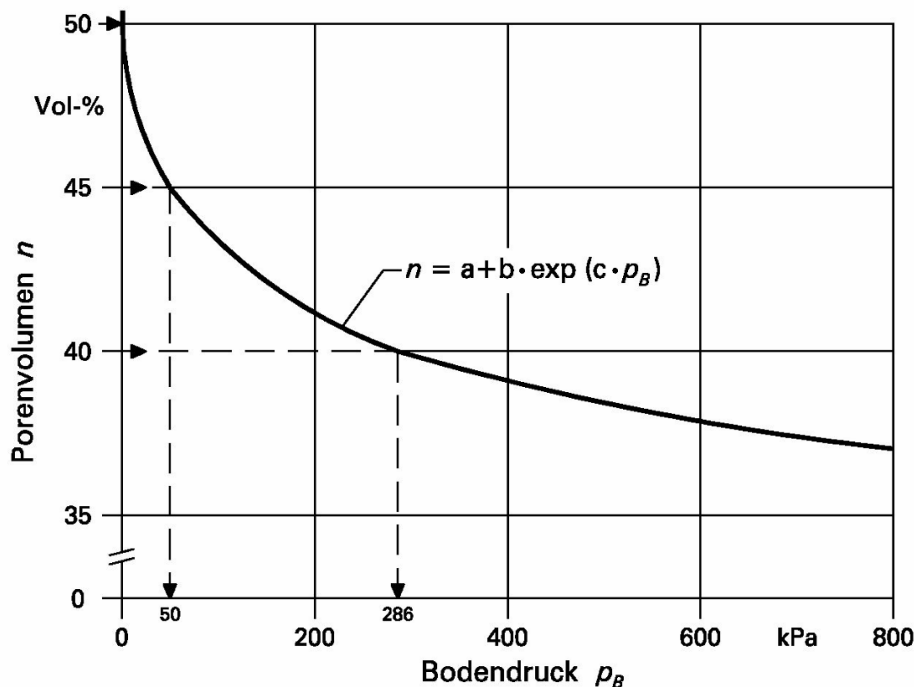


Abb. 4: Verdichtungskurve von Schwarzerdeböden nach Sommer, 1986, (die Kurve wurde an Hand von Proben des Oberbodens ermittelt)

Eine weitere Druckerhöhung bis 800 kPa reduziert das Porenvolumen auf 37 Vol.-%. Nach den Richtwerten von Czeratzki (1972) sollte aber der Bodendruck deutlich < 286 kPa sein, um auf keinen Fall nachteiligen Auswirkungen auf den Pflanzenertrag zu erhalten.

3.1.2.5 Schichtung

Zusätzlich zu den bereits aufgezeigten bodenspezifischen Einflussfaktoren wird die Spannungsausbreitung durch die Schichtung des Bodens beeinflusst. Ein regelmäßig bearbeiteter Boden verdichtet leichter, da durch die Lockerung große Hohlräume geschaffen werden, die eine geringe Stabilität aufweisen. Der Übergang der regelmäßig gelockerten Zone hin zum Unterboden ist meist durch eine dichter lagernde Schicht gekennzeichnet. Die direkt anschließende Krumbasis, auch Pflugsohle genannt, kann unterschiedlich mächtig ausfallen und ist ein Resultat der Vorbelastung tiefer reichender Bodenverformungen. Auf diesem künstlich geschaffenen Horizont stützen sich die Werkzeuge der Bodenbereitungsgeräte bzw. das furchenseitige Traktorräder, falls nicht „On-Land“ gepflügt wird, ab. Die höhere Lagerungsdichte in dieser Schicht bleibt bei Beibehaltung der gleichen Lockerungstiefe erhalten. Die höhere Tragfähigkeit absorbiert die einwirkenden Spannungen besser (Bolling, 1987). Schwanghart (1989) stellte bei Untersuchungen fest, dass die so genannte Pflugsohle eine Art Widerlager darstellt. Bei kleiner Belastung wurden geringere und bei höheren Lasten größere Effekte im Oberboden gegenüber homogen tief gelockerten Böden festgestellt. Die Lagerungsdichte des darunter liegenden Horizonts (Unterboden) weist häufig eine geringere Dichte auf.

3.1.2.6 Bearbeitungsintensität

Brunotte (1990) stellte bei Untersuchungen zur Bodenstabilität verschiedener Bearbeitungsintensitäten fest, dass konservierend bearbeitete Böden hohe Radlasten unter feuchten Bedingungen zur Zuckerrübenenernte deutlich besser abstützen und der Bodendruck über die Tiefe schneller abgebaut wird als dies bei konventionell bestellten Flächen mit intensiver Lockerung durch Pflug und Grubber der Fall ist. Die beiden Kennlinien für den Druckabbau sind in der Abb. 5 gegenübergestellt.

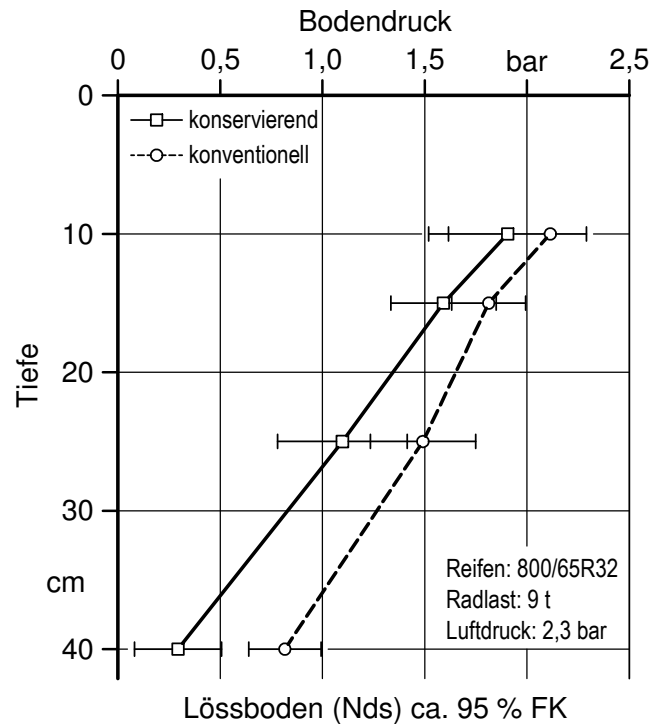


Abb. 5: Druckausbreitung im Boden in Abhängigkeit von der Bearbeitungsintensität (Brunotte, 2007)

Brunotte (1990) bestätigte damit die Untersuchungen von Tebrügge (1982) und Griebel (1986), dass die reduzierte Bearbeitungsintensität bei konservierender Bodenbearbeitung als bodenstrukturfördernd angesehen werden kann. Horn (2001) untersuchte verschiedene Bodenhorizonte gleicher Bodenart bei unterschiedlichen Bearbeitungssystemen. Dabei stellte er fest, dass die Bodenstabilität bei der konservierenden Bearbeitung im Oberboden höher ist als bei der konventionellen (mit Pflug). Im Bereich der Krumbasis (30 cm) kehrte sich dieser Trend um. In dieser Tiefe zeigte der konservierend bearbeitete Boden (ohne Pflug) eine geringere Dichtlagerung der Krumbasis. Dies führte er auf die höhere Tragfähigkeit des Oberbodens zurück bzw. auf den Pflugverzicht, da hierbei kein Befahren dieses Bodenbereiches mehr stattfindet. Die Ergebnisse sind in Abb. 6 zusammenfassend dargestellt.

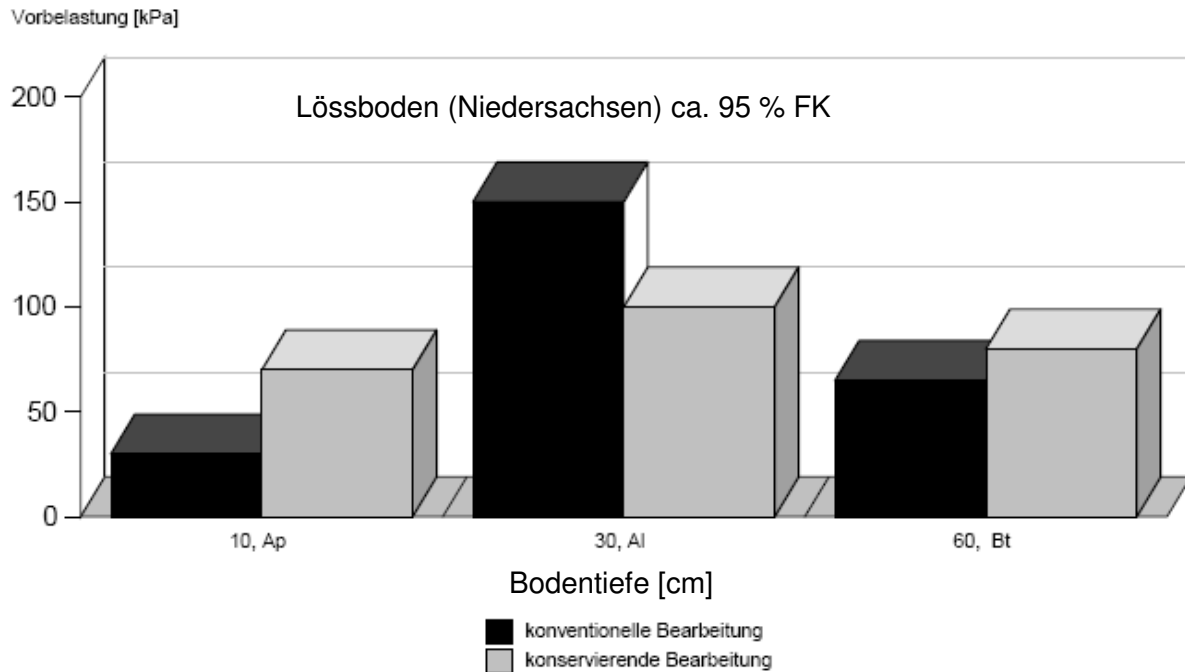


Abb. 6: Tiefenverteilung der mechanischen Eigenfestigkeit (= Vorbelastung; [kPa]) in einer Parabraunerde aus Löss in Abhängigkeit von der Bewirtschaftungsweise (Horn, 2001). Ap = Durch Pflugarebeit gelockerter Oberboden; Al = Oberbodenhorizont aus dem Tonteilchen ausgewaschen wurden; Bt = Unterbodenhorizont in den Ton eingewaschen wurde

3.1.3 Technische Zusammenhänge

Zur Bodenbelastung zählt alles, was auf den Boden durch Fahrwerkstechnik über eine Kontaktfläche einwirkt. Grundsätzlich stützen Fahrwerke ihre Last auf den Boden durch Einsinken der Stollen in die Oberfläche und durch die Auflage des Zwischenstollenbereiches ab. Dies führt zu einer Verzahnung mit den Bodenpartikeln, welche die Spannungen aufnehmen. Nach Sommer (1985) wirken zum Zeitpunkt der Befahrung verschiedene vertikale und horizontale Kräfte wie Radlast, Scherkräfte und Schlupf von Antriebsrädern sowie die Überrollhäufigkeit auf die Bodenoberfläche. Diese Vielzahl an Variablen erschwert die Ermittlung der Bodenbelastung. Bevor auf die in der Literatur beschriebenen Wirkungen der in der Landwirtschaft eingesetzten Fahrwerke eingegangen wird, sollen die technischen Zusammenhänge von Fahrwerk und Boden sowie der Stand der Technik hinsichtlich Aufbau und Funktion moderner Fahrwerkstechnologie beschrieben und vorgestellt werden.

Wesentliche äußere Einflussfaktoren auf die Bodenbelastung verändert nach Weißbach (2003) sind:

- Radlast / Raupenlaufwerkslast
- Reifenbauart (vgl. Kapitel 3.1.1)
- Reifeninnendruck
- Reifenabmessung (vgl. Kapitel 3.1.1)
- Kontaktflächendruck
- Druckverteilung unter Fahrwerk
- Schlupf
- Fahrwerksvibrationen
- Belastungsdauer
- Belastungshäufigkeit (Überrollhäufigkeit)

Alle diese Einflussfaktoren sind technisch gegeben und wirken sich unmittelbar auf die Bodenbeanspruchung aus. Das heißt durch die messbaren technischen Bodenbelastungsfaktoren wird die Höhe des Anspruchs an den Boden bestimmt. In wie weit der Boden dem Anspruch gerecht wird hängt im Wesentlichen von den vorhandenen Bodeneigenschaften ab.

3.1.3.1 Rad- / Raupenlaufwerkslast

Die Last, die von einem Radreifen bzw. Raupenlaufwerk getragen wird inklusive des jeweiligen Eigengewichts entspricht der Rad- bzw. Raupenlaufwerkslast. Die Höhe dieser Last ist bei Luftreifen ausschlaggebend dafür, wie tief der Druck in den Boden eingetragen wird. Bei Chamen et al. (2003) ist der Zusammenhang zwischen Radlast und gleich bleibendem Reifeninnendruck dargestellt (Abb. 7). Die Erhöhung der Radlast verursacht einen Druckanstieg über die Tiefe bei sonst gleichen Bedingungen. Vereinfacht dargestellt: Höhere Lasten verursachen größere Tiefenwirkungen.

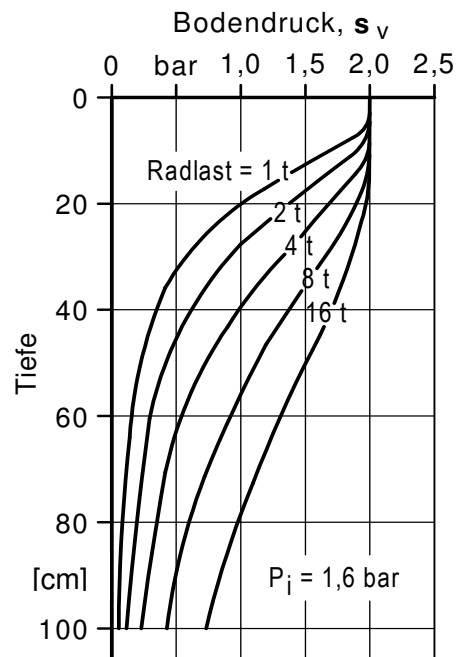


Abb. 7: Höhere Last bewirkt bei gleich bleibendem Reifeninnendruck (P_i) einen höheren vertikalen Spannungseintrag (s_v) in den Boden, der bis in tiefere Bodenschichten wirkt (Chamen et al., 2003)

Die Bodenbeanspruchung ist ein Resultat aus den angeführten Faktoren und kann durch die Erfassung des Bodendruckes gemessen werden.

3.1.3.2 Reifeninnendruck

Der Reifeninnendruck dient bei Luftreifen zur Erlangung der notwendigen technischen Tragfähigkeit. Je nach Last und Transportgeschwindigkeit kann dieser variiert werden. In jedem Fall muss der Reifeninnendruck so gewählt werden, dass die maximale Last bei entsprechender Fahrgeschwindigkeit getragen wird. Moderne großvolumige Radialreifen für die Landwirtschaft werden je nach Einsatzzweck und Größe mit Reifeninnendrücken von z. B. 0,5 – 3,0 bar gefahren. Grundsätzlich gilt: mit je weniger Reifeninnendruck ein Reifen gefahren werden kann, umso größer ist die Aufstandsfläche des Reifens und desto besser kann sich der Reifen an den Boden anpassen. Generell stellen hohe Reifeninnendrucke eine höhere Bodenbelastung dar als niedrige. Bei Luftreifen hat der Reifeninnendruck einen wesentlichen Einfluss auf die Bodenbeanspruchung. Weißbach (2003) hat durch Messung mit Schlauchdrucksonden den Zusammenhang zwischen Reifeninnendruck von Radialreifen und Bodendruck aufgezeigt. In Abb. 8 ist dieser für die Tiefe von 10 cm dargestellt. Dabei ist der gemessene Bodendruck im lockeren Oberboden annähernd so hoch wie der Reifeninnendruck. Dies bedeutet, dass die Höhe des Reifeninnendruckes sich unmittelbar auf die Bodenbeanspruchung auswirkt.

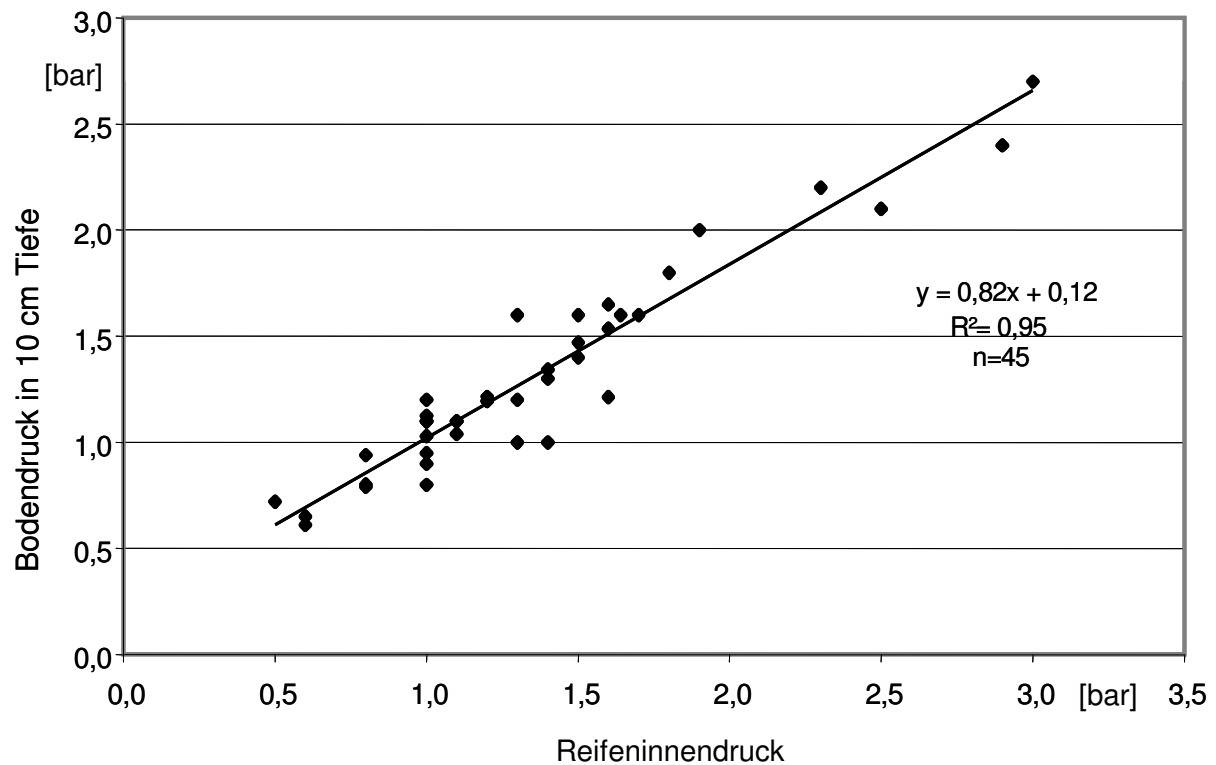


Abb. 8: Gemessener Bodendruck in 10 cm Tiefe bei unterschiedlichen Reifeninnendrücken (Weißbach, 2003)

Nach dem Modell von Söhne (1953) hat ein hoher Reifeninnendruck eine höhere Beanspruchung des Bodens zur Folge. Ein niedriger Reifeninnendruck verursacht weniger Bodendruck und kann über die Tiefe schneller abgebaut werden. Die Bodenbeanspruchung bei variiertem Reifeninnendruck und gleich bleibender Radlast wurde von Tijink und van der Linden (2000) dargestellt (Abb. 9). Der gesteigerte Reifeninnendruck verursachte bei gleich bleibender Radlast eine höhere Bodenbeanspruchung im Oberboden sowie einen langsameren Druckabbau über die Tiefe.

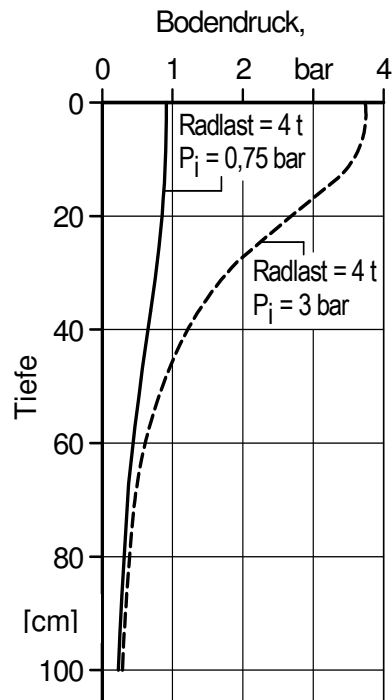


Abb. 9: Gleiche Last bei höherem Reifeninnendruck (P_i) bewirkt vor allem im Oberboden einen deutlich höheren Spannungseintrag (Tijink und van der Linden, 2000)

Bei der Untersuchung zur mehrfachen Radüberrollung zeigte Weißbach (2003) den Einfluss des Reifeninnendruckes auf. Hohe Lasten und mehrfache Überrollung müssen bei abgesenktem Reifeninnendruck nicht zu nachhaltigen Schäden im Boden führen. Dagegen kann die wiederholte Befahrung mit hohen Lasten $> 80 \text{ kN}$ pro großvolumigem Radialreifen und einem überhöhten Reifeninnendruck von $> 200 \text{ kPa}$ zu einer Verdichtung im Unterboden führen.

3.1.3.3 Kontaktflächendruck

Die Übertragung der Last vom Reifen/Gurtband auf den Boden erfolgt über die Kontaktfläche. Beim Luftreifen ergibt sich aus der Radlast, dem Reifeninnendruck und der Reifengröße die Aufstandsfläche. Der Kontaktflächendruck errechnet sich aus Aufstandsfläche, der Radlast und den Bodenfaktoren. Beim Raupenlaufwerk mit Gummigurtband setzt sich die Aufstandsfläche aus den Grundmaßen des Raupenlaufwerks zusammen. Der Kontaktflächendruck ergibt sich analog zum Luftreifen. Als Maß zur Einordnung der einwirkenden Gewichtskraft auf die Fläche dient der rechnerische mittlere Kontaktflächendruck. Dieser ist definiert als die Gewichtskraft pro Aufstandsfläche. Zur Berechnung gibt es mehrere Modellansätze. Als Beispiel soll der Ansatz von Diserens (2002) betrachtet werden. Dieser fließt in das Modell TASC 1.0 / 2.0 ein, das in dieser Arbeit verwendet wurde.

Dabei bezieht Diserens (2002) die Parameter Reifenbreite, Durchmesser, Radlast und Reifennendruck in die Berechnung der Kontaktfläche ein.

$$A = (a \cdot B \cdot D) + (b \cdot p_i) + (c \cdot F) \quad \text{Gl. 3.1}$$

A	Kontaktfläche [cm ²]
F	Radlast [N]
p_i	Reifennendruck [kPa], [bar]
B	Reifenbreite [mm]
D	Reifendurchmesser [mm]
a, b, c	Regressionskoeffizienten

Um den Aspekt der nachgiebigen Fahrbahn zu berücksichtigen, wurde ein feuchter, normal gelagerter Ackerboden definiert. Bei diesem gilt:

$$A = 0,025 < \frac{z_s}{D} \leq 0,05 \quad \text{Gl. 3.2}$$

A	Kontaktfläche [cm ²]
z_s	Spurtiefe
D	Reifendurchmesser

Die genannten Regressionskoeffizienten wurden von Diserens (2002) in Feldmessungen an Radialreifen ermittelt. Dabei wurden vier Reifentypengruppen gebildet, welchen die Regressionskoeffizienten zugeordnet wurden, die in Tab. 5 dargestellt sind.

Tab. 5: Regressionskoeffizienten zur Ermittlung der Kontaktfläche nach Diserens (2002)

Regressionskoeffizienten			
Reifentyp	a	b	c
Undifferenziert	0,428	-650,215	0,221
Normalquerschnitt	0,260	-295,944	0,556
Niederquerschnitt	0,416	-457,670	0,186
Terrareifen	0,420	-1.120,680	0,370

Die daraus ermittelte Kontaktfläche des jeweiligen Reifens wurde für die weitere Berechnung verwendet. Der mittlere rechnerische Kontaktflächendruck (p_k) errechnet sich aus der Radlast (F_G) dividiert durch die berechnete Aufstandsfläche auf nachgiebiger Fahrbahn.

3.1.3.4 Druckverteilung unter landwirtschaftlichen Fahrwerken

Die Bedeutung der Kontaktfläche und des Flächendruckes wurde von Bolling und Söhne (1982) sowie Horn (1981) beschrieben. Die rechnerische Verteilung des mittleren Kontaktflächendruckes als Maß der Bodenbeanspruchung unterscheidet sich, technisch bedingt, von der tatsächlichen Druckverteilung unter den verschiedenen Fahrwerken. Untersuchungen unter verschiedenen Luftreifen mit variierten Reifeninnendrückeren erreichen keine gleichmäßige Druckverteilung. Bei einem Reifen mit laut Herstellerangaben zu niedrigem Reifeninnendruck für die zu Grunde gelegte Last, wölbt sich die Lauffläche der Reifen nach innen. Dabei wird ein höherer Druck an den Reifenflanken gemessen. Bei zu hohen Reifeninnendrückeren sind die höchsten Drücke im Zentrum des Reifens zu finden. Bei dem jeweils vorgeschriebenen Reifeninnendruck ist grundsätzlich eine Druckkonzentration in der Mitte der Reifenaufstandsfläche zu beobachten (Schjonning et al., 2006). Ebel (2006) untersuchte die Kontaktflächendruckverteilung unter dem Forstreifen T22. Er stellte fest, dass bei einem Fülldruck von 3 bar und einer Achslast von 30 kN eine glockenartige Druckableitung in den Boden auftrat (Abb. 10).

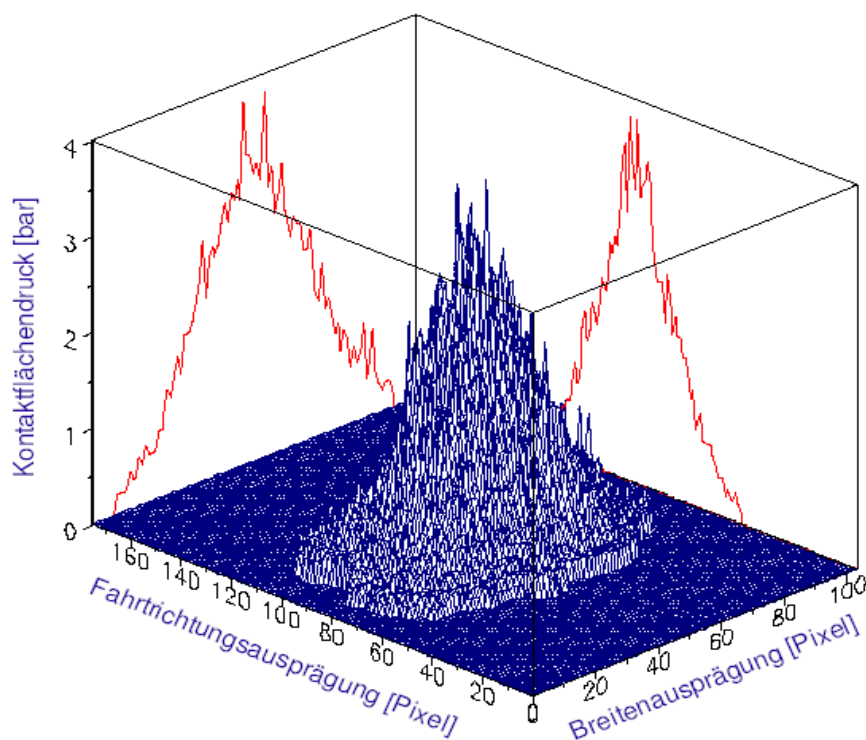


Abb. 10: Dreidimensionale Darstellung einer Kontaktflächendruckverteilung, Reifen T22, Fülldruck 3 bar, Achslast 30 kN (Ebel, 2006)

Diese glockenartige Druckableitung weist auf eine Konzentration des Druckes zur Reifenmitte hin. Bei einem hohen Fülldruck des Reifens kann sich dieser, auf Grund seiner Bauart, nicht gleichmäßig auf den Boden abtragen. Die Überwölbung führt zu einer Spitzendruckeinkleitung an der höchsten Stelle des Reifens. Gysi et al. (2001) stellten ebenfalls eine Druck-

konzentration zur Mitte des Reifens hin fest. Mohseniannesch und Ward (2007) untersuchten das differenziert Verhalten von Reifen und der gemessenen Kontaktflächendrücke. Dabei stellten sie fest, dass sich die Radlast in Verbindung mit dem Reifeninnendruck bei unterschiedlichen Reifentypen der gleichen Dimension verschieden auswirkt. Grundsätzlich wurde festgestellt, dass eine höhere Radlast zu höheren Kontaktflächendrücken führt. Ein doppelt so hoher Reifeninnendruck als für die Radlast laut Hersteller vorgesehen, zeigte bei allen Reifen eine gemessene Kontaktflächendruckerhöhung zur Reifenwölbung hin. Ein um die Hälfte geringerer Reifeninnendruck dagegen verursachte bei den meisten Fabrikaten einen niedrigeren gemessenen Kontaktflächendruck, da sich der Reifeninnendruck unmittelbar auf den gemessenen Kontaktflächendruck dicht an der Oberfläche auswirkte. Möglichst geringe Radlasten in Verbindung mit einem ausreichend niedrigen Reifeninnendruck erzeugen somit geringere Kontaktflächendrücke und weisen die homogensten Druckverteilungen in der Kontaktfläche auf.

Höfflinger und Porkriefke (1993) stellte die bauartbedingten Unterschiede von Reifen und Raupenlaufwerken grafisch dar (Abb. 11). Die in die Länge gezogene und zur Bodenoberfläche eben verlaufende Bauweise eines Gummibandlaufwerkes erzeugt gegenüber der Reifenaufgabe eine in die Länge gezogene Aufstandsfläche. Die Kraftabtragung erfolgt über eine flächenmäßige und zeitliche größere Länge und im Gegensatz zu den Reifen über eine scheinbar quadratische Auflagefläche, die zu einer Druckkonzentration zur Reifenmitte hin führt.

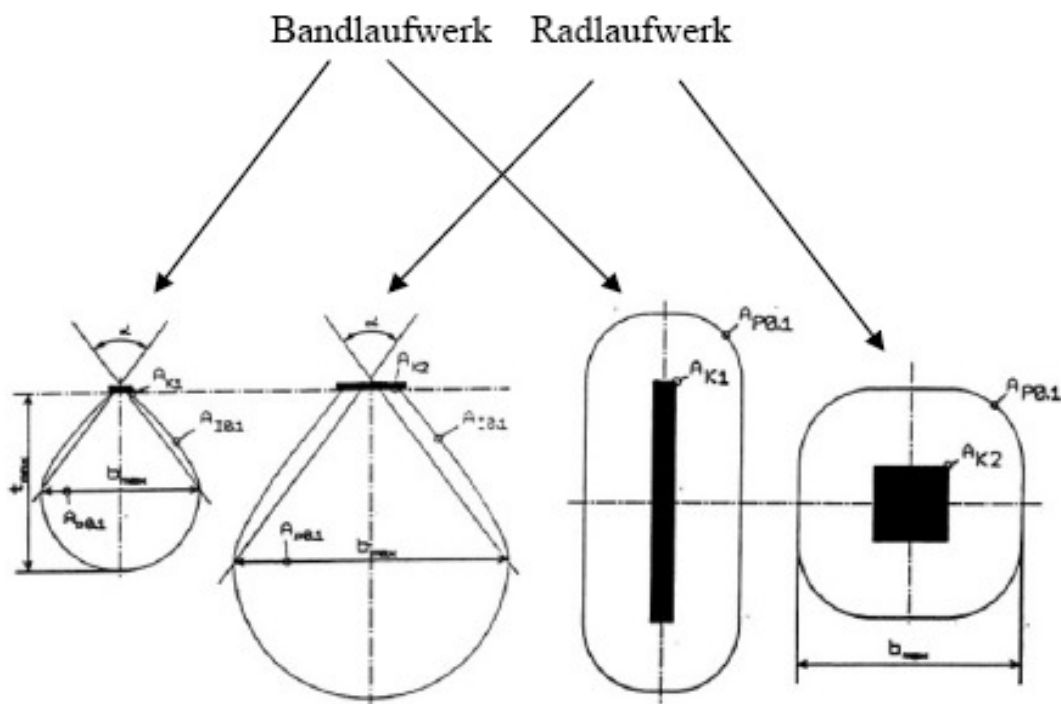


Abb. 11: Schematischer Vergleich der Druckverteilung unter den Aufstandsflächen von Rad- und Raupenlaufwerken (Höfflinger und Porkriefke, 1993)

Grundsätzlich unterscheidet sich die Druckverteilung durch die Gummibandausführung. Im Baumaschinenbereich sind überwiegend Ketten aus Stahlgliedern zu finden, die in der heutigen Landtechnik zu vernachlässigen sind. In der Landwirtschaft werden moderne Raupenlaufwerke mit Gummigurtbändern ausgerüstet. Das in die Länge bauende Raupenlaufwerk soll nach Höfflinger und Porkriefke (1993) die Gewichtskraft der Maschine möglichst über die gesamte aufstehende Laufbandfläche gleichmäßig in Breite und Länge verteilen. Bauartbedingt kann die Druckverteilung unterschiedlich ausfallen. Generell sind höhere Drücke unter den Trag- und Umlenkrollen zu erwarten; dies gilt für die Druckverteilung längs aber auch für die quer zur Fahrtrichtung (Olf, 1993). Weißbach und Winter (1996) untersuchten die Druckverteilung eines Raupentraktors unmittelbar unter dem Gurtband mit Sensormatten. Damit konnten sie die Druckverteilung der Umlenk- und Tragrollen, die sich auf das Gurtband stützen darstellen. In Abb. 12 ist das Ergebnis der Sensormattenmessung grafisch abgebildet. Hierbei konnten die höheren Drücke durch die punktuelle Belastung der Umlenk- und Tragrollen visualisiert werden.

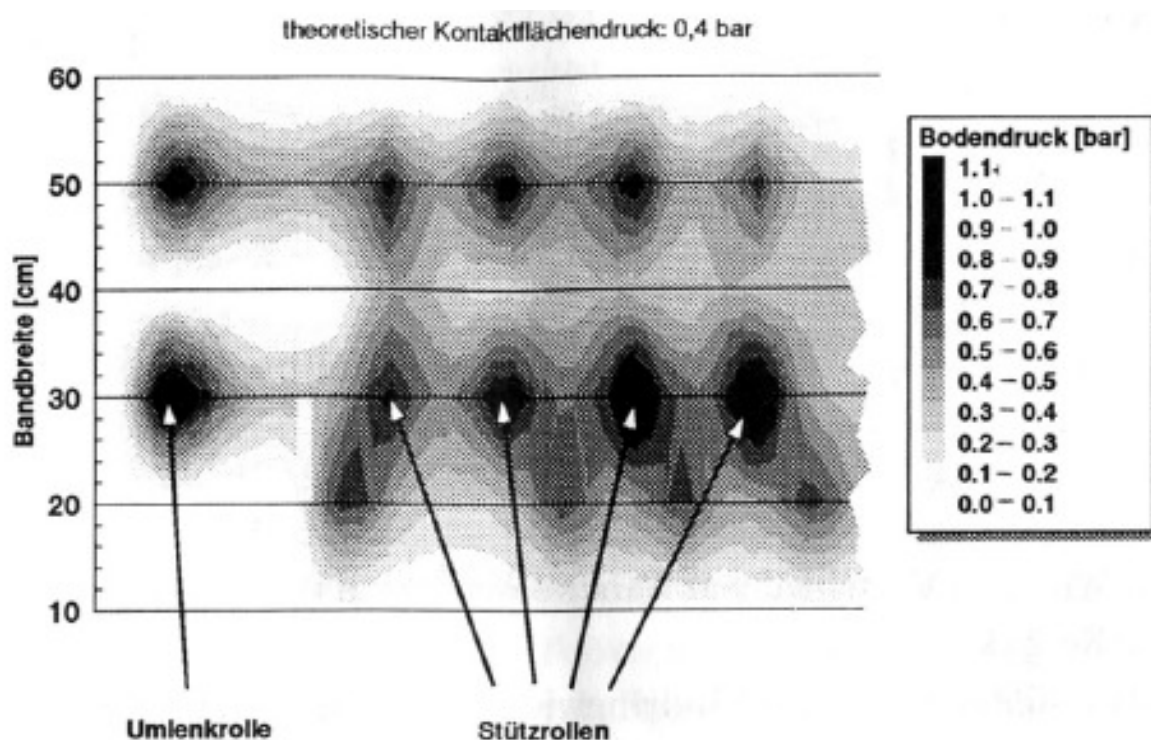


Abb. 12: Zweidimensionale Darstellung der Druckverteilung unter dem Gummiband eines Raupentraktors mit 160 kN Last und einer Gummibandbreite von 60 cm (Weißbach und Winter, 1996)

Der mittlere rechnerische Kontaktflächendruck, der sich aus der Gewichtskraft der zu tragenden Laufwerkslast und der Aufstandsfläche (Länge und Breite des Bandes) ergibt, wird unter den Laufwerksrollen überschritten und ist somit nicht über die gesamte Gurtbreite und –länge wirksam. Die Weiterentwicklung von landwirtschaftlichen Raupenlaufwerken soll die-

sen Effekt verringern. Eine Maßnahme besteht darin höhere Gummigurtvorspannungen zu realisieren, da diese einen Einfluss auf die Druckverteilung haben. Durch eine höhere Bandspannung von bis zu 200 kN kann das Gewicht gleichmäßiger unter dem Laufwerk verteilt werden, so dass ein Durchdrücken der einzelnen Laufwerksrollen gegenüber geringeren Vorspannungen minimiert wird. In Abb. 13 ist der Einfluss der Bandspannung auf die Druckspitzen unter den Laufwerksrollen dargestellt (Obermeier-Hartmann et al., 2006).

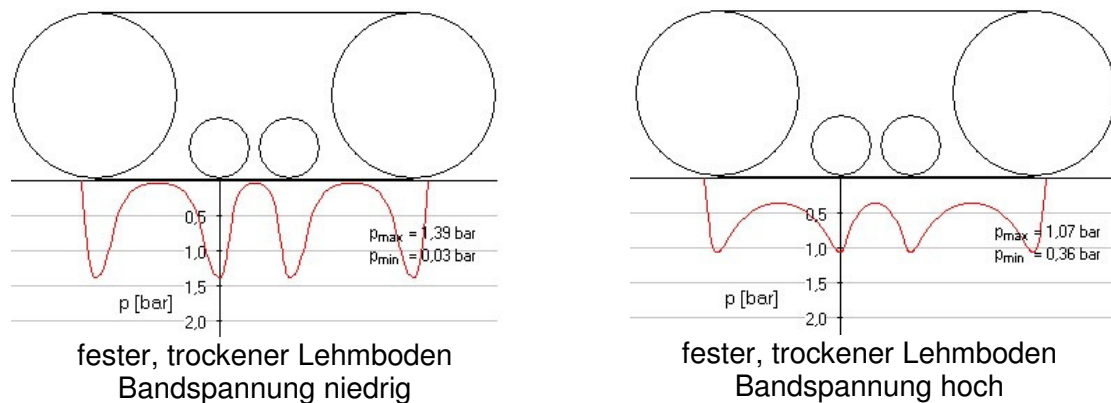


Abb. 13: Vergleich der Druckspitzen bei einer dynamischen Druckmessung in Längsrichtung unter Gummibandlaufwerken bei einer Bandspannung von 80 kN (links) und 160 kN (rechts) (Obermeier-Hartmann et al., 2006)

3.1.3.5 Schlupf

Schlupf entsteht bei der Kraftübertragung von Fahrwerken auf den Boden. Durch die Deformation des Luftreifens und des Bodens sowie durch das Gleiten des Fahrwerks wird tatsächlich weniger Weg zurückgelegt als dies bei einem freien Abrollen der Fall wäre. Diese Differenz wird als Schlupf bezeichnet. Grundsätzlich ist bei jeder Kraftübertragung mit Fahrwerken Schlupf vorhanden und verringert deren Wirkungsgrad. Der Schlupf wird als Messparameter bei der Übertragung von Zugkräften von Fahrwerken unter den jeweiligen Feldbedingungen herangezogen. Dieser spielt eine Rolle bei der Abstimmung eines Fahrwerks auf unterschiedliche Bodenbedingungen. Er hat auch Einfluss auf die fahrwerksbedingten Bodenverdichtungen. Raghaven et al. (1977) stellten fest, dass das Maximum der schlupfbedingten Vorverdichtung bei 15 – 25 % Schlupf erreicht wird. Übersteigt die Antriebskraft den Scherwiderstand des Bodens, wird dieser abgeschert und entgegen der Fahrtrichtung versetzt. Die Reibkraft verringert sich auf stark ausgetrockneten und übernässen Böden, wodurch die Schubfestigkeit gering ist (Richter und Hofmann, 1981).

3.1.3.6 Fahrwerksvibrationen

Bei jeder Fahrt auf dem Acker entstehen Schwingungen, die zusätzlich zur Radlast auf den Boden einwirken. Werden diese Schwingungen durch starre Fahrwerke bzw. durch hohe Reifeninnendrucke direkt in den Boden geleitet, wirken sie ähnlich einer Rüttelplatte, wo-

durch sich das Verdichtungsrisiko erhöht. Müller (1984) hat diesen Effekt der verminderten Schwingungsdämpfung bei ungefederten Raupenlaufwerken und Luftreifenfahrwerken mit hohen Reifendrücken nachgewiesen. Schluff- und feinsandreiche Böden mit geringem, aber vor allem mit hohem Wassergehalt reagieren besonders empfindlich auf diese Vibrationen. Durch den Vibrationseffekt werden die Poren dieser Böden stärker als durch die Druckbelastung reduziert. Nach Kuntze (1983) werden hohe Scherwiderstände leichter Böden durch Vibrationen einfacher überwunden, was eine erhöhte Verdichtungsempfindlichkeit nach sich zieht.

3.1.3.7 Belastungsdauer

In der Bodenmechanik und in der Baugrundmechanik bezeichnet man als Setzung den Einfluss der Zeitdauer eines einwirkenden Druckes auf den Boden. Darunter versteht man die vertikale Bewegung eines Bauwerks oder eines Geländepunktes als Folge einer örtlichen Belastung des Grundes, z. B. durch ein Gebäude oder durch Anschüttungen sowie das Zusammendrücken des Bodens durch plastische Verformung als Auswirkung der Belastung (Simmer, 1994). Es wird unterschieden in Sofortsetzungen, Primärsetzungen und Sekundärsetzungen. Sofortsetzungen werden auch als Schubsetzungen bzw. Anfangssetzungen bezeichnet. Diese treten bei bindigen Böden mit hohem Wassergehalt auf. Dabei weicht der Boden bei einer Belastung seitlich aus. Der Porenanteil des Bodens bleibt dabei unverändert, da sich das Volumen nicht verringert (Simmer, 1987). Bei der Primärsetzung oder auch Verdichtungssetzung wird der Boden so zusammengedrückt, dass sich der Porenanteil verringert. Durch längeres Einwirken der Belastung kann es nach der Sofortsetzung von wassergesättigten und bindigen Böden zur Wasserverdrängung kommen, wodurch eine Reduzierung der Poren möglich ist (Simmer, 1987). Unter der dritten Form, der so genannten Sekundärsetzung bzw. Kriechsetzung versteht man Setzungen, die unter konstanten effektiven Spannungen nach Abschluss der Verdichtungssetzung auftreten (Simmer, 1987). Dies sind Langzeitsetzungen, die für die Betrachtung von Landmaschinen, im Hinblick auf die Auswirkungen durch das Befahren des Ackerbodens, nicht von Relevanz sind und deshalb in dieser Arbeit nicht näher behandelt werden.

Neben den bisher genannten Einflüssen der Verdichtungsauswirkung der Böden, wie z. B. Bodenart, Bodenfeuchte, Lasthöhe, Fahrwerksgestaltung usw. stellt sich nach den Definitionen der verschiedenen Setzungsarten die Frage nach der Zeitdauer des Belastungsimpulses. Im Hinblick auf die Diskussion zur Fahrwerksgestaltung und den möglichen Auswirkungen, ist neben der Lasthöhe ebenso der Faktor Zeit eine Größe, die bei der Beanspruchung von Böden einbezogen werden muss. Dabei stellt sich die Frage inwieweit ein länger andauernder Belastungsimpuls eine elastische in eine plastische Verformung überführt. Vorrangig

hängt dies von der Bodenart, Bodenfeuchte und der Höhe der Last ab (McRae, 1950; Weaver und Jamison, 1951), was folgend beschrieben wird.

In der Grundlagenliteratur zur Bodenmechanik wird die Verdichtungstheorie anhand von Wasserströmungen im Boden beschrieben, wobei die Vergrößerung der Belastung auf einer Ton- oder Schluffschicht zu einem Überdruck im Porenwasser führt, der wiederum die Strömungen durch den Potenzialunterschied beider Schichten auslöst. Die Strömung findet bei anhaltendem Druck so lange statt, bis dieser ausgeglichen ist. Nachdem das Wasser von den Tonporen hin zu den Sandporen gepresst wurde, können diese weiter zusammengedrückt werden (Brinch-Hansen und Lundgren, 1960). Dieser Effekt wird bei Simmer (1987) als Primärsetzung oder auch Verdichtungssetzung bezeichnet und tritt bei längerem Einwirken auch auf wassergesättigten, bindigen Böden auf, wenn der Boden nicht ausweichen kann. Glimeroth (1953) stellte fest, dass die Luft und das Wasser im Boden eine gewisse Zeit benötigen, um den Bodenspannungen auszuweichen. Eine Zunahme der Belastungsdauer begünstigt somit die Bodenverformung, da der Luft und dem Wasser mehr Zeit zum Ausweichen zur Verfügung stehen. Horn (1989) wies bei dynamischen Belastungsdauermessungen nach, dass mit einer länger dauernden Bodenbeanspruchung, bedingt durch eine geringere Fahrgeschwindigkeit, die Bodendrucke in einer Tiefe von 20 cm höher sind. Bei statischer Beanspruchung mit einer konstanten Radlast bei unterschiedlicher Einwirkdauer konnte er außerdem eine größere Tiefenwirkung feststellen. Diese Auswirkungen sind stark von der jeweiligen Bodenstabilität (Vorbelastung) und dem Wassergehalt abhängig. Ist die Bodenstabilität höher als der erzeugte Belastungsimpuls, kann sich dieser Impuls auch bei einer längeren Einwirkzeit nicht tiefer fortpflanzen als bis in jene Schicht, die eine gleich hohe Gegenkraft aufweist. Der deutlichste Effekt der Belastungsdauer ist somit im lockeren Oberboden (regelmäßig gelockerter Horizont) festzustellen. Kromer (1989) zeigte die Zeitabhängigkeit des Verdichtungsprozesses an Hand des Einflusses der Überrolldauer, bedingt durch den Reifenlatsch (= Reifenaufstandsfläche) bzw. der Aufstandslänge des Bandes und der Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeuges auf.

Generell wirkt sich der Faktor Zeit umso prägnanter auf die Bodenverdichtung aus, je geringer die Bodenstabilität ist. Diese wiederum ist von den beschriebenen Faktoren Bodenart, Vorbelastung, Wassergehalt, Bearbeitungsintensität usw. beeinflusst. Koolen (1994) beschreibt die Zusammenhänge von Bodenverdichtungseffekten in Abhängigkeit von der Belastungsdauer und der Interaktion der vorliegenden natürlichen Bodenstruktur und Bodenbegebenheiten. Dabei wirkt sich die Belastungsdauer auf verformbaren Böden (nasse Ton- und Lehmböden) mit geringer Eigenstabilität stärker aus. Ist die einwirkende Belastung gleich der Tragfähigkeit des Bodens hat die Belastungsdauer keinen Einfluss auf den Bodendruck. Die zeitbedingten Effekte werden für gewöhnlich in drei verschiedenen Typen von

Tests untersucht. Beim Entspannungstest wird auf eine Bodenprobe eine bestimmte Druckintensität ausgeübt und die Druckabbaurate über die Zeitdauer gemessen.

Bei einem Zeitdehnungstest wird ebenfalls ein vorgegebenes Druckniveau über eine bestimmte Zeit an eine Bodenprobe angelegt und über die Zeitdauer die maximale Dehnung der Probe gemessen. Beim dritten zeitbedingten Effekt werden die bereits beschriebenen Tests an Stelle einer fixen mit einer variablen Druckbeaufschlagung kombiniert. Die Ergebnisse dieser Tests können drei verschiedenen Modellen zugeordnet werden. Das erste entspricht dem Newtonschen Fluid-Modell und wurde von Koolen und Kuipers (1983) mit folgender Formel beschrieben.

$$T = \eta (dy/dt) \quad \text{Gl. 3.3}$$

T = Scherbeanspruchung, η = Viskosität, dy = Scherverformung und dt = Zeit.

Das zweite Modell entspricht dem viskoplastischen Bingham Körper (nach Kézdi, 1974)

$$T = \zeta + \dot{\eta} (\gamma/t) \quad \text{Gl. 3.4}$$

T = Scherbeanspruchung, ζ = Fließgrenze, $\dot{\eta}$ = Viskosität bezogen auf die Scherspannung, die höher ist als die Fließgrenze, γ = Scherverformung und t = Zeit. Beim dritten Modell nach Ji et al. (1986) liegt das Burger Modell zu Grunde.

$$z = \frac{\beta P}{\sqrt{A}} \left[\frac{1}{E_M} + \frac{1}{E_k} \left(1 - e^{-\frac{E_k}{\lambda_k} t} \right) + \frac{t}{\lambda_M} \right] \quad \text{Gl. 3.5}$$

β = Konstante für einen gegebenen Prozess, P = wirkender Druck auf der Oberfläche eines Halb-Infinite-Körpers, A = Fläche, auf die der Druck ausgeübt wird.

Weitere Untersuchungen und deren Messergebnisse sind in Tab. 6 zusammengefasst dargestellt. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Wirkung der Belastungsdauer vor allem von der Art des Bodens, dem Zustand während des Befahrens sowie von der Größe der Kontaktfläche abhängig ist. Böden mit einem hohen Luftanteil neigen zu einer schnelleren Setzung, da die Luft schneller als Wasser entweichen kann. Je nach Stabilität der Poren bzw. Teilchenzusammensetzung kann das Entweichen unterschiedlich schnell passieren. Ein kürzerer Impuls hat in der Regel eine geringere Wirkung als ein länger einwirkender gleich hoher Impuls. Grundsätzlich sind die höchsten Setzungsraten in den ersten Sekunden zu erwarten, was in den Praxisversuchen von Oida und Tanaka (1981) sowie von Pan (1984) belegt wurde.

Tab. 6: Vergleich von Untersuchungen zur Bodenverdichtung durch Landmaschinen mit Berücksichtigung des Faktors „Belastungsdauer“

Autoren	Versuchsanstellung	Ergebnis
Lewis 1953 / USA	Labormethode, wobei ein Fallimpuls von 0,02 Sekunden mit einer zwei Sekunden dauernden Überrollung bei gleicher Last durchgeführt wurde.	Es wurden keine Unterschiede hinsichtlich der Bodenverformung festgestellt.
Oida und Tanaka 1981 - Japan	Untersuchung der Einsinkrate über die Zeit von unterschiedlichen Radlasten auf einem sL mit einer Bodenfeuchte von 21 %.	Die höchste Einsinkrate fand bei allen Belastungsvarianten in den ersten Sekunden statt. Nachdem die lockerste Bodenschicht verformt war und sich eine „gewisse“ Tragfähigkeit des Bodens eingestellt hatte, nahm die Einsinkrate ab. Über die anhaltende Einwirkdauer der jeweiligen Belastungsvarianten wurde eine weitere Zunahme der Einsinktiefen gemessen. Die Einsinktiefen variiert hinsichtlich Radlast und Einwirkdauer.
Pan 1984 - China	Untersuchung zur Einsinkrate über die Funktion Zeit als Einwirkdauer unter Traktoren mit Rädern und Reisdreschern. Die Messung wurde auf Reisfeldern bei hoher Bodenfeuchte und auf unterschiedlichen Bodentypen durchgeführt.	Je nach Bodentyp wirkte sich die Einsinktiefen über die Zeit unterschiedlich aus. Auf dem so genannten „Yueyang“ Boden hatte der Traktor mit Rädern die höchste Einsinkrate und erreichte während der Messdauer von 12 Sekunden eine Einsinktiefen von 15 cm. Der Reisdrescher mit Vollraupe verursachte währenddessen eine Spurtiefen von ca. 5 cm. Auf dem „Guanyun“ Boden war die Spurtiefen mit 0,5 cm unter dem Reisdrescher mit Vollraupe und 1,5 cm unter dem Radtraktor signifikant geringer. Generell kann daraus abgeleitet werden, dass mit der Zunahme der Lasteinwirkung auf eine Fläche auch ein höheres Einsinken einher geht. Das Einsinken selbst ist allerdings vor allem von der Tragfähigkeit des jeweiligen Untergrundes (Bodenart, Beschaffenheit, Frucht und Feuchtigkeit) und der Kontaktfläche (Art und Größe) der einwirkenden Last abhängig.
Bolling 1987 – Deutschland	Untersuchung in der Bodenrinne auf das Verdichtungsverhalten von Böden durch den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit, die den Faktor Zeit hinsichtlich der Überrolldauer beinhaltet.	Bolling stellte dabei fest, dass eine schnellere Überrollung auf lockerem Boden im Oberboden zu einem geringeren Eindringwiderstand führte. Bei der Schlauchdrucksondenmessung wurden außerdem geringere Bodendrücke über die Tiefe gemessen. Bei dicht lagernen und trockenen Böden dagegen konnte er keinen Unterschied feststellen. Bolling ¹ fasste dies zusammen und bemerkte: „Schnelleres Befahren senkt den Bodendruck um so mehr, je höher der Luftporenanteil im Boden ist. Je kürzer die Zeit ist, in der die Radlast auf dieses „Verdichtungspotenzial“ wirken kann, umso geringer der Druck“.

¹ BOLLLING, I. H. (1987): Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen – Neue Mess- und Rechenmethoden. Dissertation, TU München, S. 189 [17].

3.1.3.8 Überrollhäufigkeit mit Luftreifen

Bei der Bestellung und Bearbeitung wie auch bei Erntemaßnahmen, werden Bereiche im Feld in sehr kurzen Zeitabständen oder im Laufe der Vegetationsperiode mehrfach überrollt. Weißbach (1994) stellte bei Feldversuchen mit großvolumigen Reifen eines zweiachsigen KRB6 und mit Einzelradlasten von 86 kN fest, dass jede zusätzliche Überrollung neben der Druckerhöhung im Oberboden (0 – 25 cm), einen signifikanten Druckanstieg im Unterboden (40 cm) zur Folge hat. Tijink et al. (1995) untersuchte den Einfluss der Mehrfachüberrollung bei identischer Gesamtlast (Abb. 14) Die Eindringwiderstandsmessung wurde unter der zweifach befahrenen Spur mit je 40 kN Radlast und einer achtfach befahrenen mit je 10 kN durchgeführt. Dabei stellte er fest, dass sich die vierfache Überfahrt mit jeweils 25 % der Radlast im vormals lockeren Oberboden (Krumentiefe) höhere Eindringwiderstände aufwies. Im Unterboden ab ca. 30 cm Bodentiefe waren keine Unterschiede erkennbar.

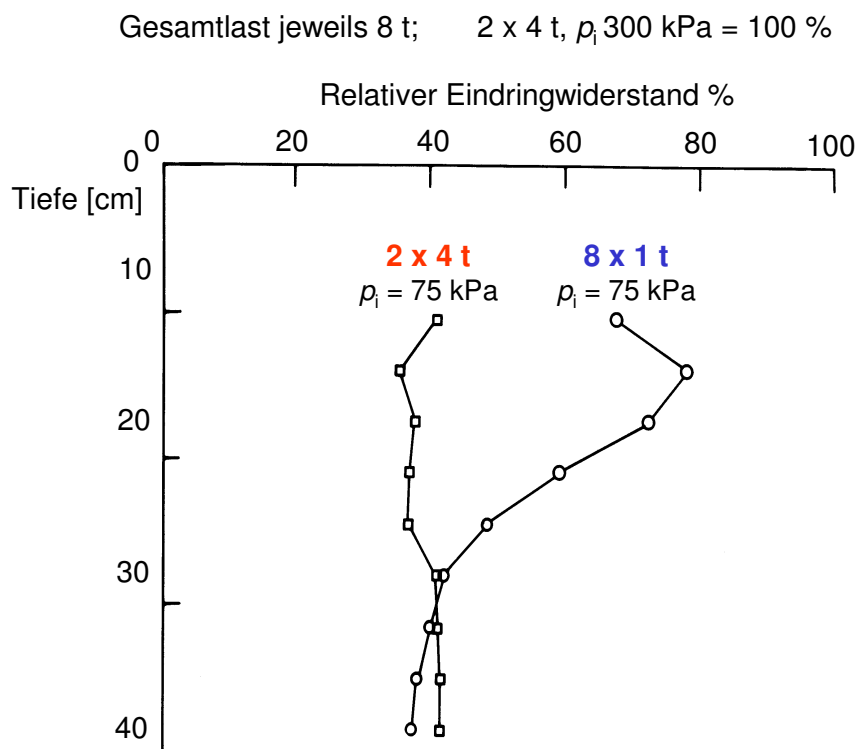


Abb. 14: Relative Verdichtungswirkung mit unterschiedlicher Überrollhäufigkeit und gleicher Gesamtlast auf einem Sandboden (verändert nach Tijink et al., 1995)

Bolling (1987) stellte bei seinen Untersuchungen zur mehrmaligen Befahrung mit einem 25 kN schweren Traktorreifen fest, dass die erste Überrollung den größten Effekt bei der Spurtiefe und dem gemessenen Bodendruck in drei verschiedenen Tiefen verursachte. Die gemessenen Kennwerte sind in Tab. 7 dargestellt.

Tab. 7: Zusammenfassung der Ergebnisse nach Bolling (1987) aus der Untersuchung zur mehrmaligen Befahrung mit einer Radlast von 25 kN; Bodenart: sL; Trockenroh-dichte: 1,4 g/cm³; Wassergehalt: 17,5 Vol.-%

Anzahl der Überfahrten	1	5	10
Spurtiefe [cm]	6	10	13
Bodendruck [bar] (Schlauchdrucksonde) in 20 cm Tiefe	0,8	1,2	1,4
in 30 cm Tiefe	0,5	0,7	0,9
in 40 cm Tiefe	0,45	0,55	0,65

Schwanghart (1998) zeigte bei systematischen Versuchen in der Bodenrinne, dass die wiederholte Überrollung in einer Tiefe von 25 cm zu einer Erhöhung der Bodendichte führte. Gemessen wurde jeweils nach zwei Überrollungen – insgesamt wurden 16 Überrollungen durchgeführt. Die höchste Dichte von 1,80 g/dm³ stellte sich bei der Radlast von 14 kN und zwölfmaliger Überrollung ein. Bei einer Last von 8 kN wurde nach 12 Überrollungen die höchste Dichte mit 1,70 g/dm³ gemessen.

Horn (2001) beobachtete in einer Tiefe von 15 cm die Zunahme der vertikalen Bodenverschiebung bei wiederholter Überrollung mit gleich bleibenden Radlasten eines Standardtraktors. Die zehn Überfahrten mit einer Vorderradlast von 38 kN (16.9 R30) und der Hinterradlast von 55 kN (18.4 R46) führten bei mäßig feuchten Bodenbedingungen (pF3) auf einem schweren Tonboden zu einer vertikalen Verschiebung von 33 mm gegenüber der unbefahrenen Messstelle. Die Belastung war in ein-, zwei-, fünf-, sieben- und zehnfacher Überfahrt untergliedert. Kulli et al. (2002) stellten bei einer Versuchsanstellung zur Visualisierung der Bodenverdichtung fest, dass sich die bodenphysikalischen Parameter, im speziellen bei der zweifachen gegenüber der einfachen Überrollung, bis in eine Tiefe von 55 cm signifikant veränderten. Bei der Untersuchung von Pykta (2005) zum Effekt wiederholter Befahrung mit landwirtschaftlichen Traktoren auf unterschiedlichen Bodentypen hinsichtlich Bodendruck und Deformation, konnte eine Erhöhung des Bodendruckes festgestellt werden. In den Tiefen 15 und 30 cm zeigt sich in beiden Bodentypen (Sandboden und Lössboden) ein Anstieg der Deformation und des Bodendruckes bei mehrfacher Überfahrt. Bei der Deformation wurde der größte Anstieg bei der ersten Überfahrt gemessen, der größte Bodendruckanstieg zwischen der ersten und zweiten Überfahrt. Durch die Verfestigung der Fahrspur stieg der Druck bei den weiteren Überrollungen langsamer an. Signifikante Anstiege wurden nur in den ein- bis dreifachen Überrollungen festgestellt.

Keller und Arvidsson (2004) stellten bei ihren Untersuchungen zur Einschätzung des Risikos von Unterbodenverdichtungen durch technische Lösungen moderner Fahrwerke bei der dynamischen Druckmessung keinen Druckanstieg durch die Mehrfachüberrollung eines Tridemfahrwerkes mit einer Last von 86 kN je Rad in 30, 50 und 70 cm Tiefe fest (Abb. 15). Eine Verringerung der Einzelradlast durch den Einsatz von Tandem- oder Tridemachsen

erlaubt es den Reifeninnendruck zu reduzieren. Bodendruck und Bodenverdichtung sind nach Angaben von Keller und Arvidsson (2004) maßgeblich durch die Höhe der Radlast und nicht der gesamten Fahrzeuglast beeinflusst. Der Einsatz von Zwillingreifen bzw. Tandemachsen kann somit das Risiko der Unterbodenverdichtung verringern.

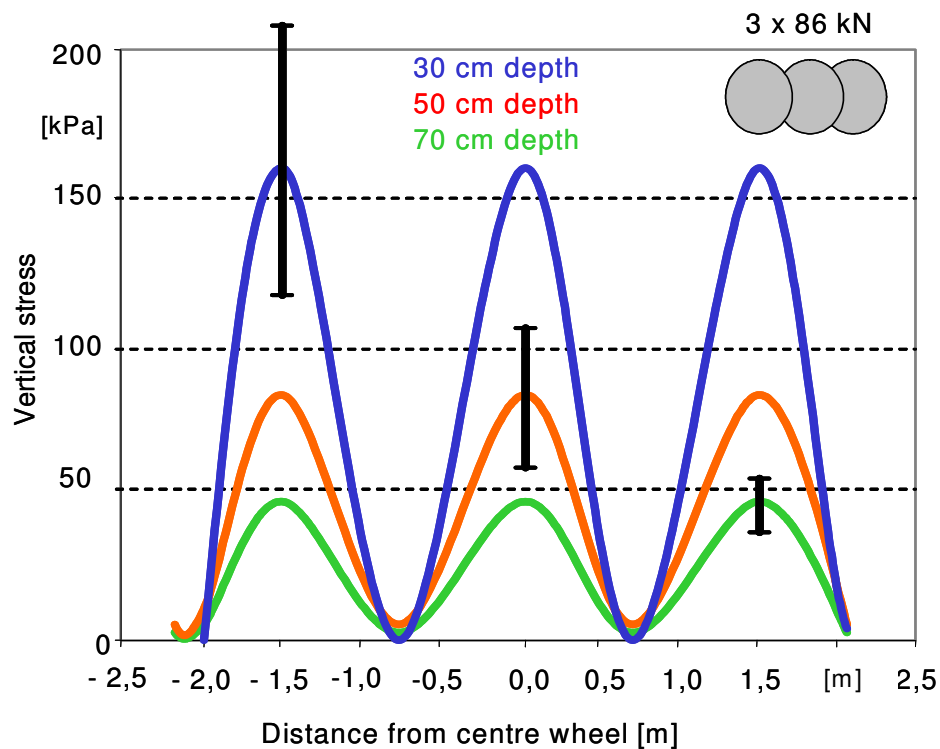


Abb. 15: Einfluss der Mehrfachüberrollung mit hohen Lasten (Keller und Arvidsson, 2004)

Im Widerspruch dazu stellte Brunotte (2007) zusammenfassend aus seinen Untersuchungen fest, dass bei einer Reduzierung der Radlast und der damit verbundenen Steigerung der Überrollhäufigkeit die Belastungssituation für den Boden nicht günstiger wird.

3.2 Bodenbeanspruchung durch landwirtschaftliche Fahrzeuge

Durch Lasteintrag auf die Oberfläche treten im Boden mechanische Spannungen auf. Der Begriff „Spannung“ beschreibt die Kraft, die im Inneren eines elastischen Körpers auftritt, hervorgerufen durch äußere Krafteinwirkung (Kézdi, 1969). Diese Spannungen breiten sich auf trockenem, festem Boden abnehmend kreisförmig in die Tiefe aus. Mit steigender Bodenfeuchte nimmt ihre Ausdehnung in die Tiefe und Breite zu. Der Verlauf dieser Spannungen kann mit Linien gleicher Druckspannung optisch dargestellt werden (Söhne, 1953).

Nach Söhne (1953) werden die Druckzwiebeln bei gleichem spezifischem Flächendruck in der Oberfläche umso größer und reichen umso tiefer herab, je größer die Radlast ist (Abb. 16).

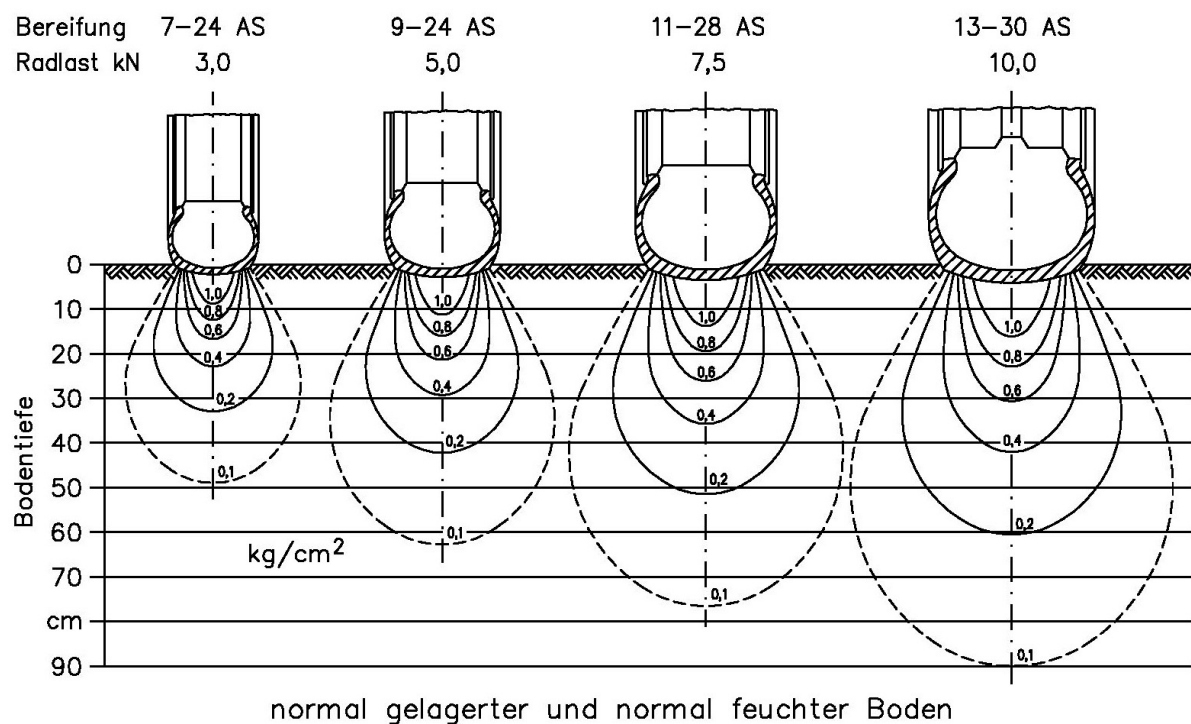


Abb. 16: Zusammenhang Reifengröße und Radlast bei gleichem Kontaktflächendruck (Söhne, 1953)

Nach Bolling et al. (1982), Bolling (1986), Krause et al. (1986), Smith et al. (1990) und Kühner (1997) bestehen folgende Zusammenhänge zwischen Radlast, Kontaktfläche, Kontaktflächendruck und Reifeninnendruck:

- Steigender Reifeninnendruck verkleinert die Kontaktfläche, der Kontaktflächendruck wird erhöht und konzentriert sich somit in der Reifenmitte
- Gleiche Radlasten erzeugen in gleicher Tiefe in etwa gleich große Bodenspannungen
- Gleiche Kontaktflächendrücke bewirken eine etwa gleich tiefe Fahrspur bei verschiedenen breiten Reifen

- Entscheidend für die Beanspruchung des Oberbodens und Fahrspurtiefe ist der Kontaktflächendruck
- Entscheidend für die Beanspruchung des Unterbodens ist die Radlast

Weiterhin stellte Söhne (1953) fest, dass die Last bei Konstanthaltung des Radgewichtes und gleichzeitiger Vergrößerung der Kontaktfläche, durch eine größere Bodenoberfläche abgetragen wird. Dadurch wird die Ausbreitung der Druckzwiebel in der Tiefe um den Betrag der Fahrspurtiefe reduziert, der Spannungsbetrag im Bearbeitungshorizont nimmt ab.

Die Untersuchungen von Söhne (1953) wurden mit Diagonalreifen durchgeführt, die heute in der Landwirtschaft (mit Ausnahme im Forst) kaum mehr eingesetzt werden. Die bauartbedingte stabile Seitenwand verleiht dem Diagonalreifen eine steife Karkasse. Diese höhere Steifigkeit verhindert das Einfedern und die Flexibilität bei Verringerung des Reifeninnendruckes von Diagonalreifen. Eine Vergrößerung der Aufstandsfläche ist nur sehr begrenzt möglich. Dies führt zu Unterschieden bei der Druckausbreitung im Boden gegenüber den mittlerweile überwiegend in der Landwirtschaft eingesetzten Radialreifen. Tijink und Spoor (2004) passten das Druckausbreitungsmodell von Söhne (1953) an die heute üblichen Radialreifen an (Abb. 17).

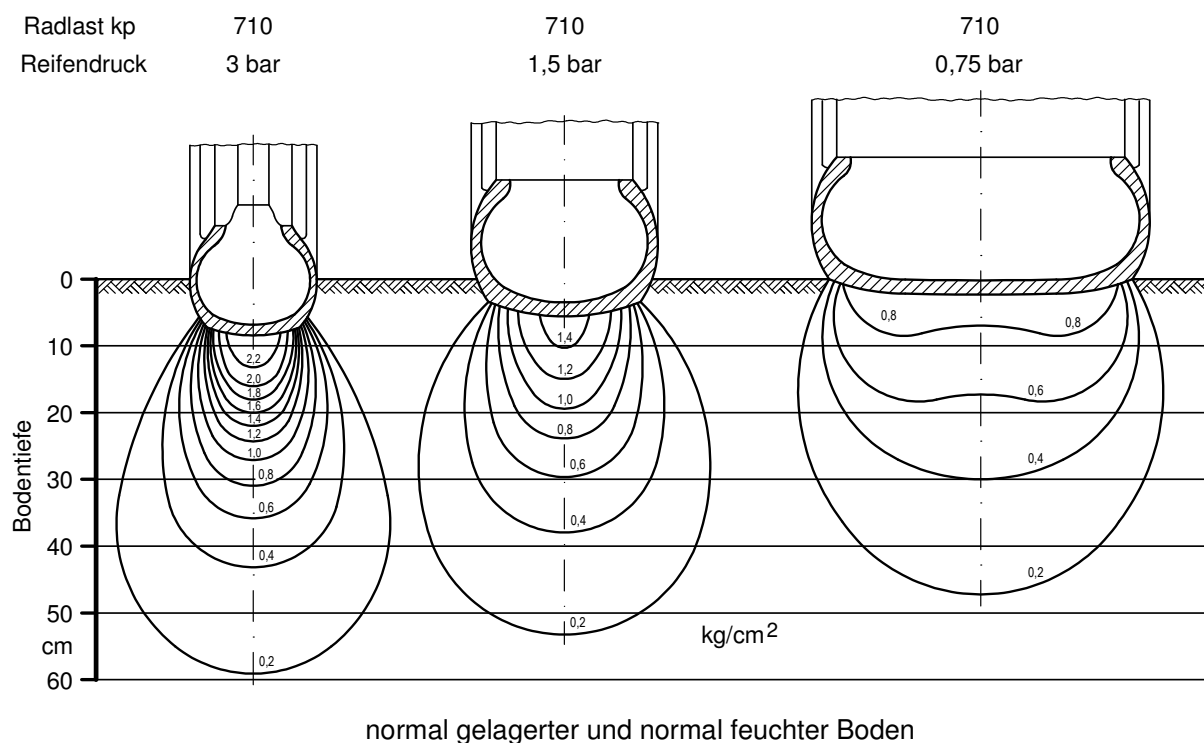


Abb. 17: Einfluss der Radlast und des Kontaktflächendrucks bei Radialreifen auf die Verteilung des Bodendruckes (Tijink und Spoor, 2004, abgeändert nach Söhne, 1953)

Dass jegliches Befahren sich auf den Ertrag auswirken kann, zeigten Langzeitversuche, die in Tab. 8 zusammengefasst dargestellt sind.

Tab. 8: Untersuchungen zum Einfluss auf den Ertrag und Wirkung von Fahrverkehr auf landwirtschaftliche Flächen.

Autoren	Zeit/Ort	Versuchsanstellung	Ertragswirkung
Håkansson et al., 1985	1964 – 1984 Schweden	30 kN Radlast, Einfach- und Zwillingsbereifung; Seilzug oh. Befahrung	Einfachbereifung 100 %, Zwillingsbereifung 106 %, ohne Belastung 123 %.
Chamen et al., 1990	1983 - 1986 UK	Oh. Fahrverkehr, bodenschonend < 0,5 bar, Stand. 1–2,5 bar	Ergebnis indifferent
Johnson et al., 1990	1982 - 1986 Minnesota	Ertragswirkung von Radlasten mit 22,5 – 100 kN Radlast, bei Sojabohnen	Ertragsreaktion abhängig von Standort, Radlast und Bodenfeuchte. Ergebnisse indifferent. 1985 wurde ein signifikanter Mehrertrag bei trockener Witterung und einer Radlast von 90 kN festgestellt.
Voorhees 2000	1982 - 1993 Minnesota USA + EU	Langzeituntersuchung über Nachwirkung der Befahrung mit Radlasten von 25 - 100 kN auf Körnermaisertrag	Radlasten von 25 u. 50 kN blieben zumeist oh. Ertragswirkung. Einmalige Überfahrt mit 100 kN Radlast erzeugte Verdichtung bis 60 cm Tiefe. Ertragverlust im Folgejahr bis 55 %. Minderertrag bis 12 Jahre danach nachweisbar. Im Mittel lag dieser bei -6 %.
Li et al., 2004	1995 - 2000 Queensland Australien	Regel-Fahrspur-Verkehr (Controlled Traffic Farming CTF) vs. konservierender Bewirtschaftung	CTF (<15 % Fläche werden dabei befahren) hat im Mittel 9,8 % (signifikant) höhere Erträge als „freier Fahrverkehr“ (> 80 % der Fläche befahren).
Brunotte 2007	1995 – 2004 Niedersachsen	90 – 110 kN Radlast, Winterweizen	Ertragsminderung 0 – 15 %; am Vorgewende: –5 bis –29 % Ertragsminderung
Koch et al., 2007	2001 – 2006 Niedersachsen	80 – 120 kN Radlast jährlich, Bodenbearbeitungsversuch mit Belastungsvarianten	Kein Einfluss der jährlichen Belastung auf den Zuckerertrag.
Kreitmayr 2009	1998 - 2009 Bayern	40 - 100 kN Radlast, Bodenbearbeitungsversuch mit Belastungsvarianten	Ertragswirkung je nach Kultur und Jahr von 0 bis -10 %. Im Durchschnitt der Jahre –3 %.
Diepolder et al., 2010	2001 - 2007 Bayern	30 kN Radlast, Dauergrünland, Belastung jeweils nach dem Schnitt	Ertragswirkung -9 bis -10 %, keine Veränderung der Pflanzengesellschaft.

3.3 Fahrwerke

Die für den landwirtschaftlichen Einsatz vorgesehenen Fahrwerke müssen grundsätzlich unter Berücksichtigung der Bodenschonung konzipiert und verwendet werden. Die Bewertung moderner Fahrwerke von Landmaschinen hinsichtlich der Bodenbeanspruchung ist in dieser Arbeit ein zentrales Thema. Aus diesem Grund wird ein Überblick der in der Landwirtschaft aktuell eingesetzten Fahrwerkstechnik gegeben. Dabei werden die eingesetzten Fahrwerke hinsichtlich Art und Funktionsweise der Lastabstützung beschrieben. Fahrwerkskombinationen mit den jeweiligen Befahrungsmustern werden erläutert und mit den in der Literatur beschriebenen Wirkungsweisen bewertet.

3.3.1 Aufgaben und Anforderungen von Fahrwerken

Landwirtschaftliche Fahrwerke stehen in Interaktion mit Boden und Maschine. Als Bindeglied beider Bereiche spielen die Fahrwerke ein zentrales Thema beim Bewegen von Maschinen samt deren Lasten auf landwirtschaftlich genutzten Flächen und öffentlichen Straßen. Aus diesem Grund müssen sie konstruktiv für beide Einsatzbereiche ausgelegt sein. Sie sollen im Acker hohe Lasten bodenschonend abstützen sowie eine hohe Traktion bei gleichzeitig bestem Fahrkomfort bieten. Für die Straßenfahrt ist eine hohe Transportgeschwindigkeit bei sicherer und ruhiger Straßenlage gefordert. Die Fahrwerke müssen Kraftstoff- und Verschleißminimierend sein sowie die Auflagen der Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO) einhalten. Diese sind in den Bundesländern von Deutschland zum Teil unterschiedlich geregelt. Bei zweiachsigen Radmaschinen ist für die Fahrt auf öffentlichen Straßen eine maximale Achslast von 120 kN zugelassen. In Ausnahmefällen können bis zu 127 kN auf der Vorderachse, beispielsweise bei selbstfahrenden Arbeitsmaschinen, zugelassen werden. Maschinen mit mehr als zwei Achsen dürfen maximal 100 kN Achslast aufweisen und eine Gesamtlast von 320 kN nicht überschreiten. Ausnahme sind aufsattelbare Container (Hackenlift System). Hier kann die Gesamtlast in der Landwirtschaft bis 440 kN betragen.

Die vom Gesetzgeber zugelassene Tragfähigkeit je Achse bei zwei Bandlaufwerken kann bis zu 200 kN betragen, da jede der auf dem Boden aufstehende Umlenk- und Tragrollenachse mit 20 kN veranschlagt wird (Heitmann, 2008). Eine weitere Auslegung der Raupenlaufwerke sieht die gleich großen Umlenkrollen vorne und die Antriebsrollenpaare hinten als Tandemachse an, wodurch in diesem Fall eine Höchstlast von 200 kN zu Grunde gelegt werden kann.

Der zur Verfügung stehende Bauraum vieler Landmaschinen verhindert eine weitere Erhöhung der Achsenanzahl. Dies hat zur Folge, dass mittlerweile vermehrt Erntemaschinen nicht nur wegen schwieriger Boden- und Geländebedingungen mit Gummibandlaufwerken ausgestattet werden. Vor allem die zunehmenden Maschinengewichte bei selbstfahrenden Erntemaschinen, der geringer werdende Bauraum und die Begrenzung der Transportbreite

für die Straßenzulassung in Westeuropa veranlassen die Hersteller von Landmaschinen die Fahrwerkskonzepte zu überdenken und Gummibandlaufwerke anstelle von Radachsen bei diesen Erntemaschinen zu verwenden.

An jede Art von Fahrwerken in der Landwirtschaft werden folgende Forderungen gestellt:

- Höchstmögliche Tragkraft (im Feld und auf der Straße)
- Bestmögliche Zugkraftübertragung (im Feld)
- Größtmögliche Aufstandsfläche im Feld (= bestmögliche Bodenschonung)
- Hohe Lebensdauer (geringer Verschleiß / geringe Kosten im Feld / auf der Straße)
- Bestmöglicher Komfort (im Feld / auf der Straße)
- Einhaltung der Straßenverkehrszulassungsordnung (auf der Straße)
- Bestmögliche Wendigkeit (im Feld / auf der Straße)
- Höchstmögliche Fahrsicherheit (im Feld / auf der Straße)

3.3.2 Fahrwerkskomponenten

Die unterschiedlichen Fahrwerke in der Landwirtschaft setzen sich aus verschiedenen Komponenten zusammen, die je nach Anforderungsschwerpunkt unterschiedlich ausfallen können. Zu diesen gehören Luftreifen- und Raupenfahrwerke, die als alleinige Luftreifen- bzw. Raupenfahrwerke in der Landwirtschaft eingesetzt werden aber auch in Kombination Verwendung finden.

3.3.2.1 Luftreifenfahrwerk

Die überwiegende Mehrheit der heute in der Landwirtschaft eingesetzten Fahrwerke ist mit Luftreifen ausgestattet. Zwischenzeitlich finden vorwiegend moderne Radialreifen (Gürtelreifen) Verwendung. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf eine Beschreibung des Aufbaus von Diagonalreifen verzichtet. Diagonalreifen finden heutzutage im Forstbereich wegen ihrer stabileren Flanken Verwendung (Ebel, 2006). Bei den Reifen wird in Triebradreifen, Lenkradreifen und Implementreifen unterschieden. Da in dieser Arbeit die Triebradreifen im Vordergrund stehen, wird auf die anderen beiden Reifentypen nicht näher eingegangen (VDI 6101, 2007). Radialreifen sind gekennzeichnet durch Stahlfäden, die radial von Wulst zu Wulst verlaufen. Über diesen liegen im Bereich der Lauffläche mehrere Gewebelinien wie ein Gürtel in Umfangsrichtung des Reifens. Die Reifenzonen wie Flanke und Lauffläche können sich dadurch unabhängig voneinander bewegen. Die flexible Flanke lässt den Reifen unter Belastung stärker einfedern und verlängert die Reifenkontaktlänge. In Folge dessen erhöhen sich die Triebkraftsbeiwerte, es verringert sich der Kontaktflächendruck und es verbessert sich der Fahrkomfort. In Abb. 18 ist der Aufbau eines typischen modernen Radialreifens schematisch dargestellt.

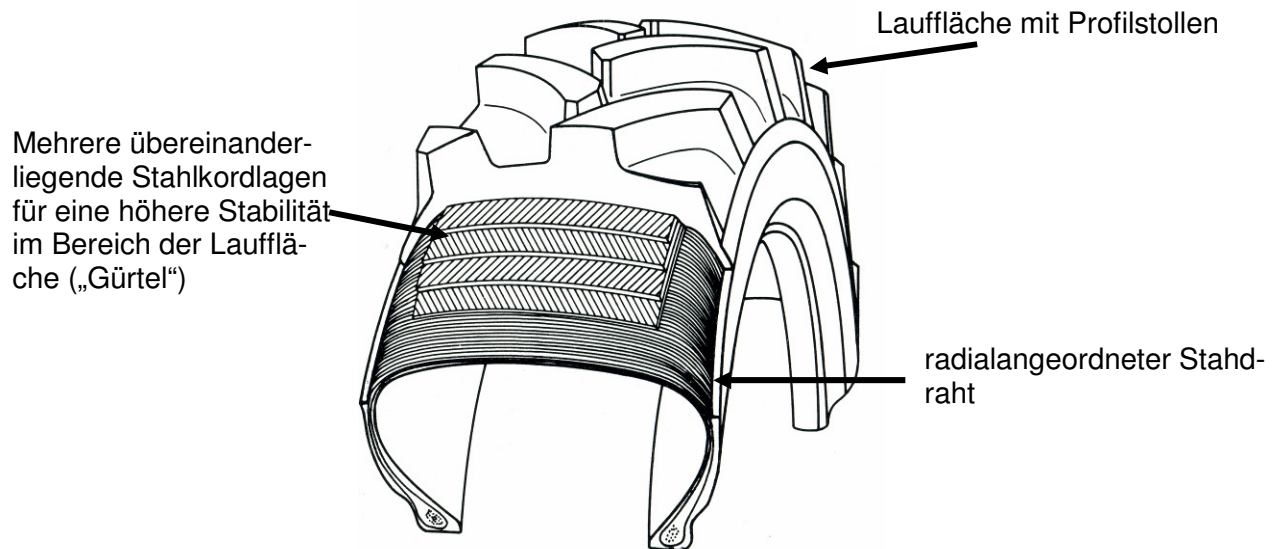


Abb. 18: Aufbau eines Radialreifens, wie er heutzutage als Standardreifen an landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen zu finden ist (Steinkampf, 1974)

Moderne Radialreifen sind als schlauchlose Reifen ausgeführt und mit einem gasförmigen Medium (i. d. R. Luft) befüllt. Im Falle von Undichtigkeiten der Karkasse bzw. zwischen Felge und Reifenwulst kann ein zusätzlicher Schlauch zum sicheren Befüllen mit Luft eingesetzt werden. Als Ballastmittel wurde und wird z. T. der Reifen mit Wasser befüllt. Ein mit Wasser befüllter Reifen hat kaum federnde Eigenschaften mehr, wodurch die Vorteile des Radialreifens verloren gehen. Aus diesem Grunde sollte bei Radialreifen auf das Befüllen mit Wasser verzichtet werden.

Ausführungen von Radialreifen

Radialreifen unterscheiden sich vor allem in der Reifendimension. Standardradialreifen für Traktoren haben beispielsweise eine Reifenbreite von 460 mm bei einer Flankenhöhe von 85 % zur Reifenbreite und einem Felgendurchmesser von 38 Zoll. Die Bezeichnung auf der Reifenflanke lautet hierbei 460/85 R38 oder 18.4 R38 (hier ist die Reifenbreite in Zoll angegeben). Ein Breitreifen bei gleicher Felgenreöße hätte z. B. die Bezeichnung 650/65 R38. Damit bei Pflegearbeiten zwischen die Früchte bzw. Dämme der Früchte gefahren werden kann, sind diese schmaler und i. d. R. mit einem höheren Felgendurchmesser ausgeführt. Eine typische Ausführung hat die Größe 270/95 R44 bzw. 9.5 R44. Bei den selbstfahrenden Erntemaschinen kommen Großvolumenreifen zum Einsatz. Die derzeit größtmöglichen haben eine Dimension von 1050/50 R32.

Tragfähigkeit

Die Tragfähigkeit der Reifen hängt vor allem vom Luftvolumen des Reifens ab. Großvolumige Reifen besitzen eine höhere Tragfähigkeit. Das Volumen ist durch den Reifendurchmesser und die Reifenbreite gegeben. Je nach Felgendurchmesser und Reifenbreite variiert das Luftvolumen der Reifen, das die Tragfähigkeit vorgibt. Grundsätzlich gilt, je mehr Luftvolumen ein Reifen fasst, umso tragfähiger ist dieser. Damit kleinere Reifen wie z. B. Pflegebereifung eine ausreichende Tragfähigkeit erlangen, müssen diese mit höheren Reifeninnendrücken befüllt werden. Dort wo die Reifenbreite bauartbedingt durch die Maschine begrenzt ist, werden nach Möglichkeit Reifen (und damit auch Felgen) mit größeren Durchmessern verwendet. Der höchste Durchmesser von Standardtraktorreifen beträgt derzeit 2.180 mm z. B. 540/65 R42). In Abb. 19 sind verschiedene Reifen mit unterschiedlicher Reifenbreite, Felgendurchmesser bzw. Flankenhöhe dargestellt.

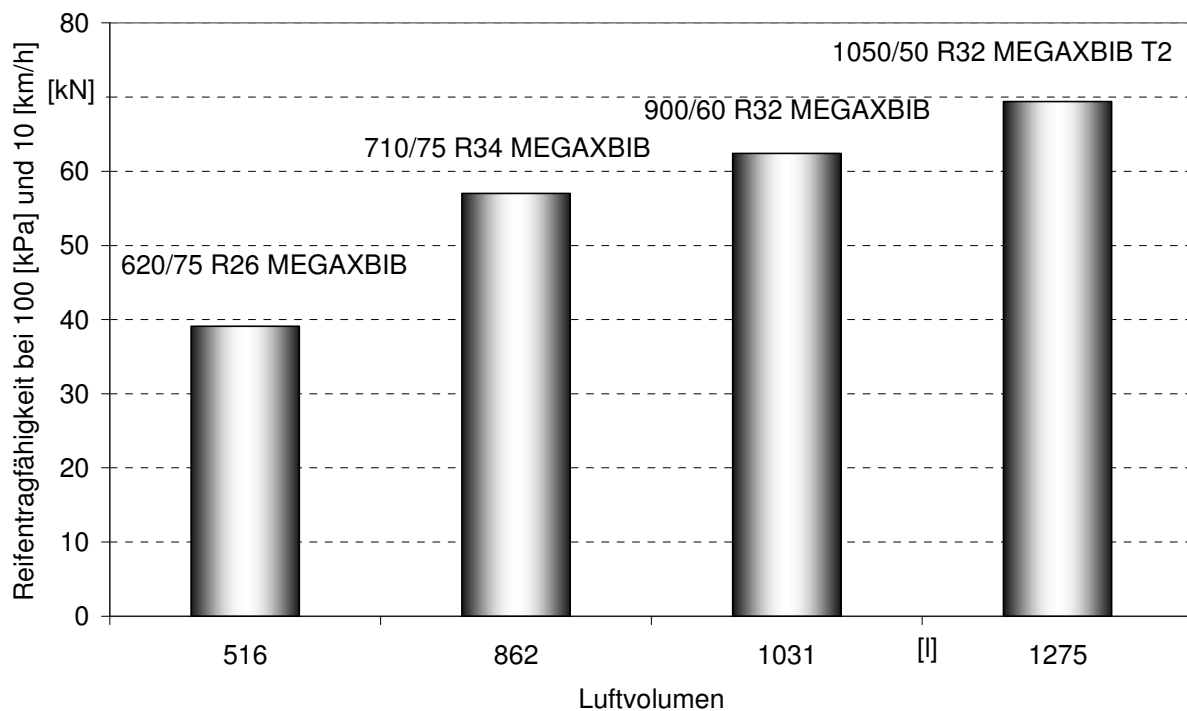


Abb. 19: Vergleich der maximalen Tragfähigkeit bei 100 kPa (1 bar) und einem Geschwindigkeitsbereich 10 km/h von Reifen mit unterschiedlichen Durchmesser, Reifenbreite und Felgenreöße (Datengrundlage Reifentabelle Michelin, 2007)

Die zurzeit höchste Tragfähigkeit besitzt der Radialreifen mit der Dimension 1050/50 R32. Dieser fasst mit einer Breite von 1.050 mm, einer Flankenhöhe von 50 % der Reifenbreite und einem Felgendurchmesser von 32 Zoll, 1.275 l Luft bei 100 kPa Reifeninnendruck. Ein Hersteller gibt für diese Größe eine maximale Tragfähigkeit von 127,50 kN bei 280 kPa Reifeninnendruck und einer maximalen Geschwindigkeit von 10 km/h unter zyklischer Belastung

an (Michelin, 2007). Diese Reifendimension wird auf Hinterachsen von selbstfahrenden Landmaschinen wie z. B. an sechsstufigen selbstfahrenden Köpfrdebunkern (KRB6) oder selbstfahrenden Gülleausbringungsfahrzeugen verwendet.

Jüngste Wiegungen solcher Maschinen haben gezeigt, dass die technischen Grenzen (Tragfähigkeit) unter Umständen überschritten werden können (Demmel und Geischeder, 2006).

In Abb. 20 sind die Tragfähigkeiten zweier großvolumiger Radialreifen in Abhängigkeit vom Reifeninnendruck dargestellt. Zusätzlich wurden die maximal gewogenen Radlasten zu diesen Reifen eingetragen. Die gewogenen Radlasten lagen über der vom Hersteller angegebenen maximalen Tragfähigkeit.

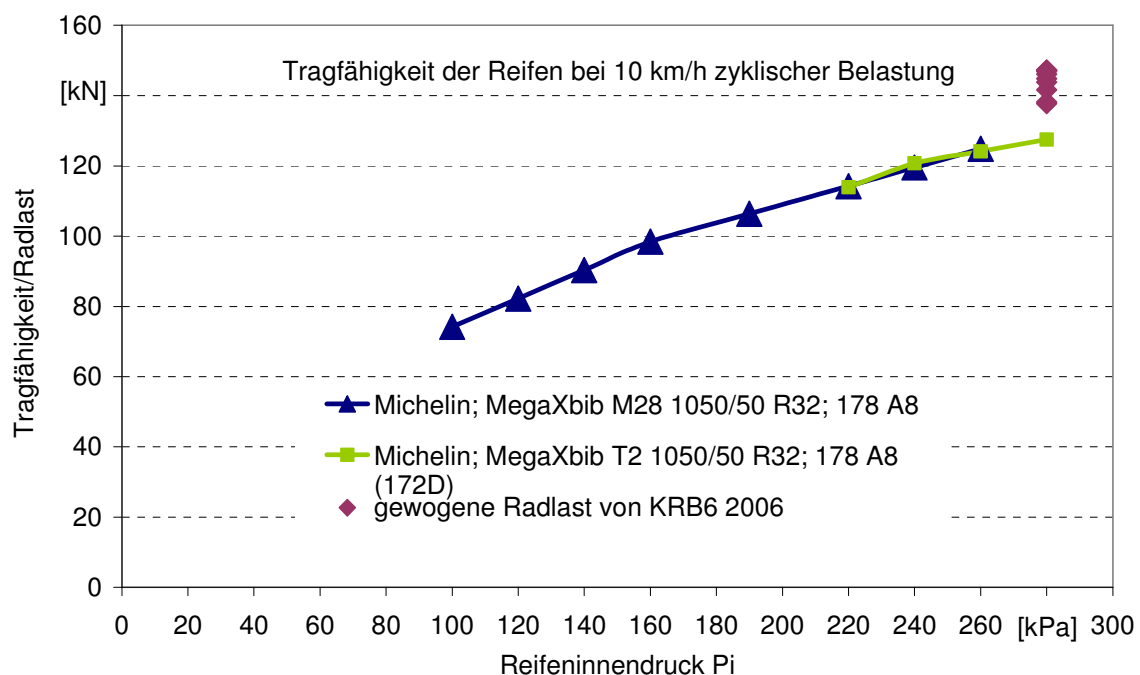


Abb. 20: Maximale Tragfähigkeit großvolumiger Reifen für den Einsatz an schweren Erntemaschinen bei 10 km/h und zyklischer Belastung in Abhängigkeit des Reifeninnendruckes im Feld. Zum Vergleich gewogene Radlasten zweiachsiger KRB6 mit vollem Bunker

Der Reifeninnendruck gibt dem Luftreifen innerhalb der Herstellerangaben die nötige Stabilität und Festigkeit, um das einwirkende Gewicht sicher abstützen zu können. Weißbach (1994) stellte bei seinen Messungen mit der Schlauchdrucksonde fest, dass der Reifeninnendruck annähernd als Bodendruck in einer Tiefe von 10 cm nachgewiesen werden kann. Je höher dieser Ausgangsdruck im Reifen, umso höher ist der Bodendruck, der vom Boden aufgenommen werden muss. Die Höhe des Reifeninnendruckes hat entscheidenden Einfluss auf den Reifen und hängt im Wesentlichen von den in Abb. 21 beschriebenen Faktoren ab. Diese Zusammenhänge sind in den jeweiligen Reifentabellen der verschiedenen Reifenhersteller dargestellt. Abhängig von Bauart, Reifendimension, maximal zu tragender Radlast

und dem Geschwindigkeitsspektrum (Straßen- und Ackerfahrt) muss der Reifeninnendruck laut Herstellerangaben angepasst werden.

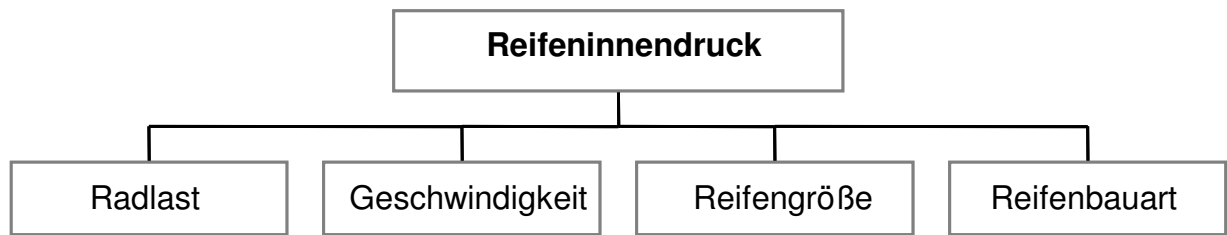


Abb. 21: Einflussfaktoren des zu wählenden Reifeninnendruckes

Generell muss bei Erhöhung der Radlast bzw. der Geschwindigkeit (innerhalb des vom Reifenhersteller angegebenen technisch zulässigen Bereiches) ein höherer Reifeninnendruck nach Reifenherstellertabelle gewählt werden. Reifen mit größerem Volumen erlauben geringere Reifeninnendrucke bei gleicher Last und Geschwindigkeit. Moderne Radialreifen bieten diesbezüglich eine weite Bandbreite und ermöglichen so eine Optimierung des Systems Reifen/Boden. In Tab. 9 ist am Beispiel eines Standardtraktorreifens die Spannweite der Tragfähigkeit hinsichtlich des zu wählenden Reifeninnendruckes in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit dargestellt. Für eine Tragfähigkeit von ca. 4.000 kg pro Rad benötigt der Reifen beispielsweise für die Fahrt im Feld ($V_{\max} = 10 \text{ km/h}$) einen Reifeninnendruck von 0,8 bar. Um dieselbe Tragfähigkeit auf der Strasse mit 50 km/h zu gewährleisten, muss der Druck 1,6 bar betragen.

Tab. 9: Potenzial eines Radialtraktorreifens (Auszug aus Michelin Reifentabelle, 2007)

Tragfähigkeit (kg) pro Reifen									
Reifen	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8	Luftdruck (bar)
650/65 R38 (20.8 R38) XM108 Tubeless	2520	2780	3050	3320	3590	3860	3990	4130	50 km/h
	2520	2920	3320	3720	4130	-	-	-	40 km/h
	2690	3120	3550	3980	4410	-	-	-	30 km/h
	3280	3810	4340	4870	5390	5920	6190	-	10 km/h

Anpassung des Reifeninnendruckes

Eine manuelle Anpassung zwischen Feld und Straßenfahrt, zur optimalen Ausnutzung der möglichen Bandbreite moderner Radialreifen, ist bei häufigem umsetzen während eines Tages nicht praktikabel. Aus diesem Grunde wurden Reifendruckverstellanlagen (auch Reifendruckregelung genannt) entwickelt. Bei diesen kann der Reifeninnendruck verändert und an Boden, Fahrbahn, Gewicht und Geschwindigkeit angepasst werden. Für die schnelle Straßenfahrt lässt sich durch Druckerhöhung der Rollwiderstand verringern. Im Feld kann der Reifeninnendruck auf ein Mindestmaß abgesenkt werden, wodurch die Traktion und Kontaktfläche durch die Reifenlatscherhöhung verbessert wird und der Reifen weniger tief einsinkt. In beiden Fällen wird Kraftstoff eingespart. Der Verschleiß auf der Straße nimmt ab und der Fahrkomfort sowie die Bodenschonung auf dem Acker verbessern sich. Die Automatischen Reifeninnendruckverstellsysteme sind z. T. als Erstausrüstung erhältlich, werden zum Großteil nachgerüstet. Die Anlagen können je nach Reifengröße und Anzahl innerhalb kürzester Zeit den Reifeninnendruck zwischen Acker und Straße anpassen.

Technische Verbesserungen

Die wachsende Leistung moderner Traktoren stellt an die Reifen hohe Anforderungen. Die Reifen müssen immer größere Drehmomente übertragen und gleichzeitig eine höhere Tragfähigkeit bieten. Die neueste Entwicklung bei den Traktorenreifen sind Radialreifen, die eine gleich bleibende Tragfähigkeit im Geschwindigkeitsbereich zwischen 10 und 65 km/h bei einem möglichst geringen Reifeninnendruck von 1 bar aufweisen und somit gleichermaßen auf Strasse und Acker mit diesem eingestellten Reifeninnendruck gefahren werden können. Die Firma Michelin präsentierte diese neue Reifentechnik zur Agritechnica 2003 unter dem Namen „XeoBib“. Dieses Reifenkonzept ist die konsequente Weiterentwicklung des Radialreifens, der Forderungen von Lohnunternehmern und Landwirten umsetzt, für die Geschwindigkeitsbereiche im Feld und auf der Straße einen einheitlichen und möglichst niedrigen Reifeninnendruck nutzen zu können. Der für diese Anforderung entwickelte Reifen hat gegenüber einem Standardradialreifen eine um 20 % höhere Einfederung. Diese ermöglicht laut Schlee (2003) ein Fahren mit einheitlichem Luftdruck von $\leq 1,0$ bar im Feld und auf der Straße. In Tab. 10 ist der Leistungsdatenvergleich eines Michelin Standardtraktorreifens mit dem neu entwickelten XeoBib Reifen von Michelin dargestellt. Die Kennzahlen bestätigen die Eigenschaften des neuen Reifenkonzepts. Für die neue Reifentechnologie wurde ein neuartiger Unterbau für eine höhere Einfederungszone konzipiert. Die Laufflächenkontur wurde optimiert und eine neue Stollenform umgesetzt. Zum Einsatz kommt eine neue Gummimischung und die Verbindung zwischen Reifen und Felge wurde optimiert.

Tab. 10: Gegenüberstellung der Leistungsdaten des Michelin Traktorstandardreifens und des neu entwickelten XeoBib Reifens (Schlee et al., 2003)

Reifenkonzept	XM 108	XeoBib
Dimension	600/65R38	650/60R38
Last-Index	153	153
Geschwindigkeits-Symbol	B (50 km/h)	D (65 km/h)
Luftdruck Straße (50 km/h – 3.650 kg)	1,8 bar	1,0 bar
Luftdruck Feld (Arbeiten unter Drehmoment – 3.650 kg)	1,2 bar	1,0 bar
Bodenkontakt-Fläche (lockerer Boden – 3.650 kg)	3.750 cm ² (1,4 bar)	4.440 cm ² (+24 %) (1,0 bar)
Spurrillen-Tiefe	46 mm	21 mm (-55 %)
Verschleißindikator	100	116
Rollwiderstand – Indikator (lockerer Ackerboden)	100	80
Rollwiderstand feste Fahrbahn	100	100
Zugkraft - Indikator	100	>100

Der Michelin AxioBib wurde für landwirtschaftliche Zugmaschinen in Anlehnung an den XeoBib entwickelt. Dieser Traktorreifen soll wie der XeoBib eine optimale Kraftübertragung bieten und gleichzeitig niedrigere Reifeninnendrucke als bei herkömmlichen Radialreifen gleicher Dimension ermöglichen. Der AxioBib ist preisgünstiger als der XeoBib und soll in der breiten Masse der Landwirte Anwendung finden. Der Traktorreifen erreicht laut Michelin (2009) eine bis zu 20 Prozent höhere Traglast bei gleicher Dimension und gleichem Reifeninnendruck. Der AxioBib kombiniert eine hohe Tragfähigkeit mit niedrigem Reifendruck. Bei einer Last von 6.500 kg beispielsweise ist der Reifendruck um 0,8 bar niedriger als bei einem herkömmlichen Standardradialreifen gleicher Dimension (Michelin, 2009). Die entwickelte flexiblere Karkasse für höhere Lasten bei gleich bleibenden Reifeninnendrücker wird von Michelin als Ultraflex-Technologie bezeichnet und kommt seit 2010 auch im Segment der selbstfahrenden Erntemaschinen zum Einsatz. Durch die Ultraflex-Technologie wird vor allem die Aufstandslänge des Reifens vergrößert, die maßgeblich für die Vergrößerung der Aufstandsfläche ist. Zugleich kommen mehr Stollenpaare zum Eingriff, die eine höhere Zugkraftübertragung ermöglichen. Aktuell wurden Reifen für Erntemaschinen unter den Namen CerexBib vorgestellt, die von Michelin gemeinsam mit der Fa. Claas für Mähdreschervorderachsen entwickelt wurden. Ähnlich wie bei den Traktorreifen war das Ziel eine hohe Tragfähigkeit bei niedrigem Reifeninnendruck (maximal 2,0 bar). Zusätzlich sollte der Reifen eine möglichst große Aufstandsfläche generieren, um den Kontaktflächendruck zu reduzieren. Von den CerexBib-Reifen gibt es aktuell zwei Reifengrößen für unterschiedliche „Mähdrescher-Bodies“. Für den Mähdrescher mit dem breiten „Body“ steht der neu entwickelte IF680/85 R32 zur Verfügung. Bei den Mähdreschern mit dem schmalen „Body“ kann der IF800/70 R32 verwendet werden. Laut Michelin ist bei gleicher Fahrsicherheit und Funktions-

fähigkeit eine um ca. 22 % größere Aufstandsfläche (lastabhängig) gegenüber dem herkömmlichen Radialreifen mit gleicher Dimension bei höherem Fahrkomfort möglich. Der IF800/70 R32 kann beispielsweise bei einer Radlast von 9.000 kg mit 1,6 bar Reifennendruck gefahren werden. Der Standardradialreifen der Dimension 800/70 R32 benötigt bei der gleichen Last 2,4 bar Reifennendruck, was ein geringeres Federungsverhalten und eine kleinere Aufstandsfläche bedeutet (Aichele et al., 2010).

3.3.2.2 Halbraupenfahrwerke

Die Halbraupenlaufwerke bestehen aus der Kombination von Luftreifenachsen und Achsen mit Raupenlaufwerken. Diese Kombination wird häufig bei selbstfahrenden Erntemaschinen wie Mähdreschern gewählt, um die Hauptlast der Maschine sicher über ein Raupenlaufwerk abtragen zu können. Die Lenkachse bleibt als Radachse ausgeführt, um die Lenkfunktion beizubehalten. Nachfolgend wird diese Art des Fahrwerks im Kapitel 3.3.3 Fahrwerkskonfiguration und -aufbau berücksichtigt. In der Landwirtschaft kommen überwiegend moderne Gummibandlaufwerke für die Kombination aus Rad- und Raupenachsen zum Einsatz, die nachfolgend näher betrachtet werden.

3.3.2.3 Raupenfahrwerke in der Landwirtschaft

Seit Entwicklung von Raupenlaufwerken wurden diese in der Landwirtschaft eingesetzt, für spezielle Einsatzbereiche angepasst und weiterentwickelt. Im Folgenden wird ein Überblick über die Entwicklung und die aktuell eingesetzte Technik gegeben. Es wird im aktuellen landwirtschaftlichen Einsatz in

- Gleisketten-Laufwerke und
- Gummiband-Laufwerke

unterschieden.

Dabei bestehen die Fahrwerke grundsätzlich aus folgenden Elementen:

- Gummiband/Eisenkette
- Spanneinheit zur Band-/Kettenspannung (Formschluss/Reibschluss)
- Antriebseinheit mit Antriebsrad zur Leistungsübertragung
- Tragachsen mit Tragrollen zur Lastabstützung
- Umlenkrollen

3.3.2.4 Gleiskettenlaufwerk

Die Gleiskette wurde Ende des 19. Jahrhunderts für Dampftraktoren zum Transport von Baumstämmen von Alwin Lombard in den USA erfunden und 1901 patentiert. Der grundsätzliche Aufbau besteht aus einzelnen stählernen Laufflächengliedern, die mittels Scharnieren zu einer geschlossenen Kette verbunden sind. Diese Anordnung stellt für die Lauf- und Trag-

rollen eine eigene Fahrbahn dar. Die Kettenglieder besitzen in der Mitte eine Art Steg, der durch die Aneinanderreihung als Führungsschiene der Laufwerksrollen dient. Diese „Gleis-Funktion“ verlieh dem System den Namen „Gleiskette“. Durch die gleichmäßigere Verteilung der Masse bzw. der Gewichtskraft des Fahrzeuges auf eine große Aufstandsfläche und die damit verbundene Verringerung des Druckes auf den Untergrund, erhöht sich die Geländegängigkeit gegenüber radbetriebenen Laufwerken. Die Stützrollen übertragen das eingeleitete Gewicht über die Kettenglieder auf den Boden. Die Umlenk- bzw. Antriebsrollen sind höher gesetzt. Hierdurch wird das Fahren von Kurven erleichtert, die Steigfähigkeit verbessert und die Geländetauglichkeit erhöht. Diese Eigenschaft ist vor allem bei militärischen Kettenfahrzeugen und schweren Erdbaumaschinen notwendig. Je nach Ausführung und Einsatzzweck sind diese Laufwerke zusätzlich gefedert und verfügen über eine Vorspannungseinrichtung für die schnelle Fahrt. Aufgrund der guten Geländegängigkeit und der hohen Zugkraftübertragung, wurden die Fahrwerke anfangs in der Landwirtschaft genutzt. Vor allem im Bereich von schwierigen Bodenverhältnissen z. B. im Reisanbau, kommt diese Technik bei den Mähdreschern heute noch zum Einsatz, da sie in diesem Einsatzspektrum Vorteile bieten. Die Gleisketten verformen sich nicht und stützen die Last auf die gesamte Kettenbreite gleichmäßig und sicher ab. Die Gliederketten sind weitestgehend unempfindlich gegenüber scharfen Kanten. Durch den formschlüssigen Antrieb und der stabilen Verbindung von Stahlantriebszahnrad und Stahlgliederkette, können auch höchste Antriebsmomente sicher übertragen werden.

Die nachteiligen Merkmale von Stahlgleiskettenfahrwerken sind:

- Hoher Wartungsaufwand/Verschleiß
- Geringe Transportgeschwindigkeiten
- Hohe Geräusentwicklung
- Schlechte Fahreigenschaften (Geschwindigkeit begrenzt)
- Bedingte Eignung für den Straßenverkehr

Aus bodenkundlicher Sicht sind diese Fahrwerke für die heutigen Einsatzanforderungen zur Befahrung des Ackers nicht mehr geeignet. Sie besitzen zudem ein hohes Eigengewicht und verdichten zusätzlich den Boden durch den Vibrationseffekt. Auf Grund der begrenzten Anwendungsbereiche und der technischen Einschränkungen haben diese Laufwerke in der Landwirtschaft keine Bedeutung mehr. Die Grundzüge dieser Laufwerkstechnologie sind heute jedoch bei den modernen Gummibandlaufwerken in der Landwirtschaft zu finden.

3.3.2.5 Das Gummibandlaufwerk

Von Köhler (1949) wurde das Klein-Raupen-Modell „Oliver HG 42“ der Oliver-Corporation, Cleveland, Ohio, USA beschrieben (Abb. 22), das 1942 als Neuheit mit zwei endlosen keil-

förmigen profilierten Gummibändern vorgestellt wurde. Die 1.500 kg schwere und bis zu 22 PS starke „Gummiband-Kleinraupe“ entwickelte am Zughaken eine Zugkraft von 1.000 kg auf „losem Acker“ und erreichte auf der Straße eine Fahrgeschwindigkeit von 22 km/h, die zur damaligen Zeit der maximalen Geschwindigkeit eines Rad-Traktors gleichkam. Durch das geringe Gewicht und die große Aufstandsfläche sei der Bodendruck im Acker, laut Köhler (1949) geringer als der Tritt eines Menschen.

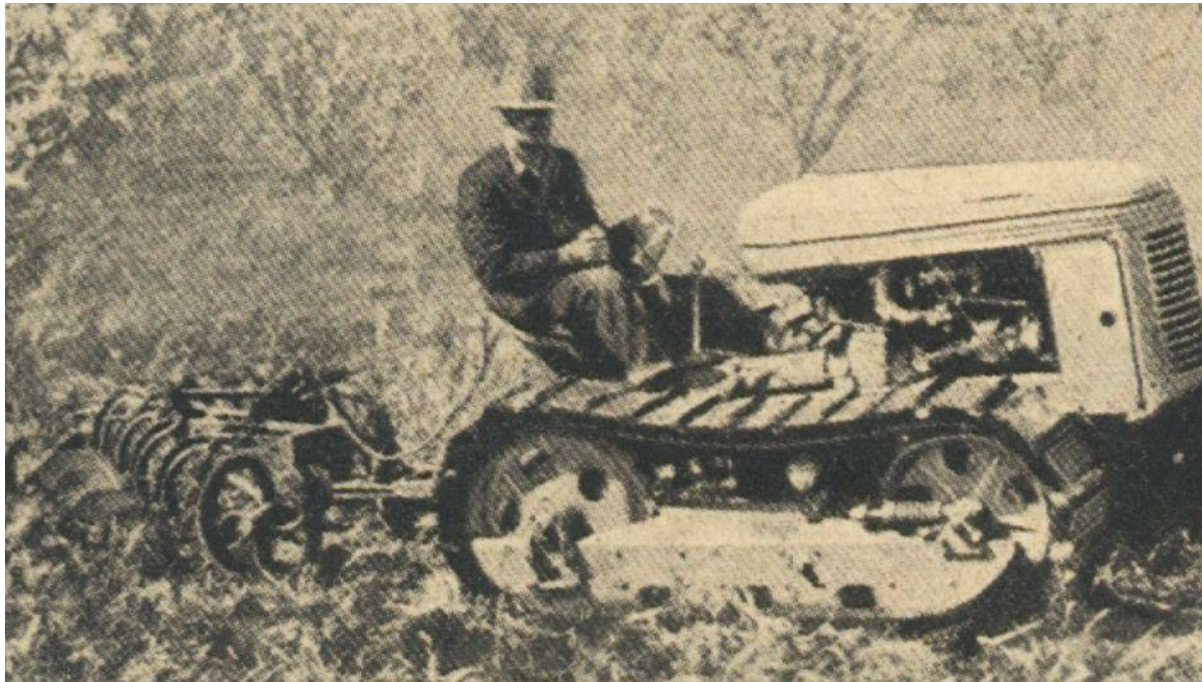


Abb. 22: Das Klein-Raupen-Modell „Oliver HG 42“ der Oliver-Corporation, Cleveland, Ohio, USA beim Pflügen 1942 (Köhler, 1949)

Die modernen Gummibandlaufwerke stellen eine wesentliche Verbesserung der Gleiskettenfahrwerkstechnologie im Bereich der landwirtschaftlichen Nutzung dar, da eine höhere Laufruhe, bei höheren Geschwindigkeiten und zugleich mehr Schonung des befahrenen Untergrundes vereint wurden. Die Gummigurtbänder sind gegenüber den Gleisketten wartungsfreundlicher. Gummigurtbänder haben aber auch Nachteile. Sie können in der Regel nicht repariert werden, wie dies bei den Gliederketten der Fall ist. Die Gummikarkasse ist wesentlich verschleißanfälliger gegenüber scharfen Kanten und harten Belägen. Gummi altert und wird brüchig, wodurch die Stabilität nachlässt und unter Umständen vor Erreichung der Verschleißgrenzen getauscht werden muss. Hohe Antriebs- und Verzögerungsmomente können zum abscheren der Antriebsnoppen bzw. Profilstollen an den Gummigurten führen.

Antriebsweise von Raupenlaufwerken in der Landwirtschaft

Bei den in der Landwirtschaft eingesetzten Gummibandlaufwerken sind zwei unterschiedliche Funktionsweisen hinsichtlich der Antriebsweise bekannt:

1. Formschlüssig angetriebene Laufwerke
2. Kraft-/reibschlüssig angetriebene Laufwerke

Formschlüssige Gummibandlaufwerke („positive drive“)

Bei den formschlüssigen Laufwerken wird das Gurtband, meist über ein separates Antriebsrad, durch formschlüssiges Eingreifen vorwärts bewegt. Eine hydraulische Vorspannung des Gummigurtbandes dient zur sicheren Führung des Gummigurtbandes und soll ein Überspringen bzw. Durchrutschen bei Übertragung hoher Zugkräfte oder plötzlicher Verzögerung der Maschine vermeiden, da dabei die Stollen beschädigt bzw. abgeschert werden können. Bei dem in Abb. 23 dargestellten formschlüssigen Laufwerk sind die in der Mitte angeordneten Stützrollen etwas tiefer angebracht, um die Kurvenfahrt zu erleichtern und den Verschleiß bei der Straßenfahrt zu verringern. Dies bedeutet andererseits, dass der Druck unter diesem Laufwerk über die Aufstandslänge ungleichmäßiger verteilt wird.

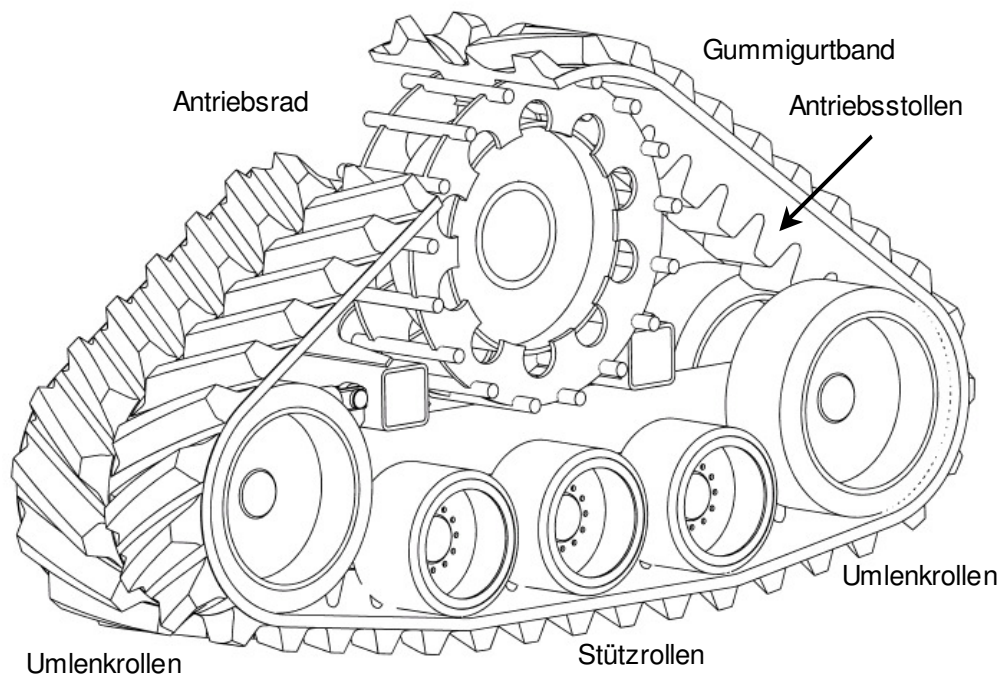


Abb. 23 Aufbau eines formschlüssigen Laufwerks mittels separaten Antriebsrades (verändert nach VDI 6101, 2007)

Bei dieser Bandlaufwerksbauart ist die permanente Überwachung und Anpassung der Gurtspannung während der Fahrt bei wechselnden Bedingungen von großer Bedeutung, da bei falscher Gurtbandspannung der Verschleiß bei den Führungsstollen am Gurtband zunimmt bzw. diese abgeschert werden können.

Kraft-/Reibschlüssige Gummibandlaufwerke („friction drive“)

Bei kraft-/reibschlüssigen Gummibandlaufwerken wird die Antriebskraft durch die Reibschlüssigkeit zwischen Gurtband und Antriebsrad übertragen (Abb. 24). Das Gurtband wird mit einer hohen Vorspannung versehen und durch die Bandspanneinrichtung des Laufwerkes zusätzlich gespannt. Die Führungsblöcke dienen hierbei nicht zum Vorantreiben des Gurtbandes, sondern nur zur Führung des Bandes auf den Rollen.

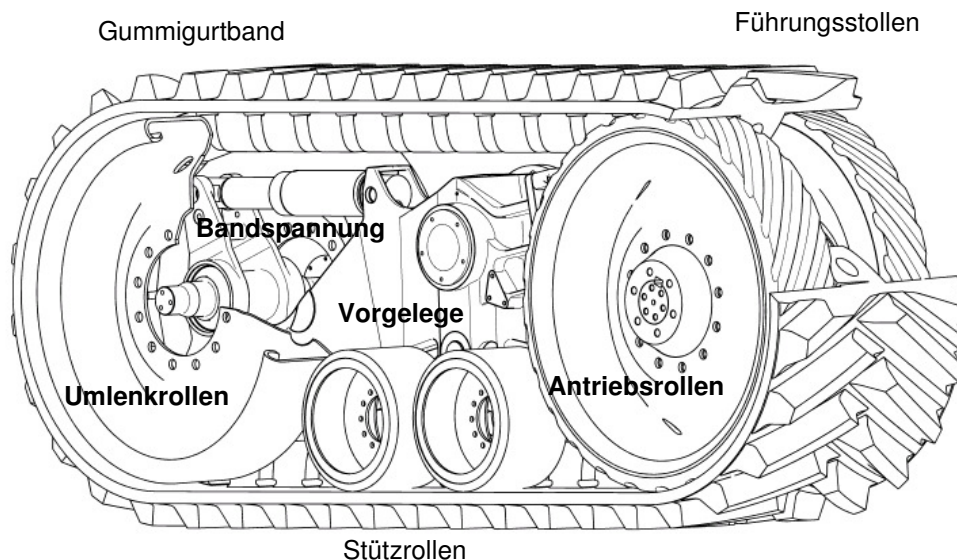


Abb. 24: Aufbau eines Gummibandlaufwerks mit kraftschlüssigem (reibungsschlüssigem) Antrieb und integriertem Vorgelegegetriebe (verändert nach Obermeier-Hartmann et al., 2006)

Der Großteil der eingesetzten Bandlaufwerke verfügt über eine reduzierte Lenkbarkeit unter Last, da die lange Aufstandfläche einen höheren Scherwiderstand verursacht. Der Schereffekt kann dabei beim Wenden auf dem Acker die Feldfrucht schädigen und führt auf weichem Boden zur Dammbildung. Einige Hersteller von starren Gurtbandlaufwerken versuchen diesen Effekt zu minimieren indem die Tragrollen etwas tiefer als die Umlenkrollen angeordnet sind. Diese Laufwerke laufen auf festem Untergrund in erster Linie auf den Tragrollen, wobei sich die Gesamttraglast um die zwei Rollenpaare der vorderen und hinteren Umlenkrollen, insgesamt 40 kN, verringert. Bei der Fahrt im Feld ist ein höherer Druck unter den tiefer eindrückenden Tragrollen zu erwarten (Weißbach, 2003).

Die Kosten für die Anschaffung und Wartung von Raupenfahrwerken sind angesichts der aufwändigeren Technik höher. Die Lebenslaufkosten, bezogen auf Standard-Radfahrwerke, nähern sich mit zunehmender Auslastung weitgehend an. Der Verschleiß der Gurtbandstollen ist bei der Straßenfahrt im Vergleich zu Luftreifen höher. Der höhere Rollwiderstand bei der Straßenfahrt (abhängig von der Bauart und der Gurtspannung) führt zu höheren Kraftstoffverbräuchen (Höfflinger, 1998). Daher sollte der Straßenfahrtanteil minimiert werden. Bei

schneller (> 15 km/h) Straßenfahrt führen die Vibrationen ungefederter Raupenfahrwerke zu Komforteinbußen, da keine natürliche Dämpfung wie beim Luftreifen vorhanden ist. Die maximale Geschwindigkeit der auf dem Markt befindlichen Ausführungen liegt bei 20 - 40 km/h für selbstfahrende Erntemaschinen und 40 km/h bei Raupentraktoren. Um diese höheren Geschwindigkeiten bei gleichzeitig hoher Fahrstabilität und Fahrkomfort realisieren zu können, werden die Raupenfahrwerke gefedert. Die HARAIN Maschinenbau GmbH entwickelte ein hydro-pneumatisches Raupenfahrwerk mit automatischer Auflagekraftverteilung für selbstfahrende Erntemaschinen und stellte dies erstmals zur Agritechnica 2005 vor. Die Funktionsweise ist beschrieben bei Geischer und Rainer (2008) und Geischer et al. (2010). Die Firma Claas Industrietechnik erweiterte das bisher bekannte Raupenlaufwerk für Mähdrescher um eine hydraulische Federung für Transportgeschwindigkeiten bis 40 km/h (Obermeier-Hartmann, 2010). Für das Grünland sind Bandlaufwerke nicht geeignet, da die Scherwirkung bei Wendefahrten zu Grasnarbenschäden führt. Die Verbesserung der bisherigen Bandlaufwerkstechnologie und die Entwicklung von gefederten Bandlaufwerken, z. B. mit Gummiblöcken, pneumatischen und hydraulischen Federungskonzepten, erhöhen die Laufruhe und den Fahrkomfort. Die Möglichkeit einer gleichmäßigen hydraulischen Druckverteilung zwischen den Stützrollenachsen sowie eine automatische Aufstandsflächenverkürzung bei Kurvenfahrten, durch Überdrücken der Stützrollenachsen, verbessern die Boden-anpassung und die Wendigkeit.

Aufbau von Gummigurtbändern unterschiedlicher Antriebsweisen

Die Gummigurtbänder sind ähnlich wie moderne Gummireifen aufgebaut. Sie bestehen aus einer Karkasse mit profilierter Lauffläche und unterschiedlichen Stollenformen. Die Karkasse ist aus mehreren Gewebelagen aufgebaut. Die Lagen bestehen aus Stahlkord, Stahlseilen und Kevlar und sind mit unterschiedlichen Gummimischungen umgeben. Anschließend wird der Gummigurt in einer einzigen Form oder abschnittsweise vulkanisiert. Die unterschiedlichen Fertigungsprozesse sind firmenspezifisch und unveröffentlicht. In Abb. 25 ist der Aufbau an Hand eines Gummigurtquerschnittes ersichtlich. Ist die Karkasse nicht beschädigt, können Gummigurtbänder ähnlich wie Gummireifen runderneuert werden indem die Stollen abgehobelt und neu aufvulkanisiert werden. Je nach Einsatzzweck ist das Profilmuster ähnlich der „Ackerschlepperreifen“ (AS-Profil) für unterschiedliche Einsatzzwecke verschieden ausgeführt. Grundsätzlich unterscheiden sich die Gummigurtausführungen hinsichtlich ihrer Antriebsweise. Dabei ist der an der Gurtinnenseite liegende Wulst unterschiedlich ausgeführt. Bei den so genannten reibschlüssigen Antriebsarten dient dieser als Führungsstollen. Dabei wird das Gummigurtband gerade geführt, wodurch ein „Ablösen“ bei Kurvenfahrten verhindert wird. Bei der formschlüssigen Bauform hat der innen liegende Stollen zusätzlich die Aufgabe das Antriebsmoment, ähnlich eines Zahnriemens, zu übertragen. Dabei sind die

Stollen so geformt, dass diese in die Rippen eines Antriebsrades mit entsprechender Teilung greifen und sich so mit dem Gurtstollen verzahnen. Das Antriebsmoment wird positiv, also formschlüssig übertragen.

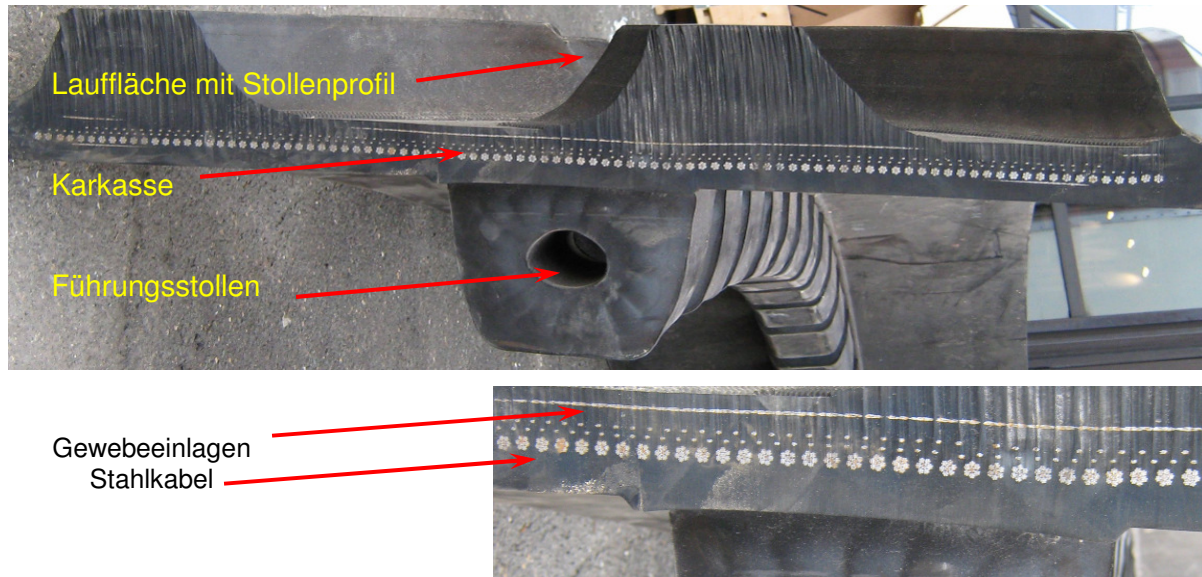


Abb. 25: Querschnitt eines Gummigurtbandes in dem der Aufbau ersichtlich ist

Weltweit gibt es insgesamt drei Hersteller für Gummigurtbänder im landwirtschaftlichen Bereich. Die Firma, die am längsten diese Gummigurtbänder für die Landwirtschaft produziert ist Veance Technology (früher Good Year Industries), USA. Die zweite Nordamerikanische Firma heißt Camoplast (Kanada), die Technologie wurde von Catapillar übernommen, nachdem sich Caterpillar aus dem landwirtschaftlichen Sektor zurückgezogen hat. Neu in dieses Marktsegment ist die Fa. Bridgestone aus Japan eingestiegen. Alle drei Firmen bieten Gummigurtbänder für kraft- und formschlüssige Antriebsarten an.

Ausführungen von Gummibandlaufwerken in der Landwirtschaft

In der Landwirtschaft setzte sich diese Technologie, wie bereits in der Vergangenheit, hauptsächlich dort durch, wo hohe Zugkräfte übertragen werden müssen, vor allem bei Traktoren mit einer Motorleistung von mehr als 250 kW zur Bodenbearbeitung auf Großbetrieben. Dabei handelt es sich in der Regel um Spezialtraktoren, die nicht auf Räder umgerüstet werden können. Zu diesen auf dem Markt angebotenen Raupentraktoren gehören z. B. der Steiger Quad Trac von Case IH, die T-Serie bei John Deere und der Challenger Raupentraktor von AGCO (Abb. 26).



Steiger Quad Track

Knicklenkung mit vier form-schlüssigen Dreiecksgummibandlaufwerken

John Deere T 8000 und T 9000
2 keilförmige kraftschlüssige GummibandlaufwerkeAGCO Challenger MT700 und MT800
2 keilförmige kraftschlüssige Gummibandlaufwerke

Abb. 26: Auf dem Markt angebotenen Raupentraktorentechnik

Zur Umrüstung von Standardtraktoren werden für Sonderkulturen (Beetanbau) spezielle Raupenlaufwerke mit Pflegegurtbändern für Standardtraktoren angeboten. Ebenso können diese mit verschiedenen breiten Gummigurtbändern ausgestattet werden, um ebenfalls schwere Zugarbeiten erledigen zu können. In Abb. 27 sind Umrüslösungen für Standardtraktoren und deren Umsetzung in der Praxis dargestellt.



Westtrack (Werkbild, 2007)

Dreiecksgummibandlaufwerke für Standardtraktoren mit schmalen Pflegegummibändern im Sonderkultureneinsatz



Soucy Tracks





Dreiecksgummibandlaufwerke mit breiten Gummibändern für Standardtraktoren zur Übertragung höherer Zugkräfte

Abb. 27: Umrüslösungen für Standardtraktoren

Bei diesen Umrüslösungen werden an die Naben der Traktoren anstelle der Radfelgen die Raupenlaufwerke montiert, deren Antriebsrad den entsprechenden Lochkreis besitzt. Bedingt durch den kleineren Durchmesser des Antriebrades zum ursprünglichen Luftreifen ver-

ringert sich anteilig die Endgeschwindigkeit. In Tab. 11 sind Hersteller von Umrüslösungen für Traktoren und selbstfahrenden Erntemaschinen zusammengefasst dargestellt und technisch beschrieben.

Tab. 11: Übersicht von Nachrüstraupensätzen, die Anstelle der Reifenfelge auf den Naben von Traktoren und Endantrieben selbstfahrender Erntemaschinen montiert werden können

Hersteller	WESTTRACK (Niederlande)	Combitrac (Italien)	TIDUE (Italien)	SOUCY (Canada)
				
Gurtantriebsart	formschlüssig	formschlüssig	formschlüssig	formschlüssig
Federung	nein	nein	mechanisch	mechanisch
Aufstandsfläche Kontakt zw. Gurtband/Boden	hauptsächlich Tragrollen	hauptsächlich Tragrollen	hauptsächlich Tragrollen	hauptsächlich Tragrollen
Anzahl Rollenpaare	4 – 5	6	4 - 6	bis 8
Tragrollen	starr	starr	starr	beweglich

3.3.3 Fahrwerkskonfiguration und Aufbau

Die Einsatzbereiche und Anforderungen an moderne Fahrwerke in der Landwirtschaft werden zunehmend vielfältiger und komplexer. Grundsätzlich unterscheiden sich die Fahrwerke angehängter und gezogener Maschinen von Zugfahrzeugen bzw. selbstfahrenden Erntemaschinen hinsichtlich der Auslegung und Ausführung. Bei den Anhängern ist ein Trend zu mehr Achsen bei steigenden Ladekapazitäten zu beobachten. Ziel ist es die steigenden Fahrzeuglasten möglichst gleichmäßig zu verteilen. Großanhänger können mit bis zu fünf Achsen ausgeführt sein. In Abb. 28 ist eine Übersicht, über die im landwirtschaftlichen Einsatz befindlichen Fahrwerkskonzepte von Anhängern dargestellt.

Fahrwerke von landwirtschaftlichen Anhängern

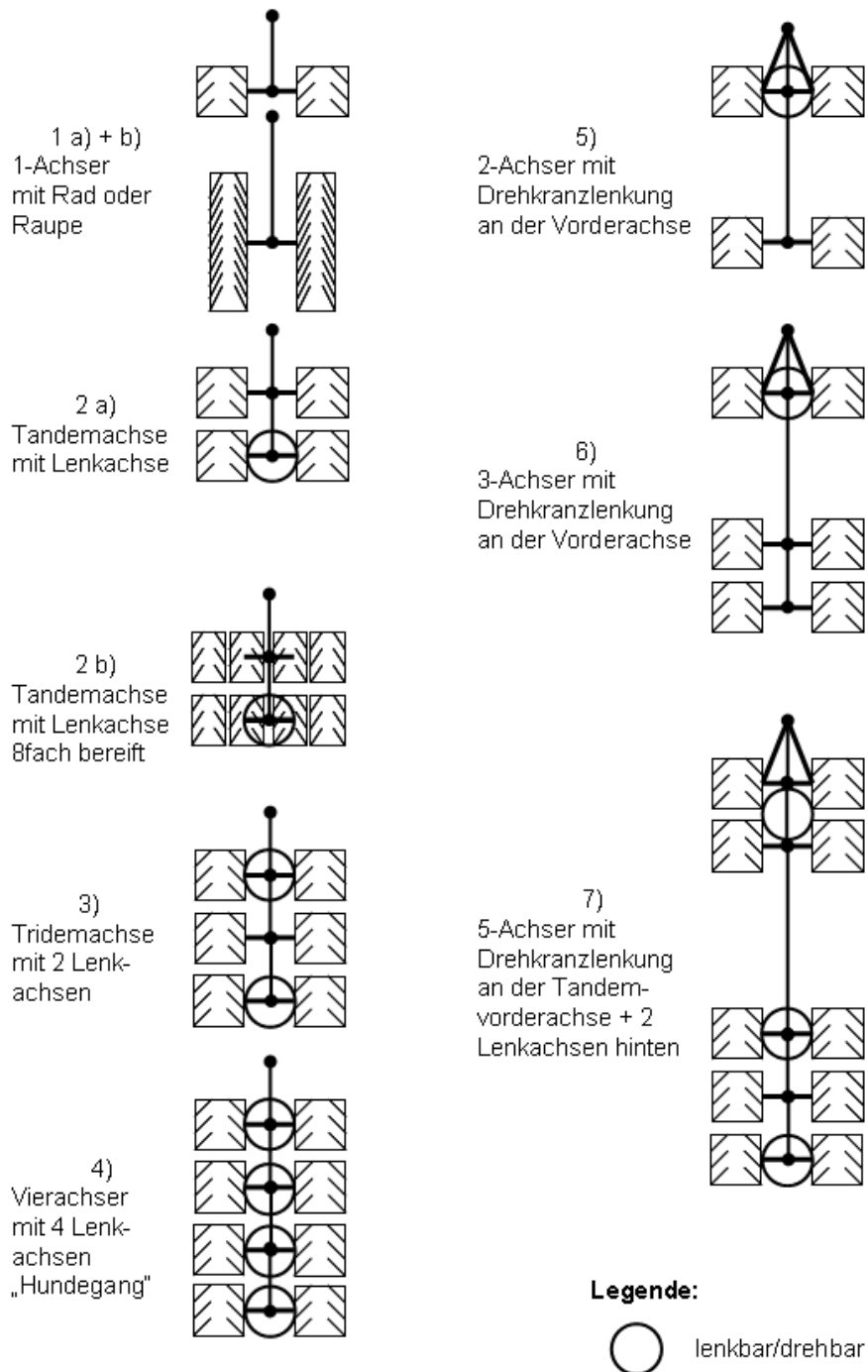


Abb. 28: Übersicht von aktuell in der Landwirtschaft eingesetzten Anhängerfahrwerken

Die Einachsanhänger wurden weitestgehend von Tandemausführungen verdrängt. Mittlerweile geht der Trend hin zu tridem ausgeführten Anhängern. Der Einsatz von Gummiraupenlaufwerken ist in Nordamerika bei Überladewagen zu finden. Achtfach bereifte Fahrwerke kommen vereinzelt bei Kurzschnittladewagen in hängigen Gebieten oder auf weniger tragfähigen Böden (Moorsböden) zum Einsatz. Mit der Anzahl der Achsen steigt parallel die Über-

rollungshäufigkeit. Um diesem Effekt zu begegnen werden die Achsen von vierachsige Güllefässer lenkbar ausgeführt und durch eine Steuerung so angelenkt, dass ein spur versetztes Fahren möglich ist. Zwei- und dreiachsige Anhänger sind in der Regel für den Straßentransport ausgeführt. Diese können mit einer speziellen Ackerbereifung ebenso zum Transport auf dem Feld verwendet werden.

Großtraktoren sind mit Rad- und Raupenfahrwerken erhältlich. Zur Übertragung hoher Zugkräfte bei Antriebsleistungen mit > 250 kW werden in der Regel Raupentraktoren eingesetzt. Traktoren, die sowohl für Transportzwecke als auch auf dem Acker genutzt werden sind mit modernen Radialreifen ausgerüstet, welche einen hohen Fahrkomfort bei Geschwindigkeiten von bis zu 80 km/h ermöglichen und im Acker ausreichend Traktion bieten. Der Trend hin zu immer höheren Erntekapazitäten hatte bei den selbstfahrenden Erntemaschinen zur Folge, dass neue Fahrwerkskonzepte entwickelt wurden bzw. die bestehenden kombiniert und verbessert wurden. Eine weitere Möglichkeit, um das System Reifen/Boden zu optimieren, ist der Einsatz von Mehrfachbereifung. Durch das Anbringen zusätzlicher Räder an den vorhandenen Rädern kann kurzfristig die Aufstandsfläche vergrößert werden. Dadurch sinkt bei gleich bleibender Gewichtskraft der mittlere rechnerische Kontaktflächendruck. Durch das größere Luftvolumen können die Reifen mit niedrigeren Reifeninnendrucke gefahren werden. Eine verbesserte Zugkraftübertragung stellt sich ein. Des Weiteren verleihen die Mehrfachbereifungen der Maschine eine bessere Hangstabilität. Großtraktoren mit Rädern sind häufig mit Zwillingsbereifung ausgerüstet. Bei Erntemaschinen wie Mähdreschern und Feldhäckslern z. B. werden auch Zwillingsräder auf der Vorderachse eingesetzt. Für die reinen Zugfahrzeuge dienen die Gummiraupenfahrwerke vor allem der sicheren und best möglichen Zugkraftübertragung. In der Abb. 29 sind die realisierten Varianten zusammengefasst dargestellt.

Fahrwerke von landwirtschaftlichen Zugfahrzeugen

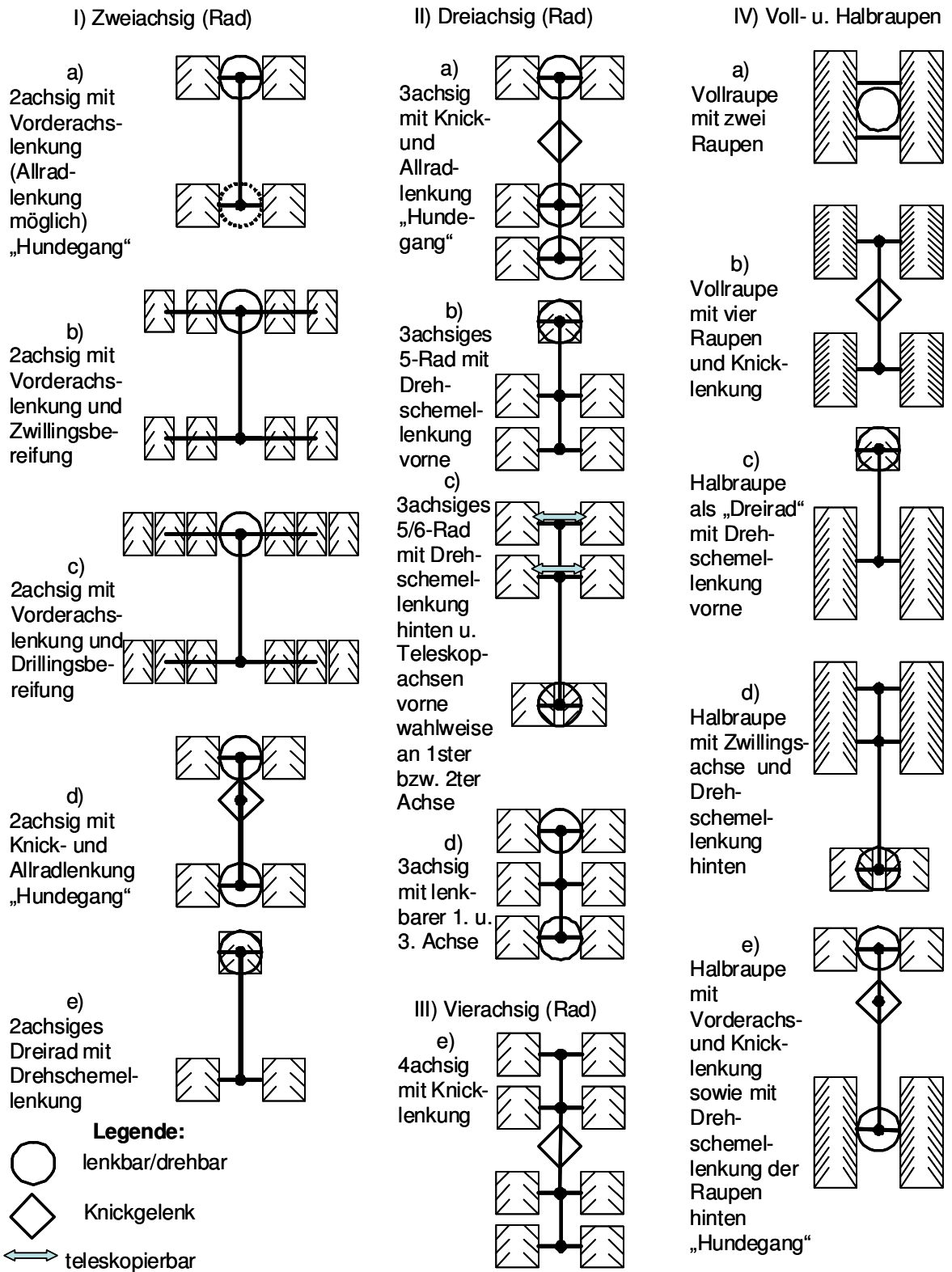


Abb. 29: Übersicht von aktuell in der Landwirtschaft verwendeten Fahrwerkskombinationen auf Zugmaschinen

Bei den selbstfahrenden Erntemaschinen steht die Einhaltung der gesetzlichen Auflagen im öffentlichen Straßenverkehr in Verbindung mit einer größtmöglichen Aufstandsfläche zur Bodenschonung im Vordergrund. Aus diesem Grund ist die Kombination aus Rad und Raupe überwiegend bei den selbstfahrenden Erntemaschinen verbreitet, da mit dieser Auslegung die Diskrepanz zwischen gesetzlicher Achslast, zur Verfügung stehendem Bauraum und maximal zulässiger Transportbreite technisch umsetzbar ist. Bei den zwei und dreiachsigen selbstfahrenden Zuckerrüben-Köpfrodebunkern hat sich der Einsatz des spurversetztenfahrens, der so genannte Hundegang etabliert. Durch die Lenkbarkeit aller Achsen und einer zusätzlichen Knicklenkung, kann die Maschine mit den Hinterachsen seitlich versetzt und parallel zur Vorderachse fahren. Je nach Arbeits-, Reifenbreite und Achsenanzahl kann die Mehrfachüberrollung, bedingt durch Spur in Spur hintereinander laufender Rädern verringert werden. Gleichzeitig wird die gesamte Fläche mit dem jeweiligen Befahrungsmuster ganzheitlich überfahren. Eine Möglichkeit zur Minimierung des Spuranteils besteht in der Anordnung der Räder. Beim Dreirad läuft zwischen einer Achse mit zwei Rädern das dritte Rad in einer Vorder- oder Hinterachse dazwischen, so dass durch die einmalige Überfahrt die gesamte Maschinenbreite einfach überrollt wird. Im Gegensatz zum „Hundegang“ wird weitestgehend einfach überrollt, was von der Reifenbreite abhängig ist. Die Lenkung erfolgt über eine Drehschemellenkung des einzelnen bzw. Doppelrades. Fünfradkonzepte können mit teleskopierbaren Achsen ausgestattet sein, so dass die Spuren in Dreiecks- oder V-Form über die Fläche abgetragen werden und die Räder nebeneinander laufen können. Je nach Arbeitsbreite der Maschine und der verwendeten Reifendimensionen können bei der Anschlussfahrt Überlappungsbereiche entstehen. In der nachfolgenden Tab. 12 sind Maschinen mit ungerader Radanzahl zur ganzflächigen Überfahrt dargestellt.

Tab. 12: Beispiele für Dreirad-/Fünfradfahrzeuge für minimalen Spuranteil und ganzheitliches Überfahren der Fläche



Systemtraktor mit Dreiradfahrwerk



Dreiradkonzept kombiniert mit Raupenlaufwerk anstelle der Hinterachse (Halbraupe)



Teleskopierbare Mittelachse zur ganzflächigen Überrollung bei der Fahrt im Feld



5-Radmaschine nach Dreiradkonzept mit Tandemhinterachse und einem einzelнем großvolumigem Rad mit Drehschemellenkung in Front

In Tab. 13 sind Spezialfahrwerke dargestellt, die in der Praxis noch keine große Verbreitung haben, jedoch der Vollständigkeit halber vorgestellt werden.

Tab. 13 Beispiele von Spezialfahrwerken in der Landwirtschaft



3 Achsen mit 6 gleich großen Rädern. Dieser Zugtraktor ist mit 2 Lenkachsen (1. und 3. Achse) ausgerüstet. Er verfügt über eine Einzelradaufhängung und einer integrierter Reifendruckverstellanlage



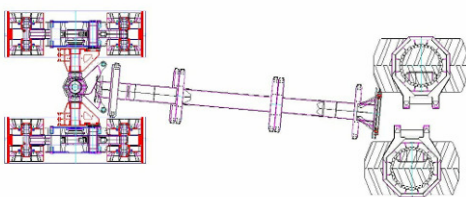
4 Achsen mit 8 gleichgroße Räder und Knicklenkung



Systemtraktor-Anhänger-Gespann mit insgesamt sieben Achsen. Bei einmaliger Überfahrt durch das Gespann wird eine siebenfache Radüberrollung erzeugt



Auf der Hinterachse dieses zweiachsigen KRB6 wurden Anstelle des 1050/50 R32 Reifens Zwillingräder montiert, die hydraulisch auseinander gefahren werden können



Kombination aus Gummibandlaufwerken auf der Vorderachse zur Erhöhung der Achslast von 127 kN auf 200 kN (StVZO) und mit Luftreifen ausgeführte Hinterachse (Halbraupe). Durch die Knicklenkung vorne und der Einzelrad aufgehängten und jeweils mit einem Drehkranz versehenen Hinterräder ist das spurversetzte Fahren möglich (HARAIN, 2005)



3.3.4 Einordnung landwirtschaftlicher Fahrwerke

Nachfolgend sind die Fahrwerke nach gesetzlichen Kriterien und ihren bauartbedingten Wirkungsweisen auf den Boden eingeordnet.

3.3.4.1 Gesetzliche Vorgaben - Straßenverkehr

Gemäß § 70 StVZO dürfen Arbeitsmaschinen maximal 3,00 m breit sein. Maße, die über diese Grenze hinausgehen, müssen bei den zuständigen Landratsämtern genehmigt werden, was gegebenenfalls mit Auflagen verbunden sein kann. Eine bodenschonende Bereifung oder Fahrwerk kann mit einer maximalen Transportbreite bis 3,50 m genehmigt werden. Auch in anderen EU-Staaten sind 3,50 m bei der Transportbreite die Obergrenze. Breitere Fahrzeuge sind ausschließlich auf arrondierten Betrieben zu finden, da ein häufiges ab- und anmontieren von Zwillingsrädern nicht praktikabel ist. Ebenso ist der Einsatz von Drillingsreifen zu bewerten.

Achslastbeschränkung bei Gummiraupenfahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr: Der §34 b der StVZO² gibt folgende Formulierung für die Laufrollenlast und das Gesamtgewicht von Gleiskettenfahrzeugen vor: „(1) Bei Fahrzeugen, die ganz oder teilweise auf endlosen Ketten oder Bändern laufen (Gleiskettenfahrzeuge), darf die Last einer Laufrolle auf ebener Fahrbahn 2 t nicht übersteigen. Gefederte Laufrollen müssen bei Fahrzeugen mit einem Gesamtgewicht von mehr als 8 t so angebracht sein, dass die Last einer um 60 mm angehobenen Laufrolle bei stehendem Fahrzeug nicht mehr als doppelt so groß ist wie die auf ebener Fahrbahn zulässige Laufrollenlast. Bei Fahrzeugen mit ungefederten Laufrollen und Gleisketten, die außen vollständig aus Gummiband bestehen, darf der Druck der Auflagefläche der Gleiskette auf die ebene Fahrbahn 0,8 N/mm² nicht übersteigen. Als Auflagefläche gilt nur derjenige Teil einer Gleiskette, der tatsächlich auf einer ebenen Fahrbahn aufliegt. Die Laufrollen von Gleiskettenfahrzeugen können sowohl einzeln als auch über das gesamte Laufwerk abgedeckt werden. Das Gesamtgewicht von Gleiskettenfahrzeugen darf 24 t nicht übersteigen. (2) Gleiskettenfahrzeuge dürfen die Fahrbahn zwischen der ersten und letzten Laufrolle höchstens mit 9 t je Meter belasten. Übergangsvorschriften“ (§ 72 Abs. 2 StVZO). Durch den geringeren Bauraumbedarf (Abb. 30), bei gleicher Tragfähigkeit, findet diese Technik vor allem bei selbstfahrenden Erntemaschinen mit hohem Bunkervolumen Verwendung.

² STVZO – STRAßENVERKEHRS-ZULASSUNGS-ORDNUNG – in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. September 1988, zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 25. September 2008 (BGBl. I S. 1878) [145].

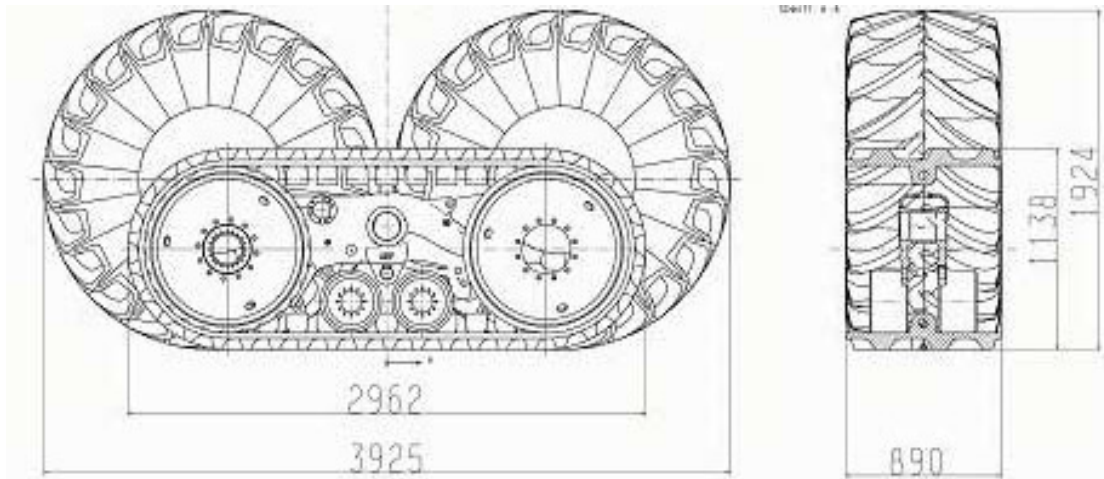


Abb. 30: Bauraumvergleich zwischen Rad- und Bandlaufwerk bei gleicher Traglast (Obermeier-Hartmann et al., 2006)

Die Problematik des zur Verfügung stehenden Bauraumes ist besonders bei Mähdreschern gegeben, da leistungsstarke Dreschorgane bereits 1,7 m der gesamten Maschinenbreite ausmachen. Rademacher und Weißbach (2004) stellten bei einem Mähdreschervergleich Maschinenbreiten gegenüber, welche erreicht würden, wenn diese mit unterschiedlich breiten Reifen ausgestattet werden. Grundsätzlich bieten Mähdrescher mit Rotorabscheidung bzw. die so genannten 5-Schüttler Maschinen mehr Bauraum für größere Reifen (max. 710 mm breite Reifen). Die in Tab. 14 aufgezeigten Reifenbreiten beziehen sich auf Mähdrescher der höheren Leistungsklasse mit breitem „Body“. Die Einhaltung der Maximalbreite ist demzufolge mit einem 650 mm breiten Reifen oder einem Gummiraupenlaufwerk (25“ breites Gummigurtband) möglich. Damit der 650 mm breite Reifen die notwendige Tragfähigkeit erreicht, muss dieser mit 3,4 bar Reifeninnendruck (laut Reifentabelle) gefüllt werden.

Tab. 14: Bodenschonende Breitreifen für Großmähdrescher mit 85 – 90 kN Radlast (verändert nach Rademacher und Weißbach, 2004)

Reifenbreite [mm]	Reifeninnendruck [bar]	Mähdrescherbreite [m]
650	3,4	3,5
800	1,8	3,9
900	1,1	4,2
1050	1,2	4,4
Raupe	-	3,5

3.3.4.2 Bodenbelastung - Bodenbeanspruchung

In diesem Abschnitt sollen die Untersuchungsergebnisse hinsichtlich der Wirkung auf den Boden zusammenfassend dargestellt werden. Da diese Untersuchungen, kombiniert mit den Messungen zu verschiedenen Radlaufwerken durchgeführt wurden, werden die Rad- und Gummibandlaufwerksuntersuchungen parallel dargestellt.

Bodendruck

Zur Wirkung auf den Bodendruck stellte Weißbach (2003) in seinen weiterführenden Untersuchungen zu modernen, großvolumigen Reifenfahrwerken bei Großtraktoren fest, dass Terra- und Zwillingsbereifungen einen identischen Druckverlauf haben.

Die Auswirkungen moderner Gummibandlaufwerke auf den Boden sind in der Literatur weniger häufig beschrieben als die von modernen Radialreifen. Die Mehrzahl der Untersuchungen zur Wirkung des bodenschonenden Verhaltens der Gummibandlaufwerke wurde unter Raupentraktoren durchgeführt. Reaves und Cooper (1960) untersuchten die Tiefenwirkung des Bodendrucks unter einem ziehenden Luftreifen und einer ziehenden Gleiskette mit identischer Last von ca. 17 kN und einem Zuggewicht von 7 kN ($\Sigma = 24$ kN). Das Raupenfahrwerk, bestehend aus einer Gleiskette, war 12 Zoll breit und 5 Fuß lang, was einer umgerechneten Aufstandsfläche von ca. 4.645 cm² entsprach. Der mittlere rechnerische Kontaktflächendruck betrug in etwa 50 kPa. Der diagonale Luftreifen mit einer Breite von 13 Zoll und einer Felgenreife von 38 Zoll hatte näherungsweise nach TASC eine Aufstandsfläche von 1.730 cm², womit der Kontaktflächendruck ca. 140 kPa betrug. Die mit einem so genannten Druckwandler ermittelten Ergebnisse bestätigten die Unterschiede der beiden rechnerisch ermittelten Kontaktflächendrücke. Unter dem Rad wurden mehr als doppelt so hohe Ausgangsdrücke als unter der Gleiskette festgestellt. Die Druckzwiebeln konnten unter dem Luftreifen bis in eine Tiefe von knapp 40 cm nachgewiesen werden, gegenüber einer Tiefe von 25 cm unter der Gleiskette.

Weißbach und Winter (1996) untersuchten den Bodendruck unter zwei Großtraktoren mit unterschiedlicher Bereifung (620 und 710 mm Reifenbreite) und einem Raupentraktor mit vergleichbaren Maßen. Die höchsten Drücke wurden über alle vier Messtiefen (10, 15, 30 und 40 cm) beim 620 mm breiten Reifen beobachtet. Der 710 mm breite Reifen verursachte niedrigere Drücke, die jedoch nicht signifikant geringer waren. Die gemessenen Drücke unter dem Raupentraktor waren signifikant niedriger. Der Druck halbierte sich in der Tiefe von 10 auf 15 cm. In 40 cm konnte keine Druckspitze festgestellt werden. Die Messung der Druckverteilung unter dem Bandlaufwerk zeigte, dass die höchsten Druckspitzen unter den Laufwerksrollen entstehen und dass der Zwischenrollenbereich nur wenig trägt, da das Band nachgibt. Durch die paarweise Anordnung der Laufwerksrollen verhält es sich ebenso im Bereich der so genannten Führungsnase, hier ist der Druck geringer als unter den Laufrollen.

Auf Grund der von Weißbach et al. (1996) festgestellten ungleichen Druckverteilung unter einem Gummiband-Raupentraktor wies Weißbach (1996) nach, dass die maximalen Bodendrücke im Krumbereich geringfügig niedriger sind gegenüber denen der Radtraktoren. Horn (2001) verwies auf die scherende Verformung von Gummilaufbändern. Diese hatten bei einem mittleren Schlupf von 10 – 15 % bei mäßig feuchten sandig – schluffigen Böden eine horizontale und gleichzeitig vertikale Bodenbewegung gezeigt. Dabei wurde in einer Tiefe von 10 cm eine Bodenbewegung um vier Zentimeter entgegen der Fahrtrichtung und eine weitere um drei Zentimeter in vertikaler Richtung festgestellt.

Der Einsatz von Bandlaufwerken zur Bodenschonung bei schweren Erntemaschinen wird ebenfalls unterschiedlich beurteilt. Weißbach (1994) stellte mit der Schlauchdrucksonde bei dynamischen Druckuntersuchung verschiedener Fahrwerkskonzepte fest, dass sich der mittlere rechnerische Kontaktflächendruck von den gemessenen Bodendrücken der unterschiedlichen Fahrwerksvarianten (Halbraupe, Bandlaufwerke, Breitreifen, Terrareifen und Tandemachse) im Oberboden unterschied. Die Bodendrücke in 10 cm Tiefe spiegelten den eingestellten Reifeninnendruck wieder und waren deutlich höher als der mittlere rechnerische Kontaktflächendruck. Weißbach (1994) erklärte dies mit einer ungleichen Druckverteilung unter den Fahrwerken. Im lockeren Oberboden stellte er einen Druckanstieg mit jeder zusätzlichen Rad- bzw. Laufwerksrollenüberrollung fest während dies in den unbearbeiteten Bodenhorizonten nicht beobachtet werden konnte. Die Rad- sowie die Halbraupenüberrollung hatte ein Gewicht von 40 kN, das Bandlaufwerk von über 100 kN. Bei der Untersuchung zu bodenschonenden Fahrwerken bei Mähdreschern bestätigte Weißbach (2001) den geringeren Spitzendruck und den schnelleren Druckabbau über die Tiefe unter modernen Bandlaufwerken (Abb. 31) sowie den Einfluss der Reifengröße und des Reifeninnendruckes hinsichtlich der Druckausbreitung.

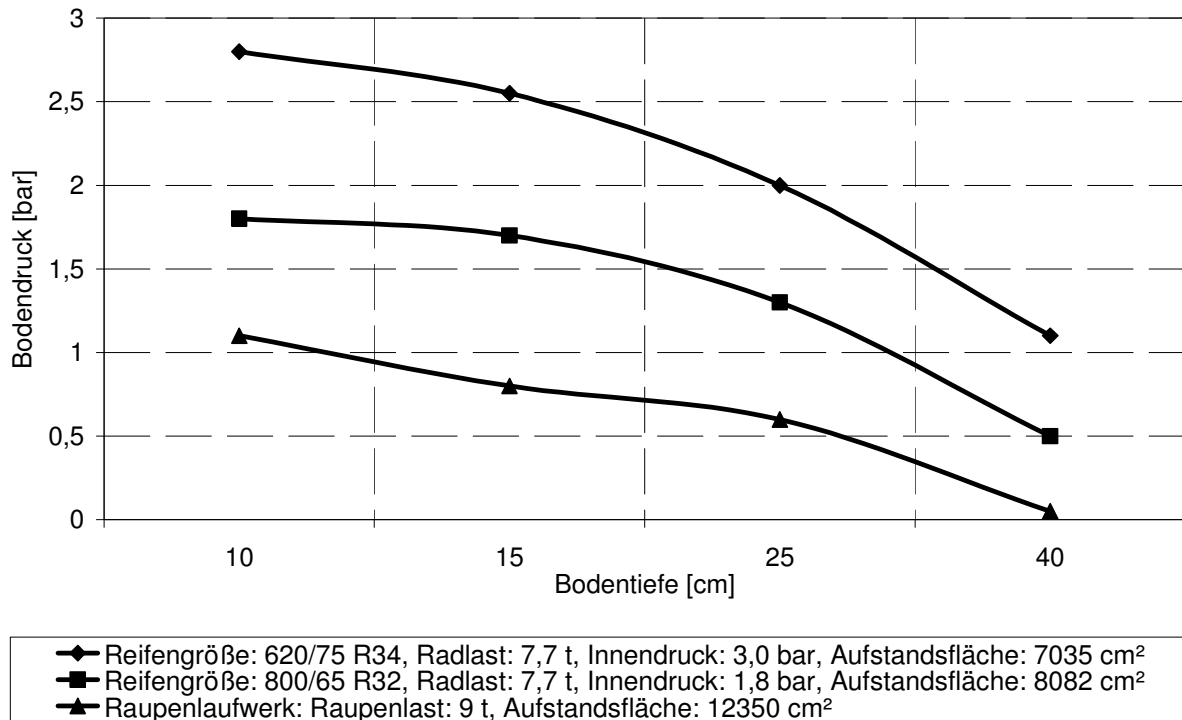


Abb. 31: Gemessener Bodendruck mit Schlauchdrucksonden unter den Fahrwerken zweier verschiedener Mähdrescher mit drei Fahrwerksvarianten in Abhängigkeit von der Bodentiefe. Gemessen auf sandigem Lehm bei einer Bodenfeuchte von 16,2 Gew.-% (Weißbach, 2001)

Die Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2005) zeigt aus den durchgeführten Felduntersuchungen, dass die Druckverteilung unter den Gummiraupenlaufwerken (Raupentraktoren und selbstfahrende Erntemaschinen) sehr unterschiedlich geartet ist und an die jeweilige Bauform, den Einsatzzweck und die äußeren Gegebenheiten gebunden ist. Bei trockenen Böden und kurzer Bauweise kommen die Druckspitzen denen eines Luftreifenfahrwerks gleich. Bei den Mähdreschern zur Körnermaisernte und bei hoher Bodenfeuchte (pF2) stiegen die Bodendrücke im Oberboden zum Ende des Gummibandlaufwerkes hin auf sehr hohe Werte an und wichen somit vom Verhalten der übrigen Gummiraupenlaufwerke deutlich ab. Dabei lagen die Bodendrücke unter den Laufrollen in einer Tiefe von 20 cm über den errechneten mittleren Kontaktflächendrücken. Im Unterboden dagegen konnte unter allen verschiedenen Gummibandlaufwerken eine deutliche Reduktion des Bodendrucks festgestellt werden. Bei Bodendruckmessungen unter Mähdrescher-Vorderachsen stellte Brunotte (2004) bei gleichen Lasten geringere Spitzen drücke unter dem Gummibandlaufwerk fest. Ob der geringere Bodendruck bei vierfacher Überrollung durch die Laufwerksrollen (Gummibandlaufwerk) oder der einmalig auftretende höhere Druck unter dem Reifen günstiger für die Bodenfunktionen ist, konnte Brunotte (2007) nicht abschließend beantworten. Bei Messungen der Bodensetzung von verschiedenen KRB6-Fahrwerken mit hohen Lasten, stellte Brunotte (2007) keine Unterschiede zwischen Rad- und Gummibandlaufwerken fest. Ansorge und Godwin (2006) konnten bei Mes-

sungen in einer Bodenrinne deutlich geringere Bodendeformationen beim Gummibandlaufwerk nachweisen. Des Weiteren stellten Ansorge und Godwin (2008) fest, dass ein auf der Spur eines Bandlaufwerkes nachfolgender Luftreifen mit geringer Last keine zusätzliche Verdichtung erzeugt. Die Kombination aus Raupe und Reifen mit einer Gewichtverteilung eines Mähdreschers kann somit gegenüber einem Mähdrescher mit Luftreifen als bodenschonender eingestuft werden.

Die Raupenlaufwerkstechnologie unterliegt einer andauernden Weiterentwicklung und Verbesserung. Dadurch hat sich die Einsatzvielfalt der Gummiraupenlaufwerke erhöht. Schwere Lasten und steigende Anforderungen hinsichtlich Transportzulassung auf öffentlichen Strassen haben zu neuen und verbesserten Konzepten geführt. Zur Druckverteilung (in Längs- und Querrichtung) unter modernen Gummibandlaufwerken mit gestiegenen Lasten ist aktuell kaum untersucht und veröffentlicht worden.

Mehrfachüberrollung

Je nach Arbeitsbreite, Anzahl der Achsen und Reifenbreite variiert der Anteil der Mehrfachüberrollung auf der Fläche. In der nachfolgenden Tab. 15 sind die Überrollungsanteile eines zweiachsigen und eines dreiachsigen KRB6 bei einer Arbeitsbreite von sechs Metern errechnet (incl. Anschlussfahrt).

Tab. 15: Spuranteil verschiedener KRB6 mit „Hundeganglenkung“ bei einer Arbeitsbreite von drei Metern und 900 mm breiten Vorderachsreifen

Fahrwerks-eigen-schaften	keine Überrollung	Spuranteil einfache Überrollung	Spuranteil zweifache Überrollung	Spuranteil dreifache Überrollung
zweiachsig	150 mm (5 %)	1.300 mm (43 %)	1.192 mm (40 %)	358 mm (12 %)
dreiachsig	-	891 mm (30 %)	1.448 mm (48 %)	661 mm (22 %)

Wie in Abb. 32 ersichtlich wird beim spurversetzten Fahren mit einer Arbeitsbreite von drei Metern je nach Anzahl der Achsen und der Reifenbreite unterschiedlich viel Fläche einfach und mehrfach überrollt. Der Vergleich zeigt die Unterschiede zwischen zwei- und dreiachsigen Maschinen mit unterschiedlichen Fahrwerken und deren Arbeitsweisen. Eine dreiachsige Maschine erzeugt im Gegensatz zu einer zweiachsigen bei spurversetzter Fahrt und einer Arbeitsbreite von drei Metern einen geringeren Anteil bei der einfachen Überrollung, den höchsten mit knapp 1,5 m bei der zweifachen und einen etwa doppelt so hohen bei dreifacher Überrollung. Bei der zweiachsigen Maschine bleibt ein schmaler Streifen von ca. 0,15 m unbefahren.

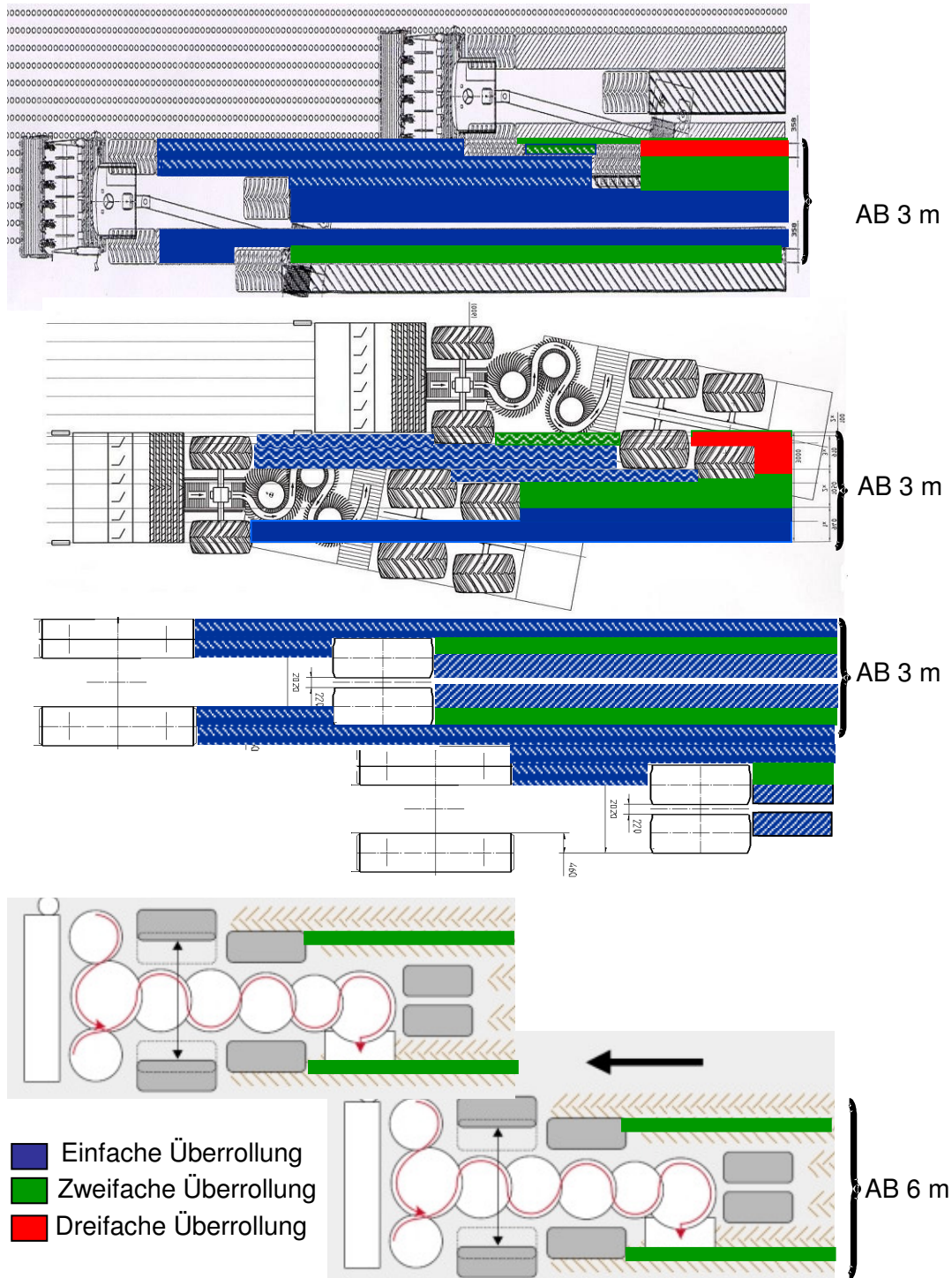


Abb. 32: Vergleich typischer Spurmuster verschiedener Fahrwerkskonfigurationen von KRB bei ganzheitlichem Befahren

Zugkraftübertragung - Schlupf

In der Literatur beziehen sich die Untersuchungen zum Vergleich von Rad- und Bandlaufwerken überwiegend auf Traktion- und Schlupfmessungen. Dabei steht die bestmögliche Kraftübertragung von ziehenden Fahrwerken im Vordergrund. Der Vorteil von Großtraktoren

mit Bandlaufwerken liegt in der besseren Zugkraftübertragung. In Abb. 33 sind die Ergebnisse der Zugkraftmessung auf einem Getreidestoppelfeld von zwillingbereiften und mit Gummibandlaufwerk ausgestatteten Großtraktoren (Weißbach, 2003) dargestellt. Der Raupentraktor schnitt gegenüber dem Radtraktor mit Zwillingbereifung bei allen Schlupfklassen mit einem höheren Zugkraftbeiwert ab.

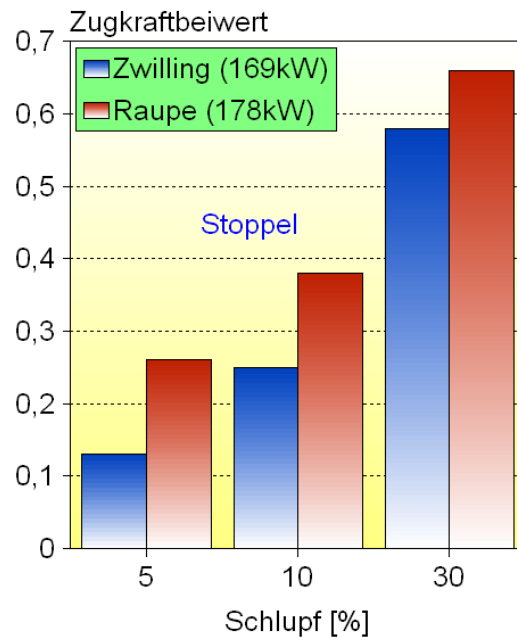


Abb. 33: Zugkraftvergleich zwischen Rad- und Raupentraktor bei unterschiedlichem Schlupf (Weißbach, 2003)

In Tab. 16 ist der Vergleich des gemessenen Schlupfes bei gleichen Zugkraftbeiwerten dargestellt. Beim Radtraktor mit Zwillingbereifung wurde ein höherer Schlupf als beim Raupentraktor gemessen (Weißbach, 2003).

Tab. 16: Vergleich des Schlupfes bei unterschiedlichen Zugkraftbeiwerten zwischen Traktoren mit Zwillingbereifung und Gummibandlaufwerk (Weißbach, 2003)

Zugkraftbeiwert	Schlupf [%] bei		Diff. abs [%]
	Raupe (178 kW)	Zwilling (169 kW)	
0,26	5	11	6
0,38	10	17	7

4 Zielsetzung

Der Einsatz leistungsfähiger und bodenschonender Maschinen ist für die Landwirtschaft von großer Bedeutung. Dabei nimmt die Fahrwerksgestaltung als Schnittstelle zwischen Maschine und Boden eine Schlüsselfunktion ein. Galileo Galilei (1638)³ stellte bei seinen naturwissenschaftlichen Untersuchungen fest, dass bei einer Vergrößerung eines Gerätes (Schiff) Abmessungen und Masse (Kräfte) nicht im gleichen Maße ansteigen. Er hielt dies mit dem Satz fest: „Deshalb habe ich nun eingesehen, dass in diesen und anderen ähnlichen Fällen man nicht ohne weiteres vom kleinen Maßstab auf den großen schließen dürfe; manche Maschine gelingt im kleinen, die im großen nicht bestehen könnte“! Die Landmaschinenforschung hat diese Gesetzmäßigkeit zu Beginn der Mechanisierung aufgegriffen und an Hand von eingesetzten Maschinen systematisch erforscht. Nach einer Modellbetrachtung ähnlicher Traktoren steigt laut Söhne (1964) das Gewicht vergleichbarer Körper proportional der dritten Potenz an, ihr Grundriss proportional der zweiten Potenz ihrer Länge. Dementsprechend steigt mit zunehmender Traktorengröße das Gewicht stärker an als die vertikale Projektionsfläche, selbst wenn die Traktoren identisch sind. Dies bedeutet: mit zunehmendem Traktorengewicht nimmt die Verhältniszahl aus Gewicht dividiert durch die vertikale Projektionsfläche zu. Dementsprechend würde der spezifische Flächendruck in der Berührungsfläche zwischen Reifen und Boden zunehmen, wenn die Reifen ähnlich vergrößert würden. Mit Rücksicht auf Bodenverdichtung und Kraftübertragung sollte der Druck in der Berührungsfläche gleich bleiben. Besser noch, bei größeren Traktoren sollte er kleiner werden. Diese von Söhne (1964) bestätigte Gesetzmäßigkeit bei Hinterradtraktoren kann ebenso auf die selbstfahrenden Erntemaschinen, wie z. B. die seit langem auf dem Markt befindlichen Mähdrescher, angewendet werden. In Tab. 17 ist der oben angeführte Zusammenhang an Hand zweier Mähdrescher Generationen dargestellt. In den zurückliegenden 40 Jahren haben sich Schnittbreite, Länge und Höhe verdoppelt. Volumen, Gewicht und Motorleistung aber um den Faktor 8 (2³) erhöht. Durch Anpassung der Bereifung ist der mittlere rechnerische Kontaktflächendruck gleich geblieben.

³ Galileo, Galilei: Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetzte betreffend („Discorsi“). Erstdruck 1638, deutsche herausgegeben von A. von Oettingen. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1964 [45].

Tab. 17: Gegenüberstellung der technischen Daten eines Mähdreschers von 1964 und 2004

Technische Daten	Claas Columbus 1964	Claas Lexion 570, 2004	Faktor
Motorleistung	25 kW	272 kW	8
Maschinenvolumen	31 m ³	243 m ³	8
Gesamtgewicht	31 kN	240 kN	8
Bereifung vorn Bereifung hinten (Durchmesser x Breite)	1,02 m x 0,22 m 0,70 m x 0,15 m	1,84 m x 0,68 m 1,25 m x 0,50 m	
Reifenaufstandsfläche (berechnet*)	2.200 cm ²	16.600 cm ²	8
rechnerischer Kontaktflächendruck	1,4 kg/cm ²	1,4 kg/cm ²	

(* nach Diserens, 2002)

Eine lineare Erhöhung der Radlast und der Kontaktfläche führen nach Söhne (1953) trotz des gleich bleibenden Kontaktflächendrucks zu einer größeren Tiefenwirkung (Abb. 34). Dies beruht auf der Tatsache, dass mehr Bodenvolumen zur Abstützung der größeren Kontaktfläche beansprucht wird. Diese Druckkonzentration wurde von Zelenin (1950) an Hand eines Modells verdeutlicht. Horn und Lebert (1989) wiesen dies bei Messungen unter verschiedenen Traktorreifen nach. Von der LfL Sachsen (2005) wurde dieser Effekt bei Boden-druckmessungen im Feld nachgewiesen.

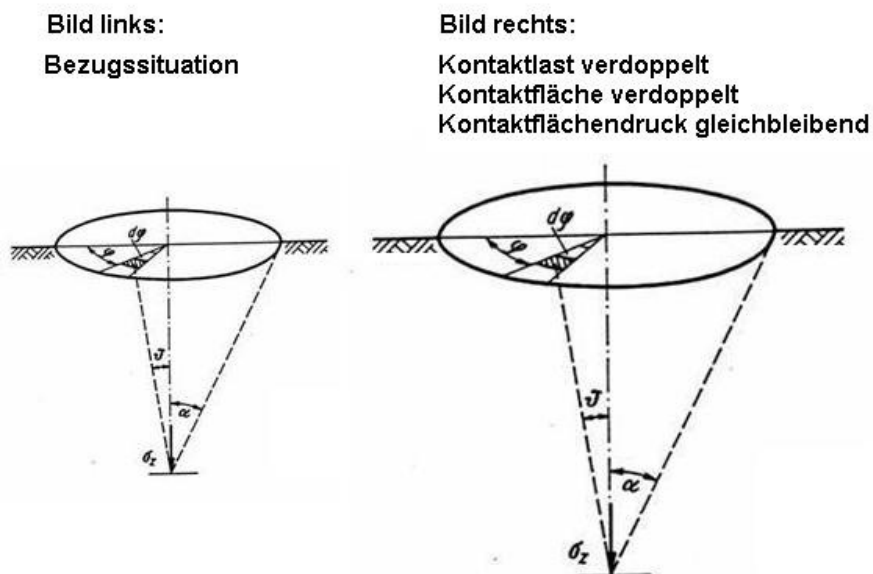


Abb. 34: Zusammenhang höherer Radlast und vergrößerter Aufstandsfläche mit der erhöhten Tiefenwirkung bei gleich bleibendem Kontaktflächendruck (Söhne, 1953)

⁴ DISERENS, E. (2002): Ermittlung der Reifen-Kontaktfläche im Feld mittels Rechenmodell. Bericht der Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwissenschaft und Landtechnik (FAT), Nr. 613, Schweiz, S. 16 [35].

Eine Vergrößerung der Reifendimension zieht eine Erhöhung des Luftvolumens nach sich, wobei die Tragfähigkeit des Reifens bei verringertem Reifeninnendruck gleich bleibt. Wird bei gleich bleibender Radlast die Kontaktfläche vergrößert, so verringert sich der rechnerische Kontaktflächendruck und der Bodendruck gleichermaßen (Steinkamp und Sommer, 1989).

Horn (2001) resümiert zu seinen Ergebnissen aus Untersuchungen bei gleich bleibendem Druck im Übergangsbereich Reifen/Boden mit proportional steigender Kontaktfläche zu Maschinenmasse, dass der Druck tiefer in den Boden fortgepflanzt wird. Somit bedingt die in den letzten Jahrzehnten enorm gestiegene Maschinenmasse, trotz der ebenfalls vergrößerten Reifenauflandfläche, eine tiefer reichende Druckfortpflanzung und somit eine Beeinträchtigung der Bodenfunktionen, falls der Boden nicht über eine entsprechende Eigenfestigkeit bei günstiger Porenfunktion verfügt.

Der Einsatz von Standardreifen als „Zwillingsreifen“ (z. B. bei der Saat) erlaubt bei der Beibehaltung des Maschinengewichtes eine Reduzierung des Reifeninnendruckes. Weißbach (2004) hat bei Bodendruckmessungen auf lockerem Boden und verschiedenen Traktorhinterreifen mit identischer Radlast von 30 kN festgestellt, dass die Zwillingsbereifung mit 2 x 550 mm Reifenbreite gegenüber der einfach Standardbereifungen mit 550 bis 800 mm Reifenbreite, den geringsten Bodendruck in allen vier verschiedenen Messtiefen verursachte. Der Single-Reifen mit 800 mm Reifenbreite verursachte weniger Druck als der 550 mm breite Reifen. Auf Grund neuer technischer Lösungen bei höheren Gesamtmassen gilt es vergleichend zu untersuchen, wie eine definierte Last am bodenschonensten mit verschiedenen Fahrwerken über das Feld bewegt werden kann. Dabei soll aufgezeigt werden, wie sich diese Fahrwerke auf den Boden auswirken und wie die Eigenschaften der Fahrwerke zu beurteilen sind. Zur Wirkungseinordnung der untersuchten Fahrwerke auf den Boden, wurden die Messungen im Ober- und Unterboden durchgeführt. Dabei sollen folgende Faktoren quantifiziert werden, die unter anderem nach Becher (1978), Feldhaus und Kröger (1984) sowie Horn (1986) beschrieben wurden:

- Dynamischer Druck im Boden
- Porenvolumen
- Lagerungsdichte (Trockenrohdichte)
- Eindringwiderstand
- Spurtiefe

Unter Berücksichtigung der oben genannten Parameter gilt es festzustellen, wie sich hohe Maschinengewichte unter verschiedenen Überrollungssituationen, gekennzeichnet durch Rad- und Bandlaufwerke bei annähernd gleichem mittleren Kontaktflächendruck, auf die Bodenstruktur im Ober- und Unterboden auswirken. Ferner soll geklärt werden, mit welchem

Fahrwerkskonzept hohe Gewichte mit geringem Risiko über den Acker bewegt werden können.

Die zusätzliche Erarbeitung eines Bewertungsmodells aus den Daten der dynamischen Druckmessung soll eine Vergleichbarkeit verschiedener Fahrwerke bei gleichem Kontaktflächendruck und nahezu identischer Gesamtlast schaffen. Neben der Höhe des mittleren gemessenen Bodendruckes soll ebenso die Zeitdauer des einwirkenden Bodendruckes in die Bewertung einfließen. In Abb. 35 sind die Zusammenhänge mittels Flussdiagramm zusammengefasst dargestellt.

Hypothese: „Bei vergleichbarem Kontaktflächendruck und gleicher Gesamtlast beansprucht ein modernes Gummibandlaufwerk den Boden weniger als bei einer Mehrfachüberrollung mit Radial-Niederdruckbreitreifen.“

Zur Verifizierung dieser Hypothese sollen bisher in der Literatur nicht beschriebene Wirkungszusammenhänge beim Einsatz von modernen Gummibandlaufwerken und Radial-Niederdruckbreitreifen untersucht werden. Diese Hypothese wurde aus den Ergebnissen und Erfahrungen eines mehrjährigen Feldversuches zur Wirkung verschiedener Fahrwerke mit hohen Lasten bei der Zuckerrübenernte auf die Struktur im Unterboden abgeleitet (Geischer et al., 2007). Es wurde ein streng systematischer Feldversuch mit geeigneten Methoden zur Messung der aufgeführten Faktoren durchgeführt.

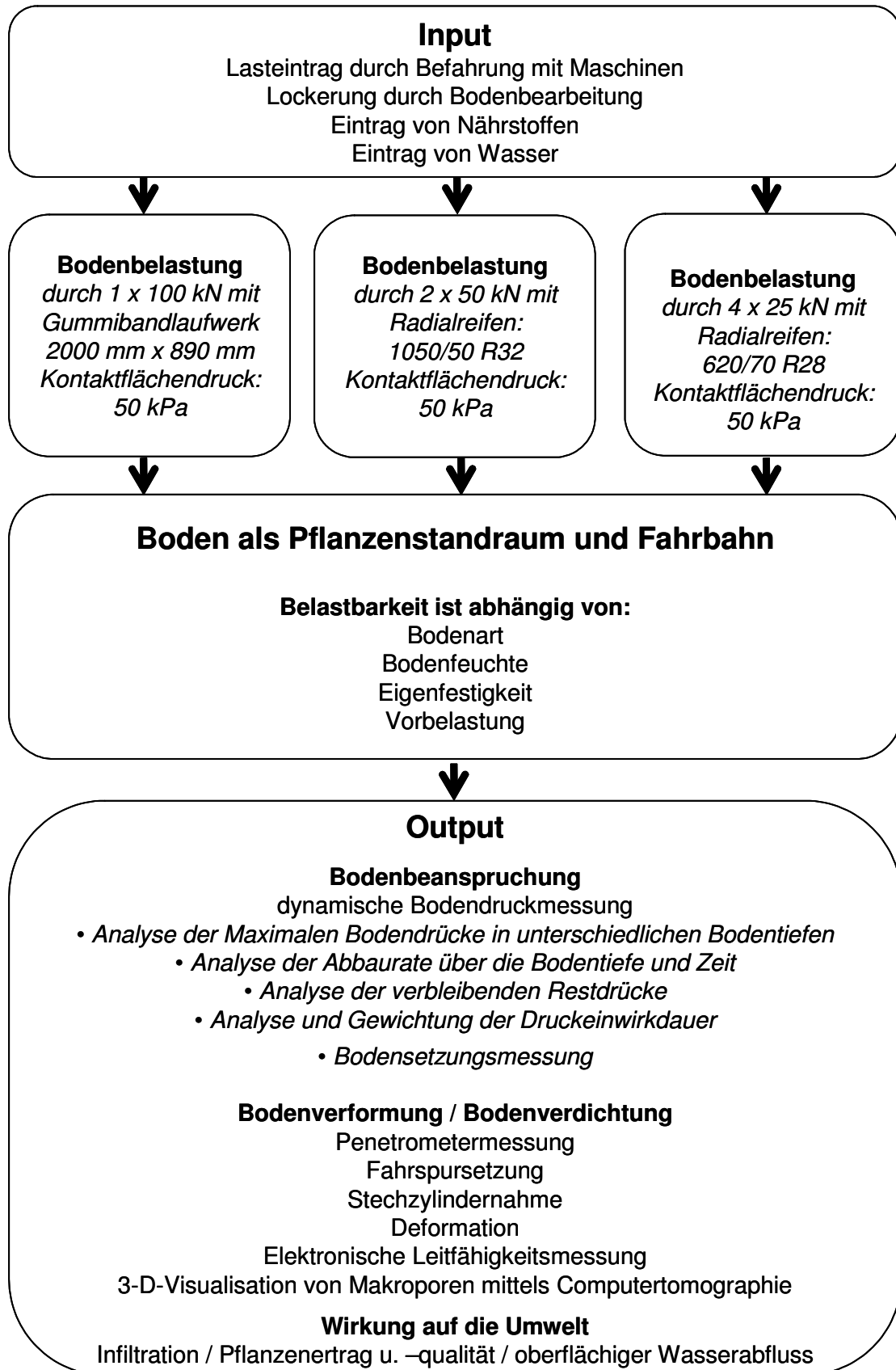


Abb. 35: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Bodennutzung und der messbaren Auswirkungen. Die kursiv dargestellten Bereiche, stellen die Besonderheit und den Schwerpunkt des Versuchansatzes dar

5 Material und Methoden

Um die Einflüsse sowie die Auswirkungen von Überrollungen des Ackerbodens mit unterschiedlichen Fahrwerkskonfigurationen zu untersuchen, wurden eine Reihe von Messmethoden und Messtechniken eingesetzt, wobei der Boden im Vordergrund stand. Des Weiteren galt es festzustellen, inwieweit sich der erfasste dynamische Druck auf die Bodenmatrix tatsächlich auswirkt, indem die dafür entscheidenden bodenphysikalischen Parameter wie Trockenrohdichte, Porenvolumen, Luftkapazität usw. erfasst wurden. Nachfolgend werden die eingesetzten Messmethoden und –techniken näher erläutert. Ausgangspunkt für die intensive Betrachtung der dynamischen Druckausbreitung im Boden, bei annähernd gleichen Kontaktflächendrücken und unter verschiedenen Fahrwerkskonfigurationen, war eine dreijährige Feldstudie in der vier unterschiedliche Fahrwerkskonzepte von KRB6 hinsichtlich der Auswirkungen der Rad-/Bandlasten auf den Unterboden untersucht wurden (Geischeder et al., 2007). Dabei gab die Messung des dynamischen Druckes in den trockenen Erntejahren 2005 und 2006 keinen Aufschluss über die Druckausbreitung, da in der Tiefe von 45 cm keine Druckspitzen mit den Schlauchdrucksonden gemessen werden konnten und in den darüber liegenden Tiefen keine Messungen vorgenommen wurden.

Die Zusammenhänge zwischen Gesamtlasten unterschiedlicher Fahrwerke sowie die Auswirkungen der mehrfachen Überrollung bei annähernd gleichem Kontaktflächendruck sollte systematisch analysiert und in dem nachfolgend beschriebenen speziellen Versuchsansatz untersucht werden. Diese spezielle Untersuchung könnte in einer Bodenrinne unter gleich bleibenden und kontrollierbaren Bedingungen (Bodenart, Bodenfeuchte usw.) systematisch durchgeführt werden. Da eine solche Laboranlage für die vorgesehenen Lasten und Reifengrößen weder an der Technischen Universität München noch an einer anderen Forschungseinrichtung in Deutschland zur Verfügung stand, wurde ein Feldversuch durchgeführt. Dieser wurde in einer randomisierten Blockanlage mit sechsfacher Wiederholung aller Versuchsglieder angelegt. Die Messergebnisse haben für vergleichbare Standorte und Bedingungen eine hohe Aussagekraft. Zur Prüfung der Hypothese wurden fünf Überrollungsvarianten definiert: eine Einfachüberrollung mit einem modernen Bandlaufwerk, eine zweimalige Überrollung mit einem großvolumigen Radialreifen und eine vierfache Überrollung mit einem Standardtraktor-Radialreifen (Tab. 18).

Tab. 18: Versuchsansatz der Fahrwerkskonfigurationen

Überrollungs-situation	Bereifung/ Fahrwerk	Anzahl der Überrollungen	Radlast/ Bandlast [kN]	theoretischer mittlerer Kontakt- flächendruck [kPa]
1. 1-fach Band	890 x 2000 mm	1	100	0,5
2. 1-fach Rad	1050/50 R32	1	50	0,5
3. 2-fach Rad	1050/50 R32	2	2 x 50	0,5
4. 1-fach Rad	620/70 R25	1	25	0,5
5. 4-fach Rad	620/70 R25	4	4 x 25	0,5

Zusätzlich zu der entsprechenden mehrfachen Radüberrollung wurde jeweils die einfache Überrollung des Reifens mit untersucht. Die Variation der Fahrwerksparameter wurde vorab auf Modellebene mit dem Programm TASC 1.0 nach Diserens (2004) getestet. Die gewählten Band-/Radlasten ermöglichten nach Herstellerangaben der ausgewählten Radialreifen einen nahezu identischen Reifeninnendruck einzustellen. Gleichzeitig sollten die Kontaktflächendrücke aller drei Fahrwerksvarianten identisch sein. Im Frühjahr 2006 wurde der randomisierte Feldversuch mit sechs Wiederholungen je Überrollungsstufe geplant (Abb. 36).

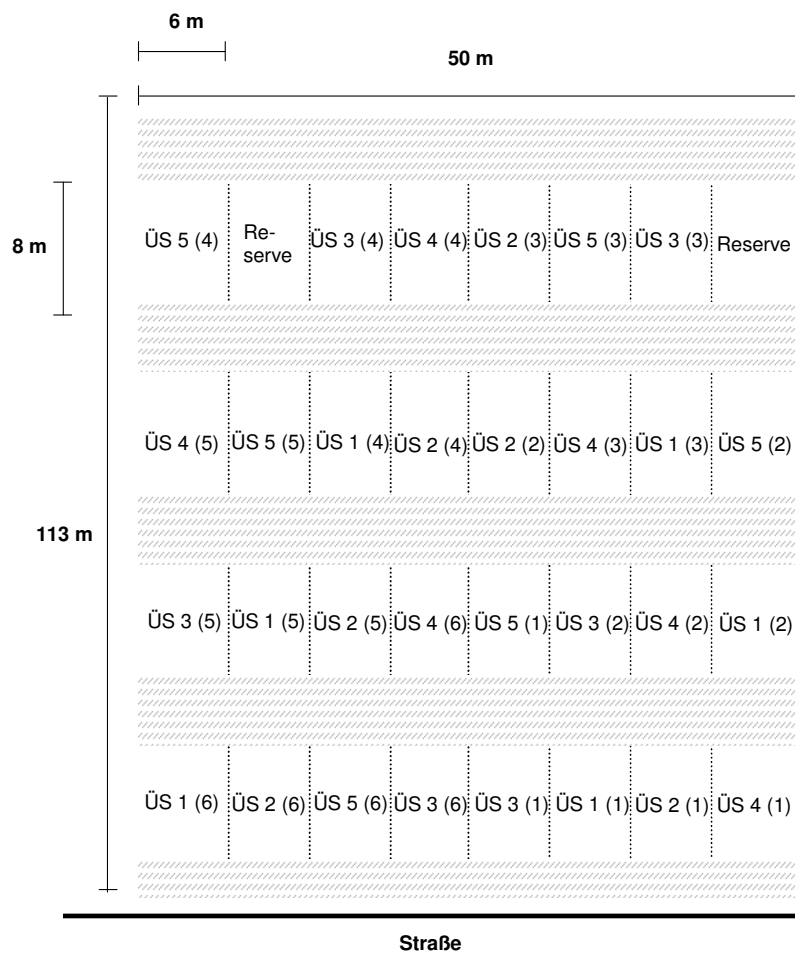


Abb. 36: Randomisierter Feldversuch; 5 Überrollungssituationen (ÜS) mit je sechs Feldwiederholungen

Dazu wurde eine geeignete Fläche ausgewählt, bei der die nachfolgenden Kriterien erfüllt sein mussten:

- Geeignete Flächengröße und Form zur Unterbringung der Blockanlage
- Möglichst homogene Bodenschichten im Beprobungs- /Messhorizont
- Weitgehend frei von Schadverdichtungsgrenzwerte (vgl. Kapitel 3.1.1.3)
- Weitestgehend steinfrei bis in eine Tiefe von 50 cm
- Typischer Standort auf dem Zuckerrüben und Getreide bestellt werden
- Klassische Fruchtfolge aus Hack- und Halmfrucht in den zurückliegenden Jahren (KA – WW – ZR)

Diese Kriterien mussten vorab berücksichtigt werden, um einen aussagekräftigen Systemversuch im Feld durchführen zu können.

5.1 Standortbeschreibung

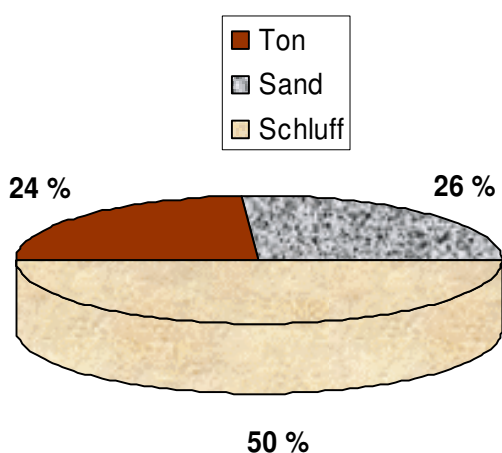
Die ausgewählte Versuchsfläche befand sich am Ortsrand von Neuburg a. d. Donau, Ortsteil Feldkirchen, nordöstlich von Augsburg und westlich von Ingolstadt (Abb. 37). Die Versuchsfläche stellte der Betrieb Lösch in Feldkirchen zur Verfügung. Die ca. 6.200 m² große Fläche bot Platz für die insgesamt 32 Überrollungspartellen (inklusive zweier Reservepartellen), die darauf gleichmäßig verteilt werden konnten. Die Fläche lag in einer Wohnbausiedlung und war bis Herbst 2005 regulär in landwirtschaftlicher Nutzung. Auf Grund der eingeeengten Lage wurde die Fläche im Frühjahr 2006 stillgelegt. Im Jahr zuvor waren auf der Fläche Kartoffeln angebaut worden. Nach der Ernte im Herbst 2005 wurde der Acker ganzflächig bis in einer Tiefe von 20 cm mit einem Flügelschargrubber bearbeitet. Bei der Auswahl der Fläche wurde eine punktuelle Beprobung des Ausgangszustandes auf Lagerungsdichte, Mächtigkeit der Lössauflage, Homogenität und Bodenzusammensetzung durchgeführt. Des Weiteren wurden Bodenproben für eine Bodenartbestimmung entnommen.



Abb. 37: Lage der Versuchsfläche in Neuburg an der Donau Ortsteil Feldkirchen (Google Earth, 2007)

Die Versuchsfläche befindet sich, geologisch betrachtet, auf einer Hochterrasse der Donau, welche mit Löss überdeckt wurde. Bodentyp ist eine Parabraunerde aus Löss. In der Ackerkrume besteht der Boden aus sandigem Lehm (sL). Der Humusanteil beträgt 2 %, der pH-Wert im Bearbeitungshorizont lag bei 7,2. Die Bodenzusammensetzung für die beiden Beprobungstiefen ist in Abb. 38 dargestellt.

Bodenhorizont 0 – 20 [cm]



Bodenhorizont 20 – 45 [cm]

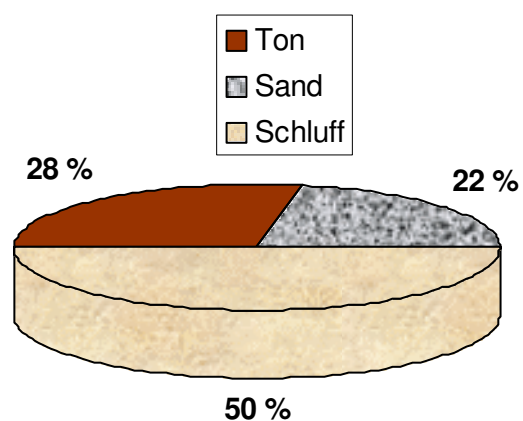


Abb. 38: Korngrößenverteilung im Oberboden (Bearbeitungshorizont) (links) und im Unterboden (rechts)

Die Niederschläge betragen zwischen 650 bis 750 mm pro Jahr, die durchschnittliche Jahrestemperatur liegt bei 8°C. Der Boden war unbewachsen und abgesetzt. Die Bodenfeuchte

in 0 – 30 cm Tiefe betrug zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung 32 Vol.-%. In Tab. 19 sind die Fruchtfolge und die Bodenbearbeitung der vorausgegangen drei Jahre dargestellt. Nach dem Kartoffelanbau in 2005 war der Boden tief gelockert. Das Feld wurde für 2006 stillgelegt. Die Bearbeitung erfolgte flacher und weniger intensiv mit einem Grubber.

Tab. 19: Aufstellung der Fruchtfolge und der Grundbodenbearbeitung von 2003 – 2005

Schlag – Jahr	2005	2004	2003
Frucht	Kartoffeln	Winterweizen	Gelbsenf
Bodenbearbeitung	Grubber	Pflug	Pflug
Bearbeitungstiefe [cm]	15 – 20	25 – 30	25 - 30

5.2 Eingesetzte Fahrwerkstechnik

Zur Durchführung der Untersuchung wurden drei Praxismaschinen ausgewählt, die es ermöglichten die entsprechenden Belastungsvarianten zu erzeugen. Aus den Leerverwiegungen der KRB6 im dreijährigen Feldversuch (Geischer et al., 2007) waren die Band- bzw. Radlasten der Maschinen bekannt (Tab. 20), die für das Anlegen der Überrollungssituationen ausgewählt wurden.

Tab. 20: Rad- und Bandlasten (Leergewicht mit ausgehobenem Rodeaggregat und Schmutz) der ausgewählten KRB6 während des Feldversuchs in Haardorf, Niederbayern (Geischer et al., 2007)

KRB6 Fahrwerk	Last pro Rad/ Raupe	Durchschnittliche Last pro Rad / Raupe
Hinterachse (rechtes Rad) 02.11.2004 27.10.2005 17.10.2006	7.035 kg 6.440 kg 6.485 kg	6.653 kg
Bandlaufwerk (rechts) 02.11.2004 27.10.2005 17.10.2006	11.340 kg 12.575 kg 12.270 kg	12.061 kg

Für die einfache Überrollung mit einem Bandlaufwerk (Ziel 100 kN Last) wurde der KRB6 ausgewählt, der auf der Vorderachse mit zwei stark gespannten kraftschlüssigen Bandlaufwerken ausgestattet war. Die Hinterachse war mit einer Drehschemellenkung und einem Zwillingrad, bestehend aus zwei 900/70 R32 Rädern, versehen. Durch diese Konfiguration konnte eine nur durch das Bandlaufwerk überrollte Spur erreicht werden (Abb. 39). Mit ausgehobenem Rodeaggregat und leerem Bunker wurde die angestrebte Last in etwa erreicht.

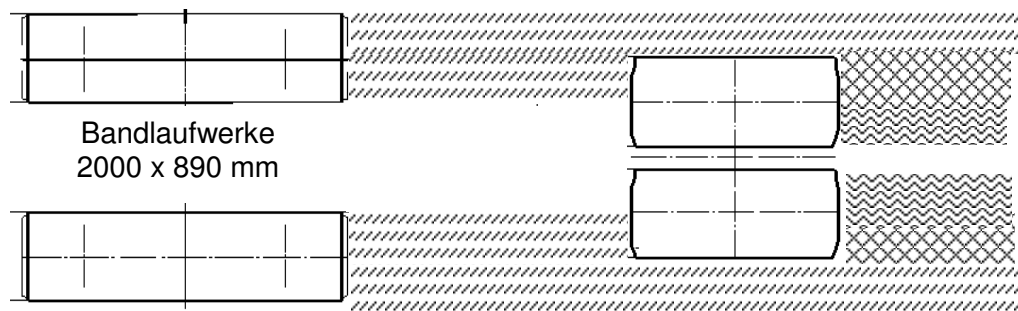


Abb. 39: Erzeugte Fahrspuren durch den KRB6 mit dem Bandlaufwerk auf der Vorderachse und dem Zwillingensrad auf der Hinterachse (verändert nach Fa. Grimme, 2004)

Für die ein- und zweifache Überrollung durch das große Rad (1050/50 R32) mit je 50 kN wurde ein zweiachsiger KRB6 mit der Möglichkeit zum spurversetzten Fahren ausgewählt. Im so genannten Hundegang wurde nur eine Überrollung mit dem linken Hinterrad erzeugt (Abb. 40). Zur zweifachen Überrollung wurde das Fahrzeug unmittelbar in derselben Spur zurückgesetzt.

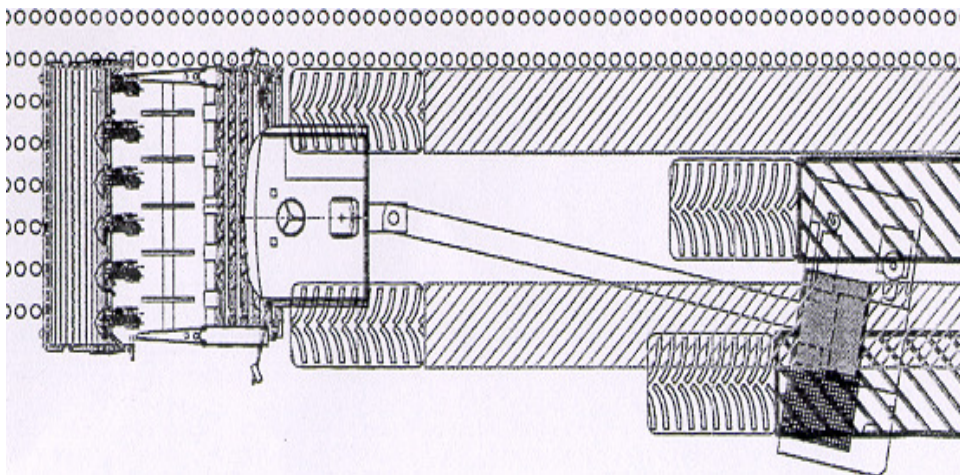


Abb. 40: Zweiachsiger KRB6 bei spurversetzter Fahrt (Fa. Holmer, 2004)

Für die einfache und vierfache Überrollung wurde ein Systemtraktor gewählt, der ebenfalls über die Möglichkeit des spurversetzten Fahrens verfügte (Abb. 41). Dieser Traktor war mit vier gleich großen Radialreifen der Dimension 540/65 R28 ausgestattet. Um die Lastvorgabe von 25 kN je Rad auf der Vorder- und Hinterachse zu erreichen, wurden verschiedene Variationen von Anbaugeräten in der Front- und Heckhydraulik getestet. Schließlich wurde der Traktor mit einem Vierscharvoll Drehpflug im Heck und mit einer Kreiselegge und Zusatzgewichten in der Front ausgerüstet. Auf den Parzellen mit der einfachen Überrollung wurde die so genannte Hundegangfahrt gewählt, bei der die Hinterachse des Traktors seitlich versetzt neben der Spur der Vorderachse läuft und nur eine einfach überrollte Spur angelegt wird. Für

die vierfache Überrollung wurde der Normalfahrtmodus gewählt, in dem Vorder- und Hinterachse Spur in Spur fahren. Durch das Zurücksetzen im Modus Spur in Spur wurde die dritte und vierte Überrollung mit den beiden Reifen erzeugt.

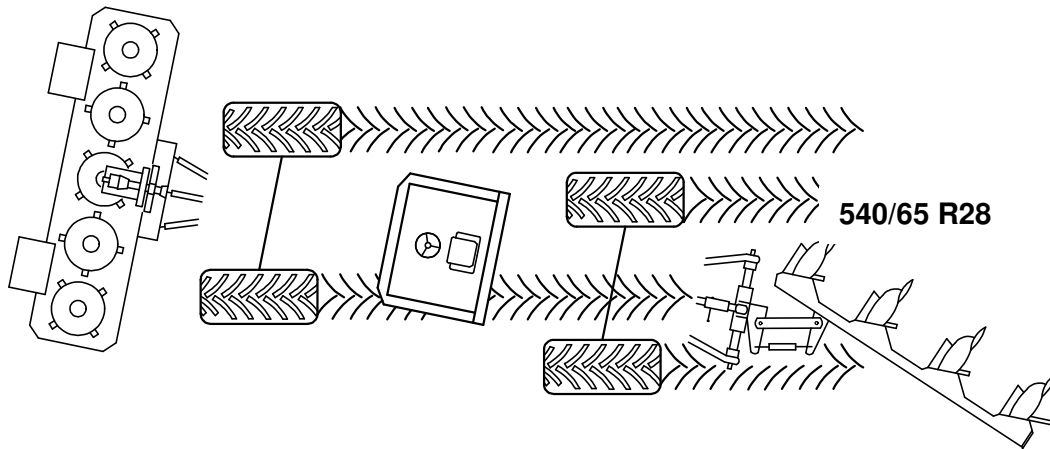


Abb. 41: Ballastierter Mittelsitztraktor JCB Fastrac 2115 4WS beim Anlegen der einfach überrollten Spur durch die „Hundegangfahrt“

5.3 Fahrzeugparameter

Um die tatsächlichen Lasten der Fahrwerke zum Zeitpunkt der Überfahrt zu ermitteln, wurden alle Maschinen Achs- und Radweise auf einer geeichten Fuhrwerkswaage verwogen. Die Reifeninnendrucke wurden laut Reifenherstellerangaben für die Fahrt im Feld bis maximal 10 km/h unter Berücksichtigung der tatsächlichen Radlast eingestellt. Zur Fahrwerksaufstandsflächenmessung wurden die jeweiligen Räder und das Bandlaufwerk im Feld mit Hydratkalk umstreut. Zur späteren digitalen Aufstandsflächenvermessung wurden die abgestreuten Umrisse mit einer Digitalkamera und einem Maßstab fotografiert. Die Überfahrt erfolgte mit angehobenem Rodeaggregat/Anbaugeräten und einer Vorfahrtsgeschwindigkeit von 5 km/h, was 1,4 m/s entspricht.

5.4 Messprogramm auf den Parzellen

Die Versuchsfläche wurde in gleich große Parzellen unterteilt. Auf diesen wurde wie in Abb. 42 skizziert, die Messungen durchgeführt.

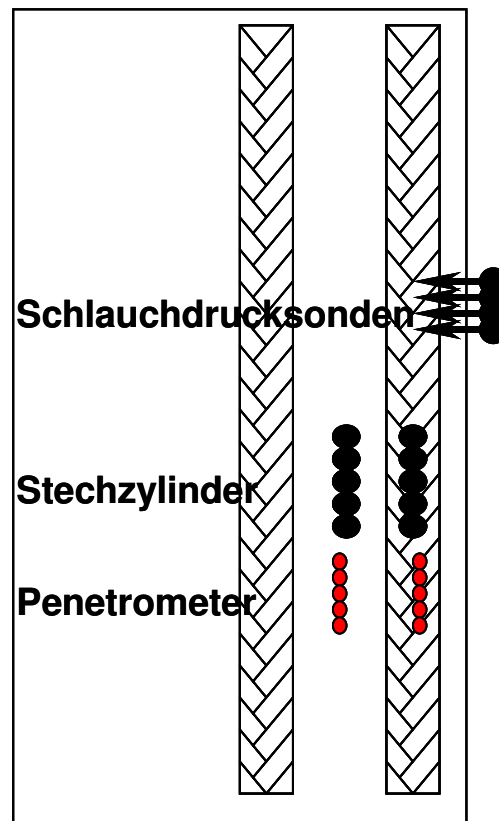


Abb. 42: Messprogramm in den Befahrungspartzen innerhalb und neben der befahrenen Spur

Die Messverfahren sind in den nachfolgenden Punkten beschrieben.

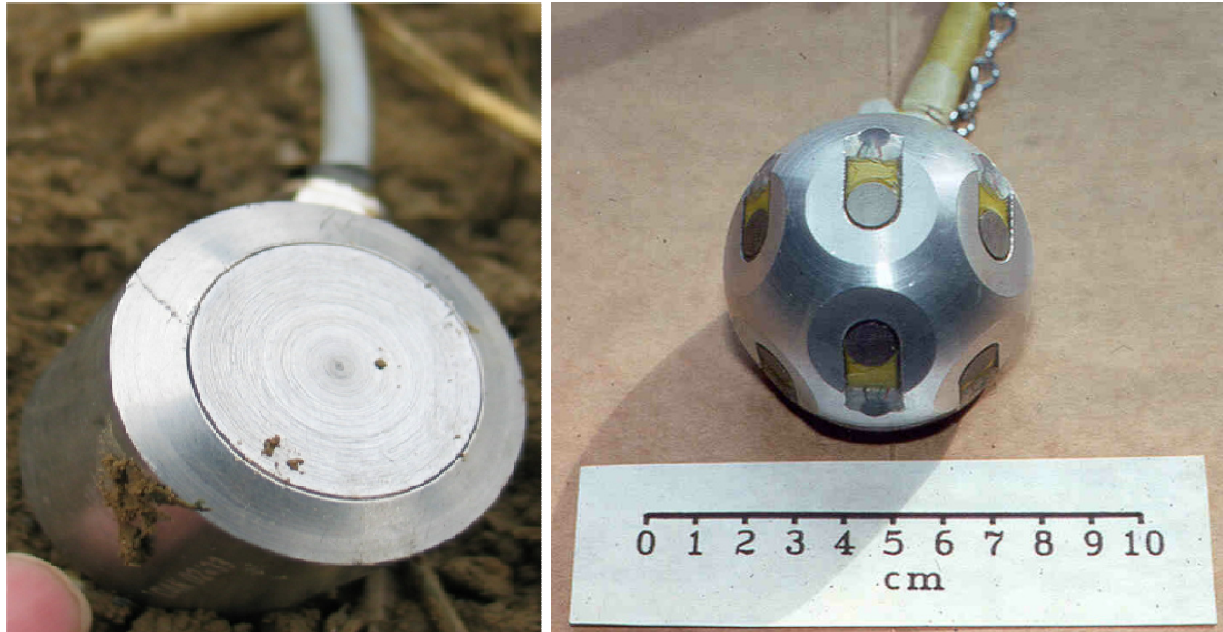
5.4.1 Dynamischer Druck – Messsysteme

Das Befahren des Ackerbodens mit landwirtschaftlichen Maschinen verursacht Druckspannungen im Boden, resultierend aus der einwirkenden Gewichtskraft und der Aufstandsfläche des jeweiligen Fahrwerks. Die Verteilung des dynamischen Drucks über die Tiefe bietet sich als Beurteilungskriterium für unterschiedliche Fahrwerkskonfigurationen an. In der Literatur werden hierfür verschiedene Druckaufnahmesysteme beschrieben (Bolling, 1986). Die hierfür in der Wissenschaft häufig eingesetzten Systeme bestehen aus hydraulisch wirkenden Sensoren oder Dehnungsmessstreifen-Sensoren (DMS-Sensoren).

5.4.1.1 Dehnungsmessstreifen-Sensoren

Die einfachen DMS-Druckmessdosen arbeiten mit Dehnungsmessstreifen, die auf Metallmembranen aufgetragen sind und den Druck eindimensional (vertikal) erfassen. Als starre Sensoren können Sie sich während der Befahrung nicht an die Bodendynamik anpassen. Der Aufbau dieser Sensoren wurde im Laufe der Zeit weiterentwickelt und verfeinert (Lebert und Horn, 1991; Semmel, 1993; Kühner, 1997; LfL Sachsen, 2005). Der „Stress State Transducer“ (SST) nach Nichols et al. (1987) wurde von Horn et al. (1993) als modifizierte

Version eingesetzt. Dabei beinhaltet dieses Messsystem sechs Messzellen, die eine räumliche Druckausbreitung im Boden erfassen und die einwirkenden Bodenspannungen entsprechend der Richtung zuordnen und bestimmen können. In Abb. 43 sind der DMS-Sensor und der SST-Sensor dargestellt.



USDA National Soil Dynamics Laboratory, 2007

Abb. 43: Links: DMS-Messdose nach Cooper (1957) zur vertikalen Druckerfassung (eindimensional). Rechts: ein so genannter Stress State Transducer (SST), der vom USDA National Soil Dynamics Laboratory Auburn Alabama selbst hergestellt wurde. Dieser kann die Drücke aus sechs verschiedenen Richtungen erfassen

Grundsätzlich ist der Einbau und die Positionierung dieser Art der Sensoren mit einem hohen Arbeitsaufwand (Personal und Zeit) verbunden, da eine Grube seitlich der Messstelle ausgehoben werden muss, um diese Sensoren horizontal in der jeweiligen Messtiefe zu platzieren (Abb. 44).

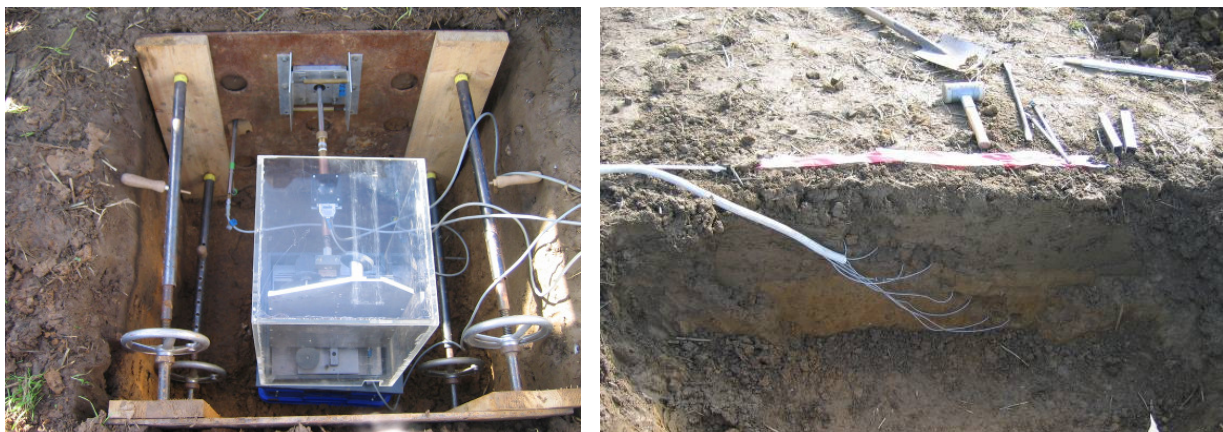


Abb. 44: Einbau des SST-Sensors (links) und des DMS-Sensors (rechts). In beiden Fällen muss der Sensor durch eine Grube seitlich der Messstelle installiert werden

Vorrangig werden SST-Sensoren in der Grundlagenforschung eingesetzt. Es ist zu beachten, dass bei dem Einbau das natürliche Bodengefüge gestört wird, was generell zu einem höheren Druckniveau bei dieser Art der Messung führt (Sammel et al., 1993). Söhne (1953) stellte fest, dass DMS-Druckaufnehmer in der Regel härter sind als der sie umgebende Boden und sie somit größere Spannungswerte als im Boden wirkend anzeigen.

5.4.1.2 Hydraulische Messsysteme

Bei hydraulischen Messsystemen wird ein mit einer Flüssigkeit befülltes Rohr mit etwa 12 mm Durchmesser, dessen Spitze aus einem weichwandigen Material (typischerweise Silikon) besteht, auf die gewünschte Messtiefe durch vorheriges Bohren bzw. Schlagen eines Kanals platziert. Der Kanaldurchmesser wird etwas größer (ca. 2 mm) als der Sonden­durchmesser gewählt, um ein sauberes und für den Sensor verletzungs­freies Einführen zu ermöglichen. Um den Bodenkontakt für die Messungen zu gewährleisten ist ein Vordruck notwendig. Am Ende des Rohres ist ein elektrischer Messaufnehmer oder ein Manometer mit Schleppzeiger montiert, welcher die aufgenommenen Drücke aufnehmen bzw. anzeigen kann. Die hydraulischen Systeme müssen aus Gründen der Messgenauigkeit absolut luftfrei sein. Die so genannten Schlauchdrucksonden zeichnen sich durch eine gute Wiederholbarkeit der Messungen innerhalb von kurzer Zeit bei vergleichsweise geringem Aufwand auf leicht verformbaren und steinfreien Böden aus. Die erfassten Messwerte stellen die Summe aller im Umfeld auftretenden Spannungen dar und sind somit Mittelwerte einer nicht näher definierbaren Beanspruchung unterschiedlicher Richtung. Messwerte, die unterhalb des Vordruckes liegen, können nicht erfasst werden. Zudem ist eine stärkere Bodenbewegung notwendig, die unter trockenen/harten Bodenbedingungen, geringen Lasten und größerer Tiefe häufig nicht mehr gegeben ist. Somit wird in diesem Falle der eingestellte Vordruck aufgezeichnet. Das System stößt hierbei an seine messtechnischen Grenzen.

5.4.2 Wahl der Schlauchdrucksonde

Der ausgewählte Standort bot im Frühjahr 2006, zum Zeitpunkt der Messung ideale Voraussetzungen zum Einsatz von Schlauchdrucksonden. Der Boden war bis zu der vorgesehenen Messtiefe von 50 cm frei von größeren und kantigen Steinen, die das Platzieren der Sonden durch Beschädigung usw. behindert hätten können. Durch die Bodenfeuchte von durchschnittlich 32 Vol.-% war das Einbringen der Schlauchdrucksonden gut zu bewerkstelligen. Da das Feld seit Herbst 2005 ohne Bewuchs brach lag, störten außerdem keine Pflanzen- und Wurzelreste, die das Platzieren der Schlauchdrucksonden behindert hätten.

Bei den Versuchen standen die Messungen des dynamischen Druckverlaufes über die Tiefe im Vordergrund, insbesondere der Druckabbau über die Tiefe unter den verschiedenen Belastungsvarianten, bei annähernd gleichem Kontaktflächendruck. Für eine bestmögliche sta-

tistische Analyse wurde auf der Fläche ein randomisierter Feldversuch angelegt, der eine sechsfache Wiederholung für jede Belastungsvariante vorsah. Aus diesem Grund mussten folgende Ansprüche an das Messverfahren gestellt werden:

1. große Anzahl von Einzelmessungen pro Tag,
2. möglichst geringer Arbeits- und Zeitbedarf,
3. einfache und sichere Handhabung,
4. die vorliegende Bodenstruktur sollte möglichst erhalten bleiben,
5. Wiederholbarkeit.

All diese Anforderungen und Voraussetzungen sprachen für den Einsatz der vom Institut für Landtechnik und Tierhaltung (ILT) verbesserten Schlauchdrucksonde nach Bolling (1987).

5.4.3 Dynamische Druckmessung

Die von Bolling (1987) entwickelten Schlauchdrucksonden (plastisch verformbarer Sensor) zur Erfassung dynamischer Drücke waren ursprünglich konzipiert für Messungen in der sog. Bodenrinne. Die Messmethode und -technik erfüllte die oben aufgeführten Anforderungen zur Messung der dynamischen Drücke. Die Technik musste zuvor für den Feldeinsatz im Herbst 2004 modifiziert und neu aufgebaut werden. Des Weiteren wurden 2005 neue Drucksensoren beschafft, um die Einsatzbereitschaft auf Dauer sicher zu stellen. Der Aufbau der Sonde ist in Abb. 45 dargestellt.

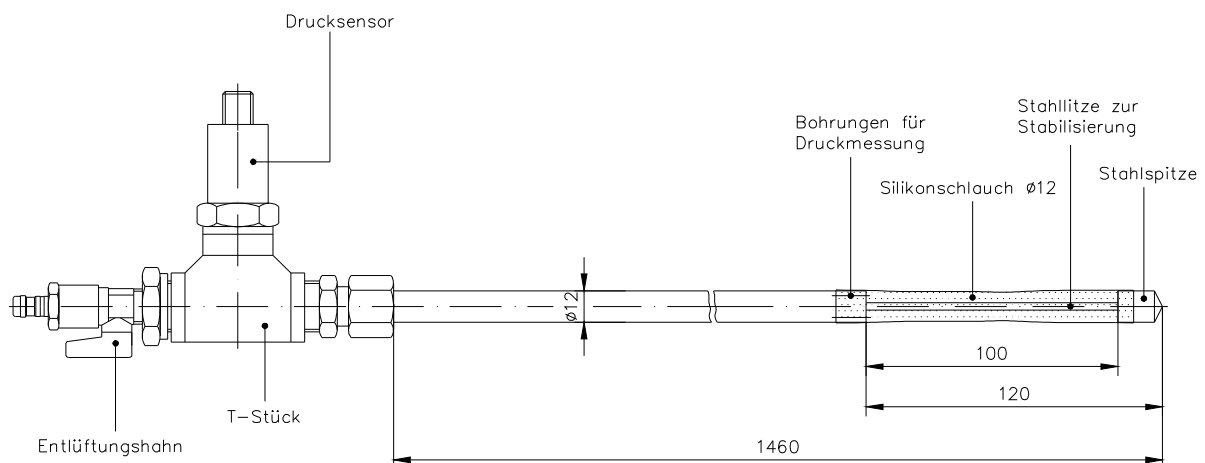


Abb. 45: Schlauchdrucksonde des Instituts für Landtechnik und Tierhaltung

Als „Druckaufnehmer“ dient ein 100 mm langer Silikonschlauch mit einer Wandstärke von einem mm, der an einem Edelstahlrohr mit einem Durchmesser von 12 mm mittels einer Wicklung eines rutschfesten Industriefadens befestigt ist. An dem Edelstahlrohr ist ein zehn mm breiter und ein mm tiefer Bund abgenommen, so dass der befestigte Silikonschlauch und das Edelstahlrohr eine ebene Oberfläche bilden, wodurch ein unbeabsichtigtes Abzie-

hen des Silikonschlauches beim Herausnehmen der Sonden nach der Messung möglichst verhindert werden soll. Als Sondenspitze dient ein Metallkonus, der in einem Abstand von 100 mm zum Sondenrohr durch eine Stahlritze fixiert ist. Diese gibt der Sondenspitze die nötige Flexibilität und Stabilität zum sicheren Einführen der Sonde in das vorbereitete Loch. Der Silikonschlauch ist ebenfalls mit einer Wickelung am Bund des Metallkonus befestigt, so dass die Sonde dicht verschlossen ist. Als Medium wird destilliertes Wasser verwendet, das den Druck hydraulisch unmittelbar an dem elektronischen Druckaufnehmer (Messbereich 0 – 5 bar) weiterleitet. Die kontinuierliche Aufzeichnung und Speicherung der Daten erfolgte mit einer PCMCIA Datenaufzeichnungskarte von National Instruments und einem eigens programmiertem Messprogramm der Software DIAdem Version 9.1 von National Instruments. Die Datenaufzeichnungsfrequenz betrug 100 Hz, dies entspricht 100 Einzelmessungen pro Sekunde, um eine möglichst genaue und hoch auflösende Aufzeichnung der Druckverläufe zu erreichen. Entscheidend für eine korrekte Messung ist eine blasenfreie Befüllung der gesamten Messsonde, da eingeschlossene Luftblasen komprimiert werden, was zu einer Verfälschung der Messergebnisse führt. Die Durchführung der Schlauchdrucksondenmessung im Feld unterteilt sich in mehrere Arbeitsschritte, die nacheinander durchgeführt werden müssen:

1. Festlegung des Messpunktes im Feld.
2. Ausgleich von Unebenheiten und Einebnung der Lafettenaufstellfläche.
3. Ausheben einer Grube zur waagrechten Installation der Lafette (diese gibt über Führungshülsen mit unterschiedlichen Winkeln die Messtiefen vor).
4. Überprüfung des zur Bodenoberfläche waagrechten Einbaus mittels Wasserwaage und Fixierung der Lafette mit vier Erdnägeln an den vier Eckpunkten .
5. Vorschlagen der Löcher mit Hilfe einer Lanze (16 mm), die im Bereich der Spitze auf einer Länge von 200 mm auf 13 mm verjüngt ist, um den Abstand zwischen Sonde und Boden so gering als möglich zu halten und so wenig Boden wie möglich zu komprimieren, bei gleichzeitig guter Einführbarkeit der Sonde (Abb. 46).
6. Überprüfung der vorgeschlagenen Röhren auf Einführbarkeit mit einem Sondierstab 12 mm.
7. Einführung der bereits gefüllten und entlüfteten Sonde in die vorgeschlagene Röhre.
8. Verbindung der Sonde mit der Anschlussbox zur Erzeugung der nötigen Vorspannung mit dem Befüllschlauch.
9. Öffnen des Kugelhahns am Ende der Schlauchdrucksonde, zur Entfernung letzter Luftblasen und Einstellung des Vordrucks (Ablesen an Manometer der Befülleinrichtung und am Display des Computers).
10. Überfahrt und Aufzeichnung der Messung.
11. Ausgraben der Sonden im Bereich von 20 und 30 cm, da in diesen Tiefen meist Verformungen stattfinden, die dazu führen, dass beim Herausziehen der Sonde der Schlauch abgestreift wird, was eine aufwändige Instandsetzung der Sonde nach sich ziehen würde.

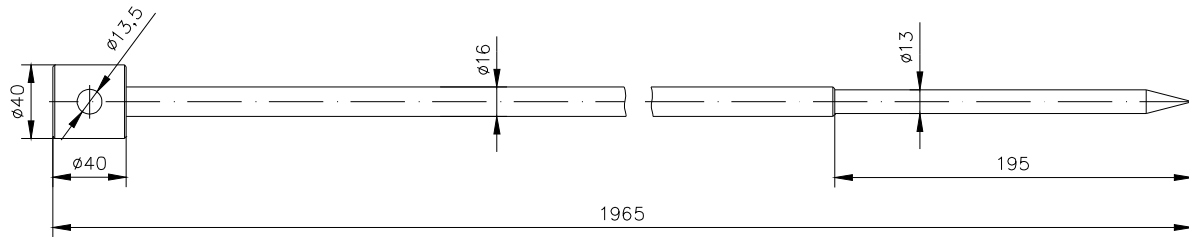


Abb. 46: Lanze zum Vorstechen der Sondenkanäle

Für die Messung des dynamischen Druckes in verschiedenen Tiefen wurden vier Schlauchdrucksonden für die Messtiefen von 20, 30, 40 und 50 cm gleichzeitig benötigt. Insgesamt standen sieben Sonden zur Verfügung, wodurch der Ausfall von bis zu drei Sonden ohne Messunterbrechung kompensiert werden konnte. Jede Belastungsvariante wurde in sechs randomisierten Feldwiederholungen gemessen, wobei bei einer Wiederholung je Tiefe je eine Sonde zum Einsatz kam. Diese hohe Wiederholungszahl soll die räumliche Variabilität und die Heterogenität auf dem Feld, die unter Feldbedingungen vorzufinden sind, ausgleichen. Da die Fahrspur in jeder Parzelle frei gewählt werden konnte, wurde die Lafette über den Winkel der Führungshülsen an einem geeigneten Platz auf der Parzelle installiert (Abb. 47). Über den Eindringwinkel und die Sondenlänge konnte die genaue Position der Silikon-druckaufnehmermitte bestimmt werden. Den Fahrwerken musste auf Grund der unterschiedlichen Fahrspurbreiten, die jeweilige Fahrposition vorgegeben werden. Bei den Radlaufwerken wurde die Spur so gewählt, dass die Radmitte mit der Silikon-druckaufnehmermitte übereinstimmte, da dort der höchste Druck zu erwarten ist (Degrell, 2006). Beim Bandlaufwerk wurde außerhalb der Bandmitte gemessen, da in der Mitte die Führungsstollen sitzen, die geringere Drücke auf den Boden abstützen als die Laufwerksrollen selbst. Nach der korrekten Platzierung der Sonden wurde, für die exakte Anpassung des Druckaufnehmers an den Boden, der Wasserinnendruck in der Sonde mittels der Befüll- und Entlüftungseinrichtung zwischen 20 und 30 kPa eingestellt. Die Überfahrt des Messpunktes selbst erfolgte mit den verwendeten Maschinen bei einer konstanten Geschwindigkeit von 1,4 m/s was 5 km/h entspricht.

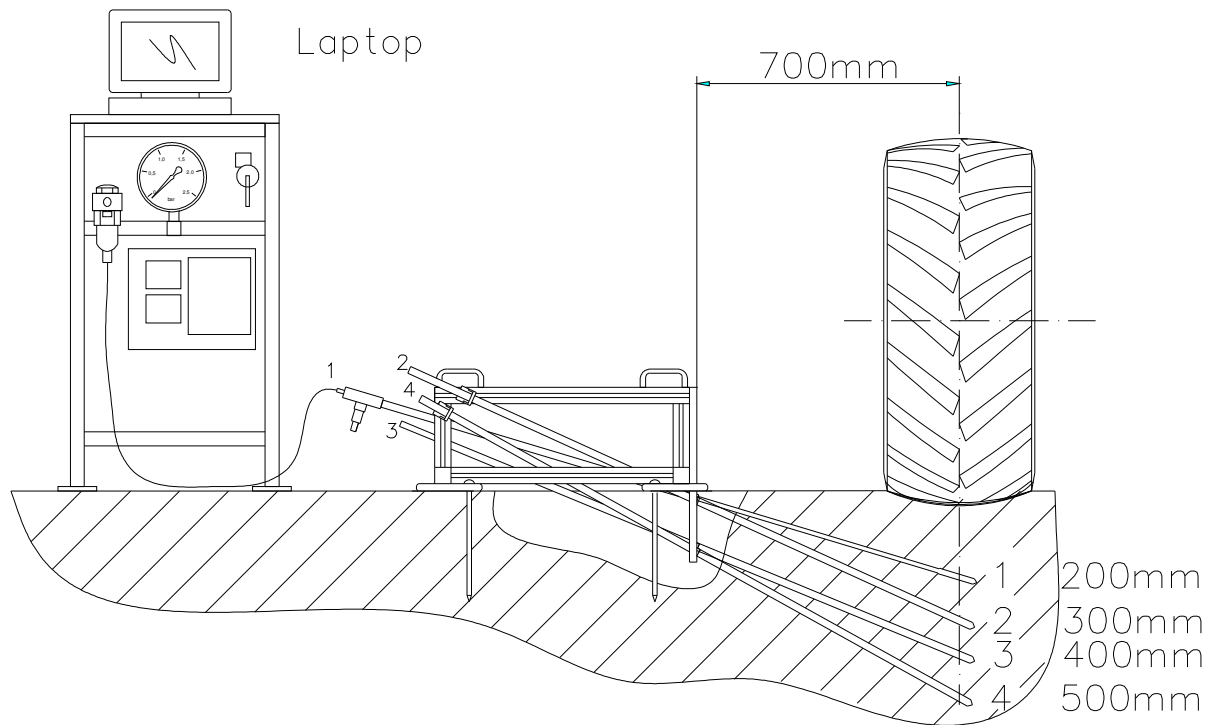


Abb. 47: Messanordnung der Schlauchdrucksonden für die vier Beprobungstiefen

Der von der Schlauchdrucksonde aufgenommene Druck P_{so} resultiert aus den gemittelten Hauptspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 . Nach Bolling (1987) ist bei diesem Druck, je nach Steife zwischen Boden und Sensor, die bodenspezifische Konstante (k_s) zu berücksichtigen. Das Einbeziehen der Konstante k_s erfolgte in der nach Bolling (1987) erarbeiteten Formel:

$$P_{so} = k_s + (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad \text{Gl. 5.1}$$

Nach Bolling (1987) ergibt sich die Größe k_s aus der unterschiedlichen Elastizität und dem daraus resultierenden Verformungsverhalten von Boden und Druckaufnehmer. Im besten Fall sind beide Größen in Boden und Druckaufnehmer gleich, die Konstante k_s wird dann 0. Falls der Druckaufnehmer eine geringere Elastizität aufweist als das Umgebungsmedium, werden zu hohe Werte gegenüber dem tatsächlich herrschenden Druck gemessen und umgekehrt (Gruber, 1993). Die aufgenommenen Schlauchdrucksondendrucke stellen somit keine absoluten Messwerte dar und lassen keine Übertragbarkeit auf geänderte Bodenzustände zu. Es ist jedoch möglich, vergleichende Untersuchungen auf einem Standort unter einheitlichen Bedingungen, wie z. B. bei gleicher Bodenart, Bodenfeuchte und Auflasten, durchzuführen. Der notwendige Vorspannungsdruck der Schlauchdrucksonden im Bereich von 20 – 30 kPa dient zur sicheren Druckaufnahme zwischen Boden und Sensor. Dadurch können Druckspitzen gemessen werden, die über dem Vorspannungsniveau liegen. Drücke innerhalb dieses Bereichs können nicht differenziert werden. Dadurch lässt die Messung keine

Aussage zu, ab welcher Tiefe kein Druck mehr zu messen war. Bei Darstellungen aus der Literatur zu Schlauchdrucksondenmessungen wurde der jeweilige Vordruck von 20 kPa vom gemessenen Spitzendruck z. T. abgezogen. Abb. 48 zeigt beispielhaft die Druckverläufe in 20, 30, 40 und 50 cm Tiefe während einer Messung (Vierfachüberrollung). Er zeigt den Differenzdruck, der von der absoluten Druckhöhe um den jeweils eingestellten Vordruck abweicht. Findet durch den Druckimpuls eine plastische Verformung statt, so ist diese durch einen höher liegenden Enddruck nach dem Überfahrtsereignis zum eingestellten Vordruck erkennbar.

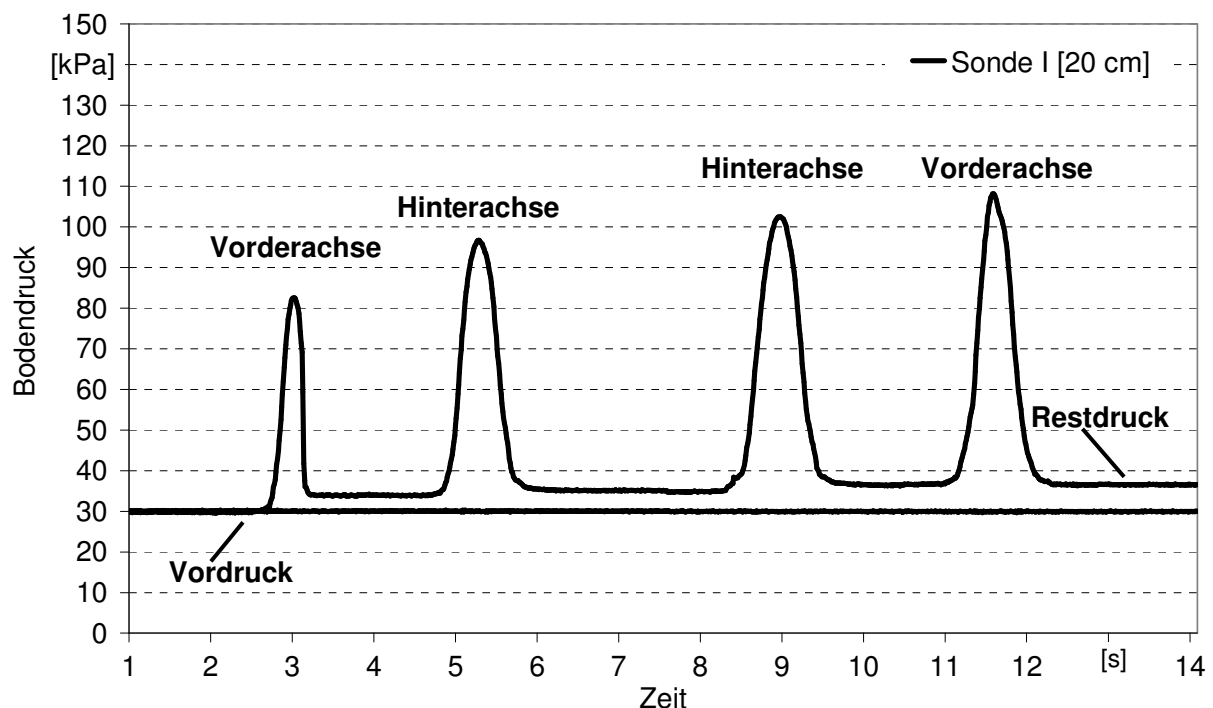


Abb. 48: Messschrieb in 20 cm und 50 cm Tiefe bei einer Überfahrt mit vier Rädern. (Vordruck zwischen 28 und 31 kPa)

5.4.3.1 Bewertung des einwirkenden dynamischen Druckes

In der Zielsetzung wurde der Zusammenhang mit der Einwirkdauer des Druckimpulses angesprochen. Diese Einwirkzeit der Last auf den Boden stellt eine weitere Möglichkeit dar verschiedene Belastungsvarianten beurteilen zu können. Da in der Literatur nur qualitative Aussagen über den Einfluss der Einwirkdauer von Bodenbelastung durch Landmaschinen auf die Bodenbeanspruchung zu finden waren, wurde bei der Auswertung der Bodendruckmessungen versucht, einen quantitativen Ansatz zur Bewertung von Einwirkdauer und Druckverlauf zu entwickeln. Bei der Suche nach geeigneten Ansätzen zur Entwicklung einer Bewertungsmethode bot es sich an, auf Verfahren zurück zu greifen, bei denen eine Gewichtung der Daten zur Vergleichbarkeit im Vordergrund standen.

5.4.3.2 Verrechnung des wirksamen Bodendruckes über die einwirkende Zeitdauer

Durch eine entsprechende Verrechnung soll eine Gewichtung der Druckimpulse, bezogen auf die einwirkende Zeit, erfolgen. Die Datengrundlage lieferte die dynamische Druckmessung zur Verrechnung des wirksamen Bodendruckes über die einwirkende Zeitdauer. Knittel (1975) verwendete in seinen Untersuchungen die von van Bavel (1950) erarbeitete Formel des „Gewogenen Mittleren Durchmessers“ (GMD) für die Vergleichbarkeit von Aggregatgrößenverteilungen verschiedener Bodenbearbeitungsmaßnahmen. Bei dieser wird eine Gewichtung der Aggregatgrößenklassen zur Einschätzung der Arbeitsqualität unterschiedlicher Bearbeitungsmaßnahmen angewendet. Dieser Ansatz diente als Grundlage zur Erstellung der Verrechenbarkeit der dynamischen Bodendrucke. Der GMD berechnet sich aus der Summe aller Gewichte der Aggregatgrößenklassen (n_i) multipliziert mit der jeweiligen Klassenmitte der Aggregatgrößenklasse (d_i) dividiert durch die Summe der Gewichte der Aggregatgrößenklasse (n_i).

$$GMD = \frac{\sum (n_i \cdot d_i) [g \cdot mm]}{\sum n_i [g]} \quad \text{Gl. 5.2}$$

Zur Übertragung der gewichteten Verrechnung dynamischer Drücke wurden die Formelfaktoren neu definiert. Anstelle der Gewichte der Aggregatgrößenklasse (n_i) wurde der Faktor ‚Zeit des einwirkenden Druckes (t_i)‘ eingesetzt, um eine Gewichtung des einwirkenden Druckes über die Zeitdauer zu erreichen. Anstelle der Klassenmitte der Aggregatgrößenklasse (d_i) wurde die Klassenmitte des einwirkenden Druckes (p_i) verwendet. Daraus ergibt sich die neue Formel für den „Gewichteten Mittleren Verdichtungswirksamen Bodendruck“ (GMP_w).

$$GMP_w = \frac{\sum (t_i \cdot p_i) [s \cdot kPa]}{\sum t_i [s]} \quad \text{Gl. 5.3}$$

Um die Formel zur Berechnung anwenden zu können, wurden elf Druckklassen ($P_1 - P_{11}$) festgelegt und jeder Druckklasse ein mittlerer Druck zugeordnet (vgl. Tab. 21).

Tab. 21: Festlegung und Einteilung der Druckklassen

Nr.	Druckklasse	mittlerer Druck (p_i)
P ₁	26 – 35 kPa	30
P2	36 – 45 kPa	40
P3	46 – 55 kPa	50
P4	56 – 65 kPa	60
P5	66 – 75 kPa	70
P6	76 – 85 kPa	80
P7	86 – 95 kPa	90
P8	96 – 105 kPa	100
P9	106 – 115 kPa	110
P10	116 – 125 kPa	120
P11	126 – 135 kPa	130

Die Daten aus der dynamischen Druckmessung wurden sortiert und alle Zeitspannen, die innerhalb der zugeordneten Druckklassen lagen, aufsummiert. Anschließend wurden diese in die Formel eingesetzt und verrechnet.

5.4.4 Eindringwiderstandsmessung - Penetrometer

Zur Bestimmung der Bodenfestigkeit über die Tiefe, in und neben der jeweiligen Fahrspur, wurde mittels Konus-Penetrometer der Eindringwiderstand ermittelt. Diese Messmethode gilt als eine schnelle Feldmethode, die wegen ihrer weltweiten Verbreitung und der schnellen Durchführbarkeit der Messungen besonders interessant ist. Das genormte Messverfahren (ASAE Standard: ASAE S313.1, 1979 – 89) eignet sich gerade deshalb zur Ermittlung von Vergleichsdaten.

Zur Messung diente ein Vertikalpenetrometer Typ Penetrologger der Firma Eijkelkamp. Durch senkrechtes Einstechen des Sondenstabes in den Boden wurde eine horizontale Ermittlung des Eindringwiderstandes durchgeführt (Abb. 49). An der Spitze des Sondenstabes befindet sich ein kegelförmiger Konus (1 cm²) mit einem Öffnungswinkel von 30° (ASAE – S313.1), am anderen Ende des Sondenstabes sitzt der elektronische Kraftsensor, welcher die Bodenwiderstände aufnimmt. Als manuelle Vortriebsgeschwindigkeit wurden 2 cm/s gewählt. Die gemessenen Eindringwiderstände werden alle 10 mm als Durchschnittswert abgespeichert. Je Belastungsvariante wurden fünf Einstiche in und fünf neben der jeweiligen Spur durchgeführt. Diese Vorgehensweise wurde bei allen sechs Feldwiederholungen in gleicher Weise angewendet. Die angegebenen Werte in MPa wurden bei der Auswertung zur besseren Vergleichbarkeit mit den Druckwerten in kPa umgewandelt. Zusätzlich zur Unter-

scheidung der Auswirkung hinsichtlich Bodenfestigkeit zwischen befahrener und unbefahrener Spur konnte mit dieser Methode zusätzlich die Spurtiefe ermittelt werden.



Abb. 49: Einsatz des Penetrometers zur Messung des Eindringwiderstandes

5.4.5 Bodenphysikalische Kennwerte

Zur Quantifizierung von Bodenverformungen wurden Bodenproben mit Stechzylinder in und direkt neben den jeweiligen Fahrspuren in den beiden Tiefen 15 – 20 cm und 40 – 45 cm entnommen. Es wurde die Trockenrohddichte, das Gesamtporenvolumen, die Luftkapazität und die pneumatische Leitfähigkeit bestimmt. Die erste Tiefe, 15 – 20 cm, zeigte die Auswirkung der Belastungsvarianten im Oberboden (Krume). Die zweite Beprobungstiefe stellte den Unterboden dar, der durch die Bodenbearbeitung nicht gelockert wurde und aus diesem Grund hinsichtlich Verdichtungen kritischer zu beurteilen ist. Zur Charakterisierung des Bodenzustandes wurden physikalische Untersuchungen an den mit den Stechzylindern gewonnenen Bodenmaterialien durchgeführt. In Tab. 22 sind die Bodenparameter mit den dazugehörigen Porendurchmessern klassifiziert. Die benötigte Saugspannung, um das Wasser aus den Bodenporen zu saugen, nimmt dabei mit Abnahme der Porendurchmesser zu. Dies bedeutet, dass in den Grobporen vornehmlich Bodenluft und in den Mittel- bzw. Feinporen Bodenwasser gespeichert wird.

Tab. 22: Klassifizierung von Porendurchmesser und Bodenkennwerte nach Hartge und Horn (1989), abgeändert durch Bodenparameter

Klassifizierung der Poren	weite Grobporen	enge Grobporen	Mittelporen	Feinporen
Porendurchmesser	≥ 50 [µm]	50 - 10 [µm]	10 – 0,2 [µm]	< 0,2 [µm]
benötigter Unterdruck zum Entwässern der Poren; [pF]-Wert	0 – 1,8	> 1,8 – 2,5	> 2,5 – 4,2	> 4,2
Gesamtporenvolumen	X	X	X	X
Luftkapazität	X			
Feldkapazität		X	X	X
nutzbare Feldkapazität		X	X	
Totwasser				X

5.4.5.1 Trockenrohddichte

Die Trockenrohddichte (TRD) in [g/cm³] gibt an, wie viel Trockenmasse ein Volumen Boden enthält. Zur Bestimmung wurden die Proben bei 105°C bis zur Massenkonstanz getrocknet (DIN ISO 11272).

5.4.5.2 Gesamtporenvolumen und Luftkapazität

Das Gesamtporenvolumen (GPV) ist der volumetrische Hohlraumanteil an dem trockenen Bodenvolumen. Es wird bestimmt durch den Quotienten aus Trockenrohddichte zur Substanzdichte (SD), über die Formel (nach DIN 19683-13):

$$\text{GPV [Vol.-%]} = (1 - (\text{TRD}/\text{SD})) * 100 \quad \text{Gl. 5.4}$$

Die Substanzdichte wurde mit einem Heliumhykrometer bestimmt (siehe DIN ISO 11508). Unter der Luftkapazität (LK) wird der Porenraum verstanden, der bei Entwässerungsstufen bis pF 1,8 (Wasserspannung –60 hPa) mit Luft gefüllt ist. Dies sind die weiten Grobporen. Berechnet wird sie über die Formel:

$$\text{LK [Vol.-%]} = \text{GPV} - \text{Feldkapazität}_{\text{Vol}_{\text{pF}1,8}} \quad \text{Gl. 5.5}$$

5.4.5.3 Wasserspannungen

Die Feldkapazität setzt sich aus dem Bodenporenvolumen der nutzbaren Feldkapazität und des Totwassers zusammen. Sie ist definiert als die Wassermenge, welche ein Boden maximal gegen die Schwerkraft zurückhalten kann. Dies entspricht einer angelegten Saugspannung von pF 1,8. Entwässert werden die Stechzylinderringe auf keramischen Platten mit

hängender Wassersäule (DIN ISO 11274). Die nutzbare Feldkapazität errechnet sich aus der Feldkapazität minus dem Totwasser (TW). Die Wasserspannungen werden in [Vol.-%] angegeben.

5.4.5.4 Pneumatische Luftleitfähigkeit (PL)

Die Stechringe werden auf keramischen Platten mit Hilfe von Unterdruck (pF 1,8) entwässert, die weiten Grobporen sind somit luftgefüllt. Direkt anschließend folgte die Messung der Luftleitfähigkeit mit einem Gerät der Firma „Umwelt-Geräte-Technik“. Die PL wird berechnet als Proportionalitätsfaktor zwischen der Fließgeschwindigkeit der Luft und dem Druckgradienten über die Fließstrecke. Der Wertebereich erstreckt sich von 0 cm s^{-1} bis 30 cm s^{-1} .

5.4.6 Statistische Analyse der Messwerte

Die Schlauchdrucksonden waren zur Versuchsdurchführung mit einem Vordruck im Boden bis 30 kPa vorgespannt. Zur Verrechnung der Datenreihen wurden alle Messwerte um den jeweiligen Vordruck korrigiert. Die Werte der Penetrometermessung in den Spuren waren um den Betrag der Fahrspurensetzung zu den unbefahrenen Messstellen verschoben. Um die Messreihen miteinander verrechnen zu können mussten diese gegeneinander verschoben werden, bis diese Differenz ausgeglichen war. Die Prüfung auf Deckungsgleichheit erfolgte über die kleinste absolute Mittelwertdifferenz in [kPa] aus 45 Wertepaaren. Zur Bestimmung diente die angeführte Formel.

$$\text{absolute Mittelwertdifferenz} = \frac{|\bar{X}_n - \bar{Y}_n|}{n_{45}} \quad \text{Gl. 5.6}$$

Der Vergleich der Messwerte von den unbefahrenen zu befahrenen Messstellen der Stechzylinderproben erfolgte separat für jede Überrollungssituation. Die Ergebnisse sind dabei als relative Differenz in [%] angegeben. Eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse zwischen den Überrollungssituationen ist somit gewährleistet. Das arithmetische Mittel diente zur Mittelwertberechnung für alle normal verteilten Werte. Da die Werte der pneumatischen Leitfähigkeit nicht normal verteilt sind, musste bei diesen Ergebnissen das geometrische Mittel verwendet werden. Anschließend erfolgte eine Prüfung auf Signifikanz durch einen Mittelwertvergleich des Statistikprogramms SAS. Es wurde die SAS-Prozedur „Simulate“ nach vorgeschalteter Co-Varianzanalyse, bereinigt um die Fehlerstreuung der beiden Störvariablen Schluff und Sand, durchgeführt. Des Weiteren wurde der Anova-Test, der ebenfalls ein Mittelwertsvergleich für unverbundene Stichproben ist, mit einer Tukey-Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$ verwendet.

$$T = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \sim t_{n_1+n_2-2} \quad |t| > t_{n_1+n_2-2, 1-\frac{\alpha}{2}} \quad \text{Gl. 5.7}$$

Dabei zeigen Berechnungen mit einem Signifikanzniveau von $\alpha < 0,05$ und $\alpha < 0,01$ Signifikanz an, sowie mit $\alpha < 0,0001$ Hochsignifikanz.

6 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden entsprechend der Reihenfolge der Methodenbeschreibung vorgestellt. Die Aufteilung erfolgt nach der Trennung in technische Parameter sowie in Feldbedingungen, Bodenbeanspruchung und Bodenverformung. Hierfür wurden drei Teilbereiche gebildet. Im ersten Teil werden die tatsächlich im Feldversuch realisierten Werte und Parameter beschrieben, die zum Teil von der theoretischen Versuchsplanung abweichen. Im zweiten werden die Ergebnisse aus den Schlaudrucksondenmessungen des dynamischen Druckverlaufs vorgestellt. Abschließend werden im dritten Teil die Auswirkungen auf das Bodengefüge und die Reaktionen des Bodens beschrieben.

6.1 Standortanalyse - Bodenfeuchte

Die Bodenfeuchte des sandigen Lehms entsprach der Versuchsdurchführung am 19. und 20. April 2006 bis in die Beprobungstiefe von 50 cm der Feldkapazität. Aus den gezogenen Bodenproben der Stechzylindernahme konnten zur Bodenzusammensetzung und Bodenart zusätzlich die Bodenfeuchtigkeit und die Feldkapazität (FK) für die beiden Beprobungstiefen 15 – 20 und 38 – 43 cm bestimmt werden. Die Zahlen 111111 bis 555555 der in Abb. 50 abgebildeten Grafik entsprechen den fünf Sektoren, die je eine Überrollungssituation wie Eingangs beschrieben darstellten. In den fünf Sektoren sind die gemessenen Mittelwerte aus sechs Feldwiederholungen je Überrollungssituation im befahrenen und unbefahrenen Boden dargestellt. Die Bodenfeuchte war für beide Bodenstellen (unbefahren / befahren) in einem Bereich von 30 – 35 Vol.-% identisch.

Wassergehalt (WG) und Feldkapazität (FK) [Vol.-%] in der Krume (15 - 20 cm)

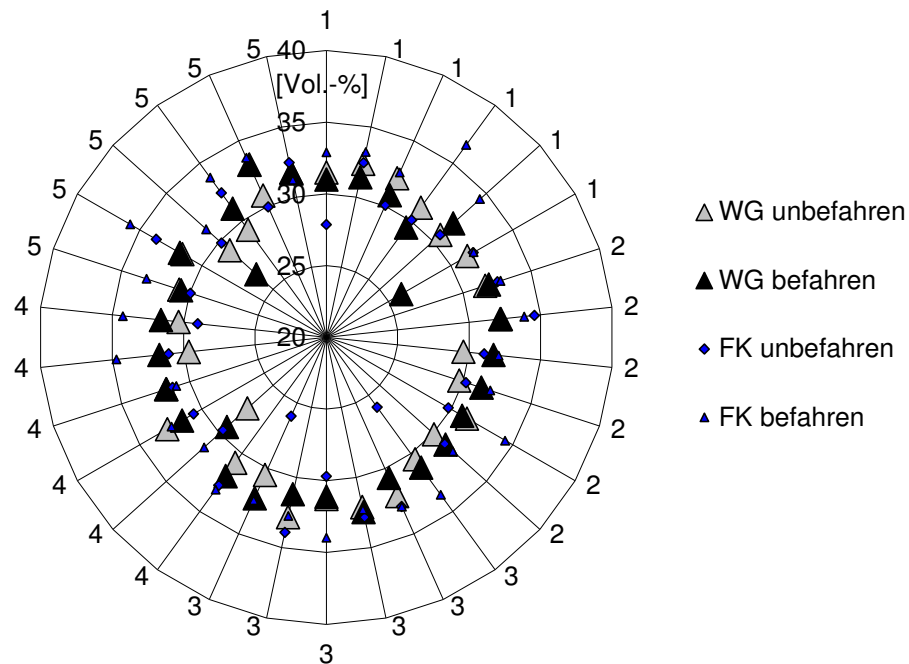


Abb. 50: Gegenüberstellung von Wassergehalt (WG) und Feldkapazität (FK) im Oberboden vom 20.4.2006

In Abb. 51 ist die Bodenfeuchte und die FK für die zweite Probenahmetiefe dargestellt, die den Unterboden repräsentiert. In der zweiten Tiefe sind die Werte ähnlich homogen verteilt und auf gleichem Niveau wie im Krumenbereich.

Wassergehalt (WG) und Feldkapazität (FK) [Vol.-%] im Unterboden (38 - 43 cm)

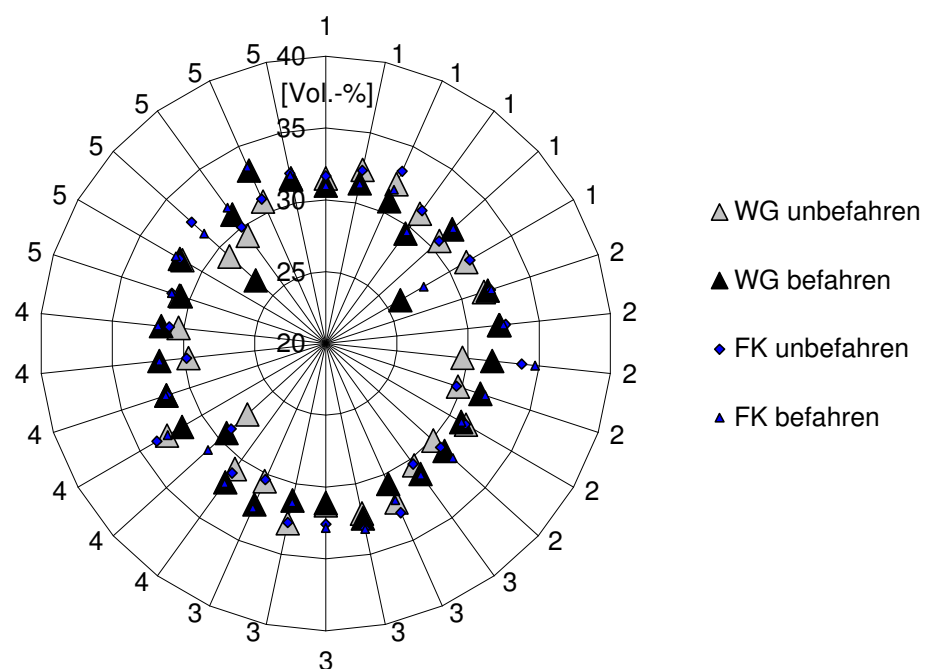


Abb. 51: Gegenüberstellung von Wassergehalt (WG) und Feldkapazität (FK) im Unterboden vom 20.4.2006

6.2 Maschinenparameter

Die in der Versuchsplanung vorgesehenen Belastungskennwerte wurden durch die Messung der tatsächlich erreichten Parameter im Feld überprüft. Auf einer geeichten Fuhrwerkswaage (Wiegebereich bis 400 kN) wurden die drei Maschinen hinsichtlich der Vorgabe verwogen. Zur präzisen Gewichtserfassung wurden wiederholt die Achs- und Radlasten der beiden KRB 6 und des Mittelsitztraktors erfasst und gemittelt. Im Feld erfolgte nach Angabe der aktuellen Betriebsanleitung für Landwirtschaftsreifen, unter Berücksichtigung der ermittelten Radlast, die Einstellung des zulässigen Reifeninnendruckes für die Fahrt im ebenen Feld mit 10 km/h. Danach wurde unter den im Feld vorherrschenden Bedingungen die Aufstandsfläche der jeweiligen Fahrwerke durch Abstreuen mit Kalk abgebildet und digital erfasst. Die Ergebnisse sowie der rechnerisch mittlere Kontaktflächendruck sind in Tab. 23 dargestellt.

Tab. 23: Maschinenparameter bei Versuchsdurchführung am 19. April 2006

Überrollungssituation	Bereifung Fahrwerk	Radlast/ Bandlast Einsatz 19.04.06	Reifen- innendruck [kPa]	Auf- stands- fläche [cm²]	Mittlerer Kontakt- Flächendruck [kPa]
1. 1-fach Band	890 x 2000 mm	1 x 113 kN	-	18.300	62
2. 1-fach Rad	1 x 1050/50 R32	1 x 51,5 kN	70	1 x 7.400	69
3. 2-fach Rad	2 x 1050/50 R32	2 x 51,5 kN	70	2 x 7.400	69
4. 1-fach Rad	1 x 540/65 R28	1 x 23,5 kN	60	1 x 3.100	74
5. 4-fach Rad	4 x 540/65 R28	4 x 23,5 kN	60	4x 3.100	74

Die Zielgrößen hinsichtlich der Rad- bzw. Bandlasten wurden weitestgehend erreicht. Auf Grund der kleineren Raddimension des Mittelsitztraktors für die ein- und vierfach Überrollung (540/65 R28 Räder statt 620/70 26R), wurde bei diesem der höchste mittlere rechnerische Kontaktflächendruck erreicht. Trotz der um 2,2fach höheren Last des Gummibandlaufwerks gegenüber dem großvolumigen Radialreifen 1050/50 R32 und ca. 5mal so hoch wie die vom Standardradradialreifen mit 540/65 R28, wurde durch eine 2,5fach bzw. 6fach so große Kontaktfläche, der niedrigste mittlere Kontaktflächendruck ermittelt.

6.3 Simulation mit TASC 2.0

Mit den ermittelten Parametern (Reifen/Boden) wurde im aktuellen Programm TASC 2.0 (Diserens, 2010) eine Simulation berechnet. Das zur Zeit der Versuchsplanung zur Verfügung gestandene Vorgängerprogramm 1.0 diente für die Festlegung der Reifendimensionen sowie der Rad- und Bandlasten. In einem ersten Schritt konnte eine Abschätzung der zu erwartenden Bodendrücke über die Tiefe mit dem Programm ermittelt werden. Bei dieser Simulation wird der Einfluss der mehrfachen Überrollung nicht berücksichtigt, so dass nur der statische Impuls bei einmaligem Einwirken dargestellt wird. Die vom Programm errechneten Werte sind in Tab. 24 dargestellt. Beim Gummibandlaufwerk wurden beide Laufwerke kalkuliert (ungleiche Lastverteilung). Für die anschließende dynamische Bodendruckmessung wurde das in Fahrtrichtung rechte Bandlaufwerk verwendet, da dies der Vorplanung am Nächsten kam.

Tab. 24: Zur Simulation der im Feld gemessenen Fahrzeugparameter (Raddimension / Radlast / Reifeninnendruck) und festgestellten Bodeneigenschaften (Bodenart / Lockerungstiefe/Oberbodenfestigkeit) wurden diese in das Programm TASC 2.0 (Diserens, 2010) eingegeben und getestet

Variante	Reifen-/Raupenbreite	Reifendurchmesser / Gurtlänge	Max. Rad- / Raupenlast (gemessen)	Reifeninnendruck (eingestellt)	Kontaktfläche (Simulation mit TASC 2.0)	Mittl. Kontaktdruck (Simulation mit TASC 2.0)	Schadverdichtungsgefahr bis Tiefe
	[cm]	[cm]	[kg]	[kPa]	[cm ²]	[kPa]	[cm]
Band rechts	89	200	11.300	-	17.800	65	26
Band links	89	200	12.200	-	17.800	67	31
1050/50 R32	105	186	5.150	70	6.408	79	27
540/65 R28	54	141	2.350	60	3.247	71	18

Bis auf das Gummibandlaufwerk (in Fahrtrichtung links) der Dimension 2.000 mm x 890 mm mit einer Last von 122 kN, erzeugten laut TASC 2.0 keine der anderen Fahrwerksvarianten eine Schadverdichtung die tiefer lag als der regelmäßig gelockerte Bereich, der mit 30 cm angegeben wurde. Trotz der mehr als doppelt so hohen Last (113 kN) des in Fahrtrichtung rechten Gummibandlaufwerkes, ist laut Simulation eine ähnlich hohe Schadverdichtungsgefahr bis in eine Tiefe von 26 cm zu erwarten, wie beim Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 mit 51,5 kN Last. Der höchste mittlere Kontaktflächendruck wurde beim Radialreifen mit 1050/50 R32 und 51,5 kN Last mit 79 kPa berechnet. Bei den beiden Gummibandlaufwerken

erzeugte das um 9 kN schwerere linke Bandlaufwerk eine um 5 cm tiefere Wirkung, wodurch eine Schadverdichtungsgefahr unterhalb der maximalen Auflockerungstiefe von 30 cm angegeben wurde. Das für den Versuch ausgewählte rechte Gummibandlaufwerk mit 113 kN Last erreichte laut TASC 2.0 den niedrigsten Kontaktflächendruck. Der Vergleich der Druckspannung unter den Reifen bzw. unter dem Gummibandlaufwerk ist in Abb. 52 dargestellt.

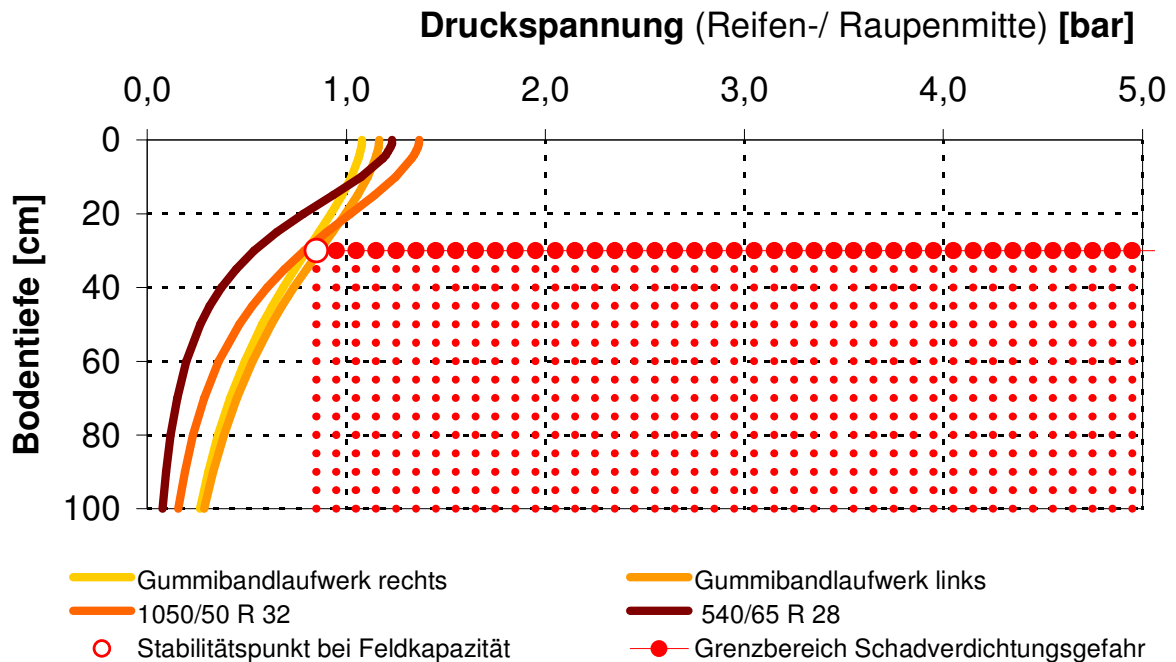


Abb. 52: Mit TASC 2.0 simulierte Hauptdruckspannung der jeweiligen Fahrwerksvarianten

Bedingt durch den höchsten Kontaktflächendruck erreichte der Radialreifen mit der Dimension 1050/50 R32 und einer Last von 51,5 kN den höchsten Ausgangswert bei der Druckspannung an der Bodenoberfläche. Diese baut sich nach TASC 2.0 gegenüber den beiden Gummibandlaufwerksvarianten über die Tiefe schneller ab. Die zweithöchste Druckspannung an der Oberfläche erzeugte der Radialreifen mit der Dimension 540/65 R28 und einer Radlast von 23,5 kN. Diese baute sich laut Simulation gegenüber den anderen Varianten schneller ab. In einer Tiefe von 20 cm lag die Druckspannung unter den übrigen Fahrwerksvarianten. Die Gummibandlaufwerke mit den höchsten Einzellasten erzeugen an der Bodenoberfläche nach TASC 2.0 niedrigere Druckspannungen als die beiden Radialreifen. Die Druckspannungen bauen sich laut Simulation langsamer ab und bleiben bis in die angegebene Tiefe von 100 cm auf einem höheren Niveau als unter den Radialreifen.

Die Bodendruckausbreitung über die Tiefe wird bei TASC 2.0 mit so genannten Druckzwiebeln dargestellt. Die Berechnung basiert auf dem von Söhne (1953) erstellten Druckzwiebelmodell. Die Bereiche mit gleicher Druckspannung werden als Isobare dargestellt, die sich über die Tiefe in ovalen Kreisen ausbreiten (vergleichbar mit Zwiebelschalen). In Abb. 53 ist die kalkulierte Druckausbreitung der unterschiedlich belasteten Gummibandlaufwerke darge-

stellt. Durch die höhere Last des in Fahrtrichtung linken Gummibandlaufwerkes breitet sich der Druck in eine größere Tiefe als beim rechten aus.

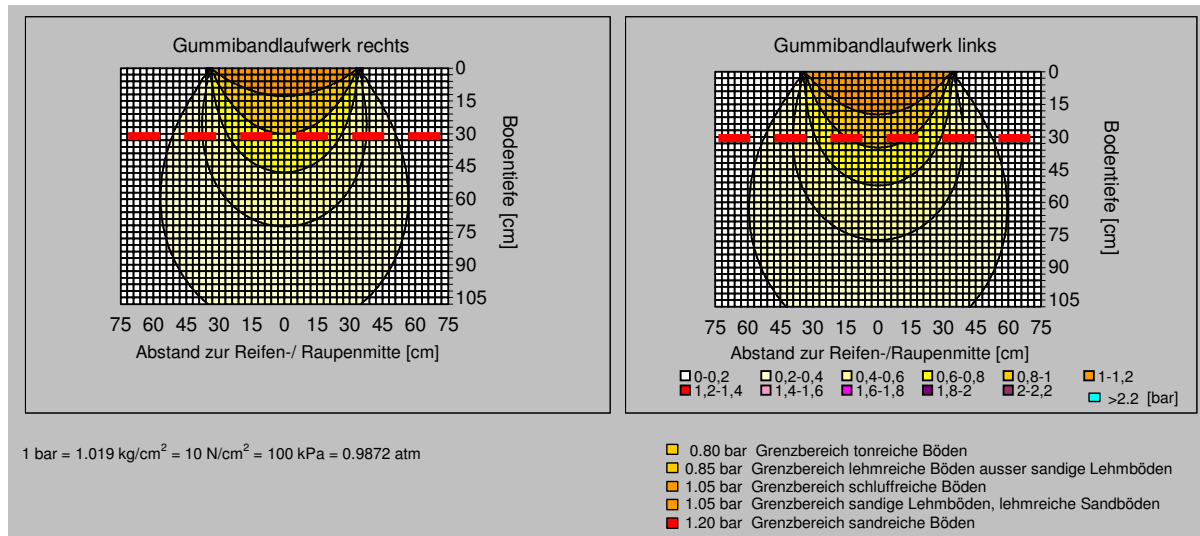


Abb. 53: Vergleich Druckzweibelausbreitung der unterschiedlich belasteten Gummibandlaufwerke

Der Druckbereich 0,8 – 1,0 bar wirkt beim in Fahrtrichtung linken Gummibandlaufwerk bis unterhalb der Tiefe von 30 cm, die als maximale Bearbeitungstiefe angegeben wurde. In 90 cm Tiefe zeigt die Simulation den gleichen Druckbereich. Bei der Simulation der beiden Radfahrwerke (Abb. 54) wird der Unterschied, den das Programm hinsichtlich Reifengröße und Radlasten errechnet, deutlich.

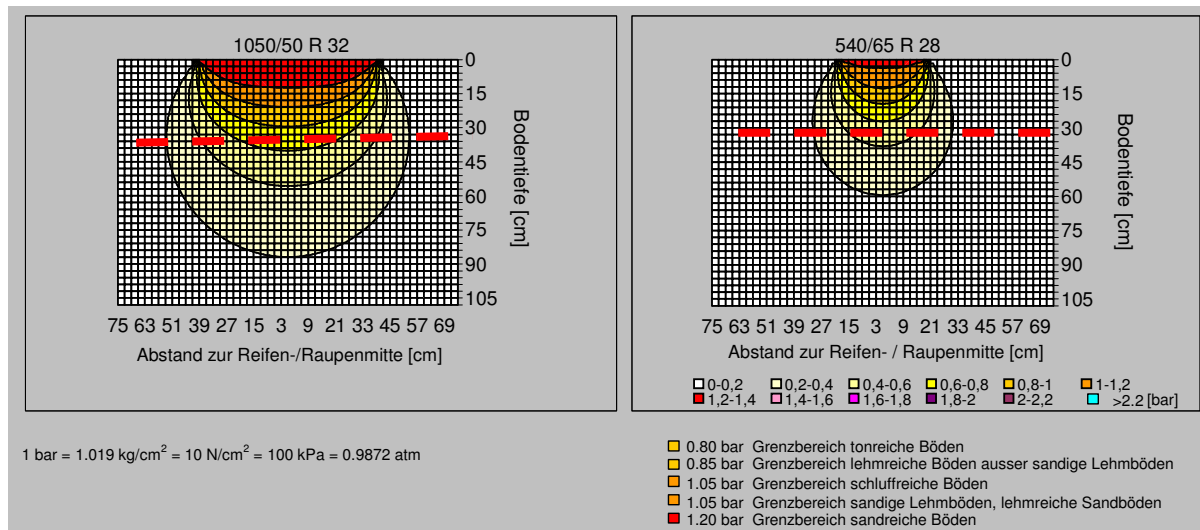


Abb. 54: Simulationsvergleich des Bodendruckes zwischen den beiden Radfahrwerken

Bei dem Reifen der Dimension 1050/50 R32 mit 5.150 kg berechnete die Simulation eine Druckausbreitung mit 0,2 – 0,4 bar bis in eine Tiefe von 90 cm. Bei dem 540/65 R28 Reifen

mit 23,5 kN reichte dieser Druckbereich bis in eine Tiefe von knapp 60 cm. Die Gegenüberstellung der Druckverteilung verdeutlicht die Beanspruchung eines größeren Bodenvolumens als Folge der größeren Aufstandsfläche und Radlast des Reifens 1050/50 R32. Der Druck auf die Kontaktfläche und in der obersten Bodenschicht hingegen ist, bedingt durch den höheren Kontaktflächendruck beim Rad der Dimension 540/65 R28, höher.

6.4 Dynamische Bodendruckmessung

Die dynamische Messung und Analyse der Bodendrücke mit Hilfe der Schlauchdrucksonden stellt einen zentralen Teil der vorliegenden Untersuchungen dar. Aufbauend auf den Ergebnissen von Bolling (1987) wurden die gemessenen Schlauchdrücke den aufgetretenen ungerichteten Bodendrücken gleichgesetzt, da die Bodenverhältnisse zum Zeitpunkt der Messungen für alle Überrollungssituationen annähernd identisch waren. Nachfolgend sind die dynamischen Druckmessungen für jede Belastungsvariante mit einem typischen Graphen veranschaulicht. An Hand dieser Darstellungen kann die unterschiedliche Wirkung der untersuchten Fahrwerke auf die Ausbreitung des Bodendruckes dargestellt werden. Die drei Graphen dienen als Einstieg für die nachfolgenden Diagramme, in denen die aus den sechs Wiederholungen für jede Belastungsvariante ermittelten Durchschnittswerte dargestellt sind. In Abb. 55 ist der dynamische Druckverlauf unter dem Gummibandlaufwerk exemplarisch dargestellt.

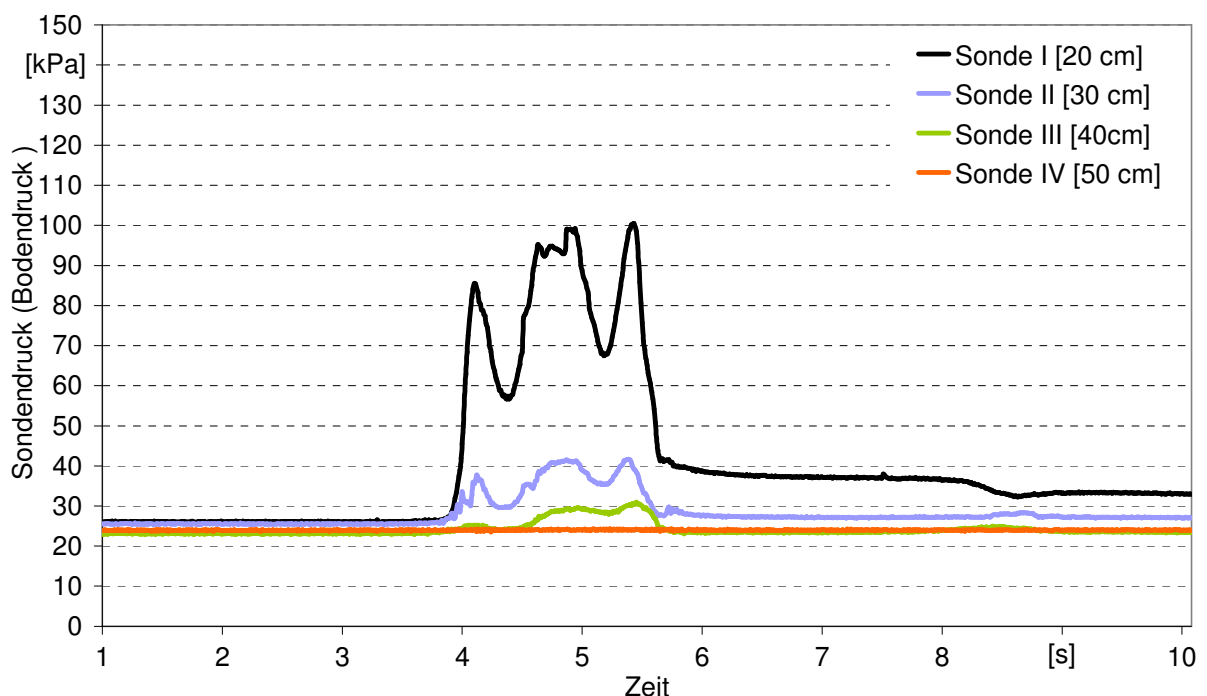


Abb. 55: Verlauf des dynamischen Druckes in vier Tiefen während der einmaligen Überfahrt mit dem Gummibandlaufwerk. Bandlast: 113 kN, rechnerischer Kontaktflächendruck: 62 kPa

Bei der Überrollung mit einer Last von 113 kN können dem Druckverlauf in einer Tiefe von 20 cm die Druckspitzen der einzelnen Laufwerksrollen erkannt werden. In der zweiten Messtiefe (30 cm) bilden sich die Laufwerksrollen auf einem niedrigeren Niveau ab. Die dritte Messtiefe (40 cm) erfasst die Überfahrt durch das Fahrwerk. Eine klare Rollenzuordnung ist nicht möglich. Bei dieser Überrollungssituation wurde in der Messtiefe von 50 cm in keiner der sechs Wiederholungen ein Druckanstieg über das Vordruckniveau festgestellt. In den ersten beiden Messtiefen verblieb nach dem Überrollen ein etwas höherer Restdruck, der wiederum auf eine plastische Verformung im Oberboden hinwies. Das Zurückgehen des Druckes zwischen den Laufwerksrollen veranschaulichte den Zwischenrollenbereich, der zu einer ungleichmäßigen Druckverteilung unter dem Gummibandlaufwerk führt. Die Entspannung des Zwischenrollenbereiches konnte das Niveau des eingestellten Vordruckes von ca. 22 - 25 kPa im Oberboden (bis 20 cm) nicht erreichen. Die höchsten Drücke wurden unter der Antriebsrolle (hinterste Rolle) gemessen.

Die Überrollungsvarianten mit Luftreifen sind gekennzeichnet durch messbare Druckspitzen bis in eine Tiefe von 40 cm. Bei einer Wiederholung der Variante mit dem Reifen der Größe 1050/50 R32 und der Radlast von 51,5 kN wurde das eingestellte Vordruckniveau in 50 cm bei beiden Überrollungen überschritten. In Abb. 56 ist die zweifache Überrollung mit der Radlast 51,5 kN abgebildet.

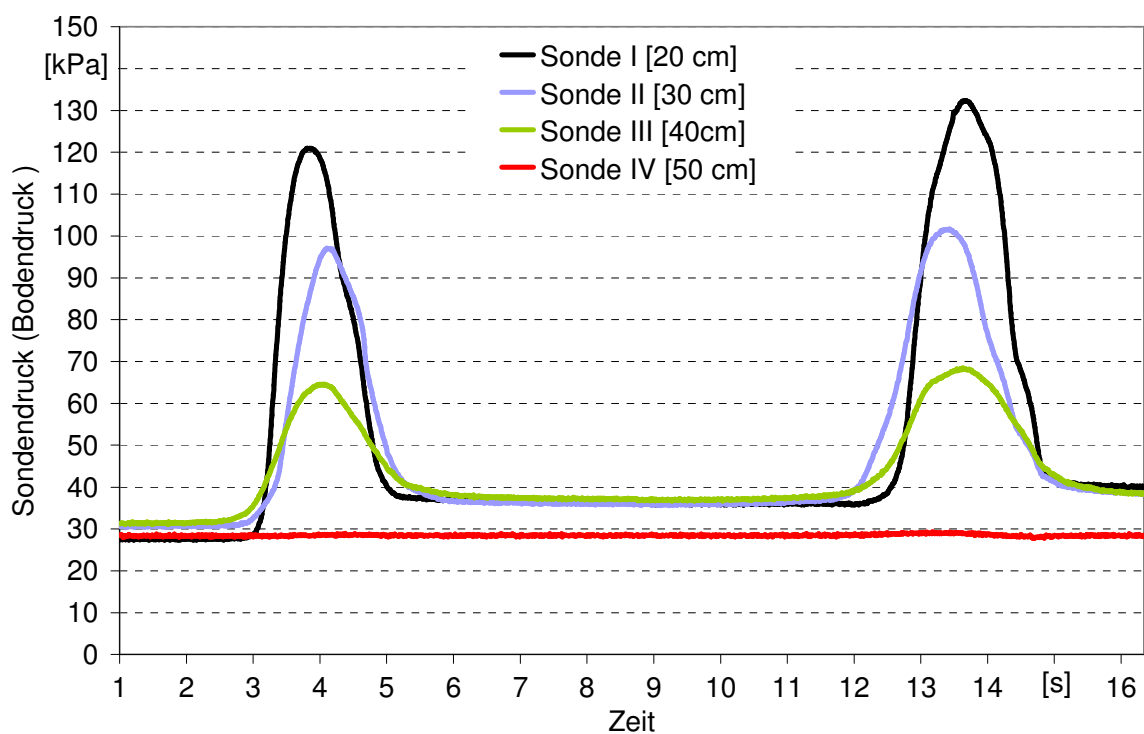


Abb. 56: Verlauf des dynamischen Druckes in den vier Tiefen während der zweimaligen Überfahrt mit dem Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 und einer Radlast von 51,5 kN, Kontaktflächendruck: 69 kPa, $p_i = 70$ kPa

Nach der zweiten Überfahrt blieb ein Druckanstieg in den Tiefen 20, 30 und 40 cm. Der über dem Vordrucksniveau liegende Enddruck nach der Belastung weist auf eine plastische Verformung in diesen Tiefen hin. Dies bedeutet, dass sich der Boden nach zweimaliger Einwirkung mit einer Last von 51,5 kN nicht vollständig entspannen konnte.

In Abb. 57 ist ein typischer Graph der vierfachen Überrollung mit der Radlast von 23,5 kN dargestellt. Mit jeder zusätzlichen Überrollung fand ein Druckanstieg vor allem im Oberboden (Krume) statt. Bis in eine Tiefe von 40 cm konnten die Überrollungsimpulse festgestellt werden. In 50 cm wurde bei keiner der Wiederholungen ein Druckanstieg über das Vordruckniveau hinaus gemessen. Die Restdrücken nach der Überrollung waren in den oberen beiden Messtiefen z. T. höher als die eingestellten Vordrücke und somit analog zu den anderen beiden Fahrwerksvarianten. Der in Abb. 57 dargestellte Abfall des Restdruckes der Sonde in 30 cm ist die Ausnahme gewesen und auf eine Undichtigkeit zurückzuführen.

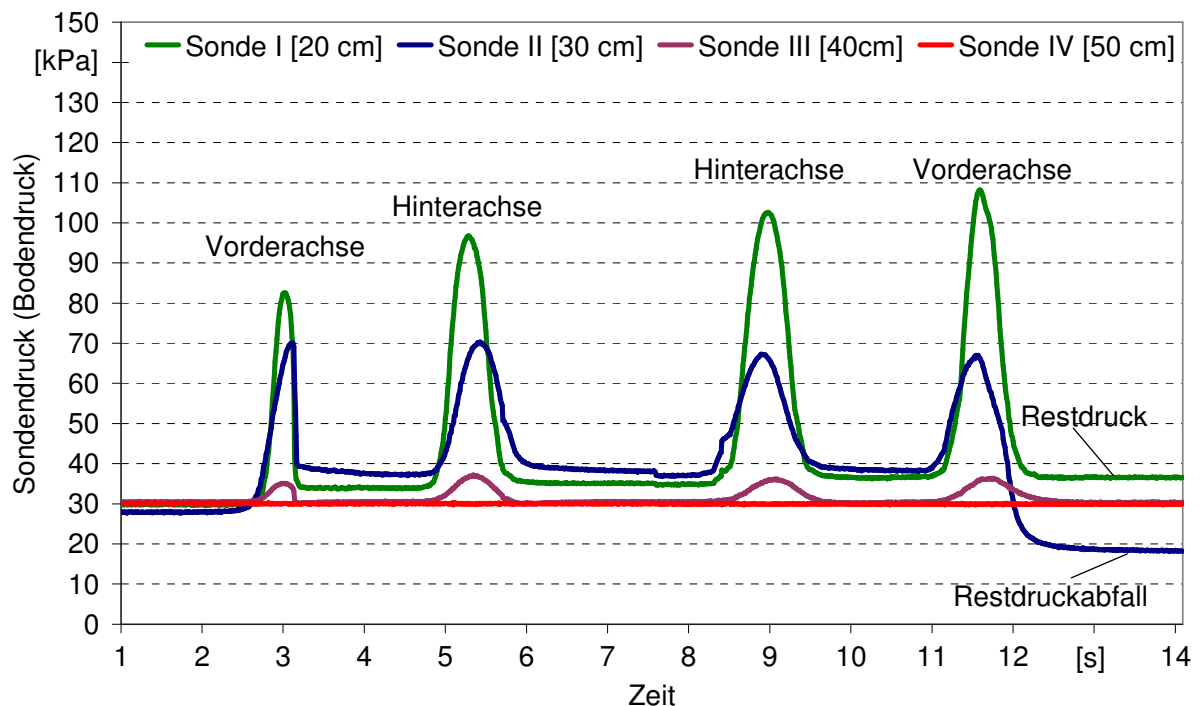


Abb. 57: Verlauf des dynamischen Druckes in vier Tiefen während viermaliger Überfahrt mit dem Radialreifen der Dimension 540/65 R28 und einer Radlast von 23,5 kN, Kontaktflächendruck: 74 kPa. $p_i = 60$ kPa

Die Mittelwertanalyse der Maximaldrücke (Druckspitzen) der jeweils sechs Wiederholungen führt zu folgenden Ergebnissen. Das Gummibandlaufwerk mit 113 kN und einer Aufstandsfläche von ca. 18.300 cm² verfügt mit 62 kPa über den niedrigsten rechnerischen Kontaktflächendruck. Die Mittelwerte der maximalen Bodendrücke aus den sechs Wiederholungen sind in Abb. 58 dargestellt und bestätigten den Trend des ausgewählten Messgraphen.

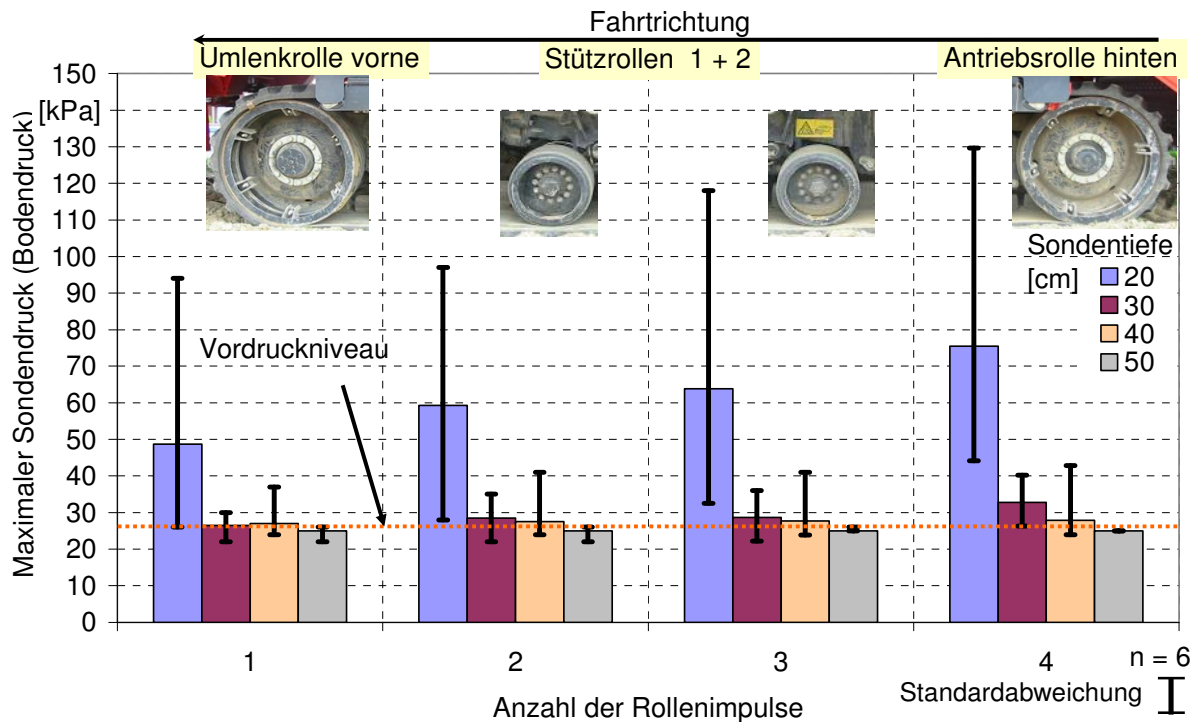


Abb. 58: Mittlere maximale Bodendrücke unter den Laufwerksrollen des Gummibandlaufwerkes, Last 113 kN

Die Mittelwerte der maximalen Bodendrücke sind den jeweiligen Rollen des Gummibandlaufwerkes über die Tiefe zugeordnet. Die Mittelwertbildung des Bodendruckes unter allen Laufwerksrollen in 20 cm Bodentiefe ergab 62 kPa, was dem rechnerisch mittleren Kontaktflächendruck von $0,62 \text{ kg/cm}^2$ (= 62 kPa) entspricht. Damit lag der Wert unter den beiden Luftreifenvarianten. Zwischen den Messtiefen von 20 auf 30 cm war ein Druckabbau von durchschnittlich 47 % festzustellen. Dabei reduzierte sich der Druck unter den ersten drei Rollen nahezu auf das eingestellte Vordruckniveau (22 – 27 kPa). In den Tiefen 30 und 40 cm konnte eine Reduzierung auf niedrigem Niveau beobachtet werden. In 50 cm wurde der eingestellte Vordruck (22 bis 27 kPa) von keiner der sechs Wiederholungen überschritten. Der maximale Bodendruck zwischen der ersten und den folgenden Rollen verhielt sich analog dem exemplarischen Messgraphen, in dem der maximale Bodendruck bis zur vierten Laufwerksrolle anstieg. Unter der Antriebsrolle (hinten) wurden in den Tiefen 20 – 40 cm im Durchschnitt die höchsten Werte gemessen. Unter der Umlenkrolle (vorne) im Mittel die geringsten. Die Drücke unter den beiden Tragrollen in der Mitte lagen dazwischen.

Beim Luftreifen 1050/50 R32 mit 51,5 kN Last war ein Reifeninnendruck von 70 kPa (nach Reifentabelle) eingestellt. Der Luftreifen erreichte im Feld eine Kontaktfläche von ca. 7.400 cm^2 . Daraus errechnete sich ein mittleren Kontaktflächendruck von $0,69 \text{ kg/cm}^2$ (= 69 kPa). Dieser war annähernd so hoch wie der Reifeninnendruck (p_i) mit 70 kPa. Der mittlere gemessene Bodendruck mit 91 kPa war bei der ersten Überrollung in einer Tiefe von 20 cm um

22 kPa höher als der rechnerisch mittlere Kontaktflächendruck sowie um 21 kPa höher als der Reifeninnendruck (Abb. 59).

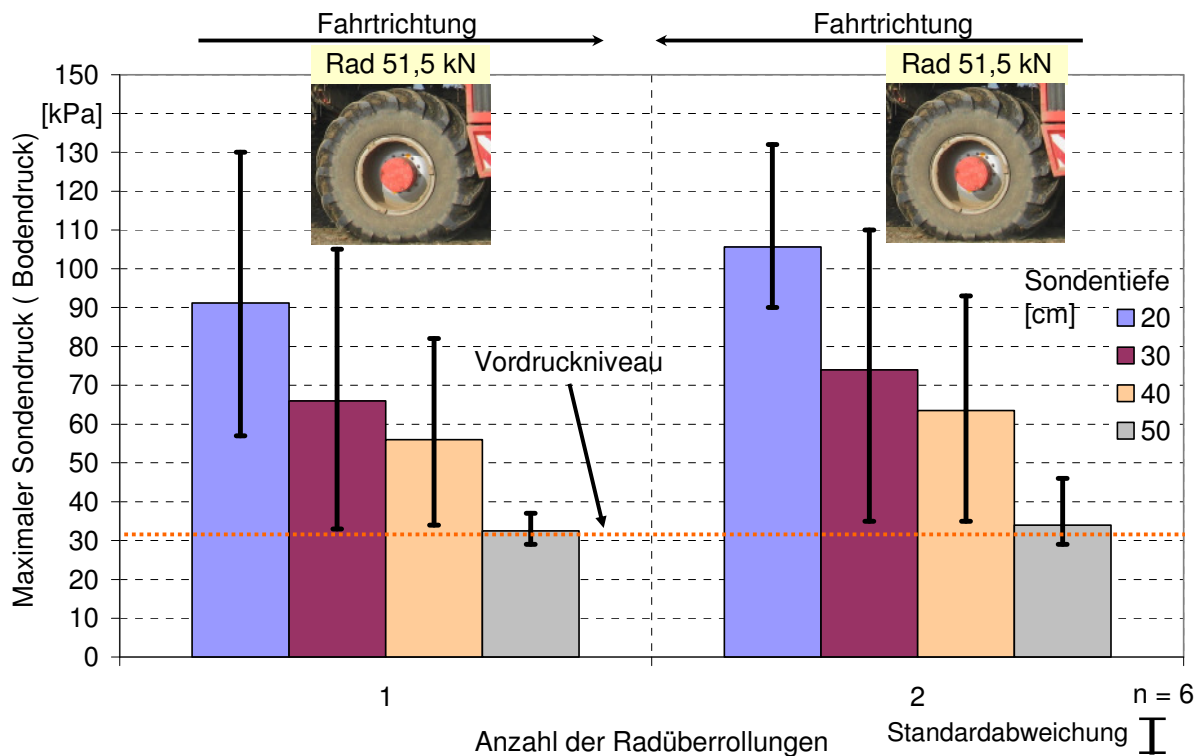


Abb. 59: Mittlere maximale Bodendrücke der zweifachen Überrollung mit einem Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 und einer Radlast von 51,5 kN, $p_i = 70$ kPa

Bei der zweiten Überrollung erhöhte sich der Wert in 20 cm Tiefe auf 106 kPa. In der Tiefe von 30 cm stieg der Bodendruck um durchschnittlich 8 kPa und in 40 cm um durchschnittlich 7,5 kPa. In 50 cm wurde in der zweiten Wiederholung ein Druckanstieg über dem Vordruckniveau von 37 kPa bei der ersten Überrollung gemessen sowie ein Anstieg auf 46 kPa beim zweiten Impuls. Bei den übrigen fünf Wiederholungen wurde kein Druckanstieg über dem Vordruck beobachtet. Bei der vierfachen Überrollung mit einem Reifen der Dimension 540/65 R28 und einer Radlast von 23,5 kN wurde der höchste rechnerische Kontaktflächendruck von $0,74 \text{ kg/cm}^2$ (= 74 kPa) ermittelt. Der höchste Druckabbau fand zwischen 20 und 30 cm Tiefe statt (Abb. 60). Durchschnittlich nahm der Bodendruck von 20 auf 30 cm um 38 % ab.

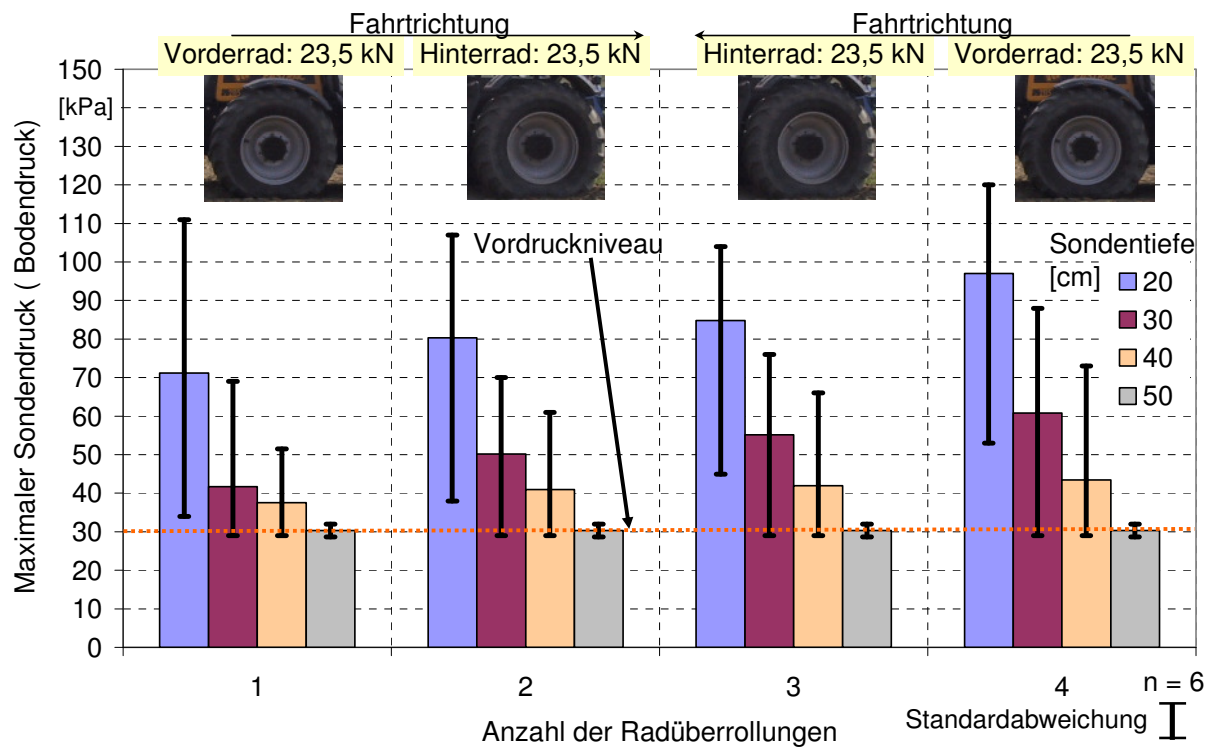


Abb. 60: Mittlere maximale Bodendrücke der vierfachen Überrollung mit einem Radialreifen der Dimension 540/65 R28 und einer Radlast von 23,5 kN, $p_i = 60$ kPa

Der höchste Bodendruck lag bei der ersten Überrollung mit dem Reifen der Größe 540/65 R28 bei 71 kPa annähernd auf dem Niveau des berechneten Kontaktflächendruckes. Mit jeder zusätzlichen Überrollung der Messstelle war ein Anstieg des Bodendrucks in den Messtiefen 20 – 40 cm festzustellen. In 50 cm Tiefe wurde das eingestellte Vordruckniveau bei keiner der sechs Wiederholungen überschritten.

Zwischen der jeweils ersten und den folgenden Radüberrollungen sowie bei der Überrollung der einzelnen Gummibandlaufwerksrollen wurde eine Zunahme der maximalen Bodendrücke festgestellt. Dieser Effekt konnte besonders in der obersten Messtiefe von 20 cm beobachtet werden. Der Anstieg der maximalen Bodendrücke bei den Belastungsvarianten mit mehrfacher Überrollung ist in Abb. 61 für die beiden Messtiefen 20 und 40 cm dargestellt. Bei der zweifachen Radüberrollung mit 51,5 kN wurde in beiden Messtiefen ein linearer Anstieg durch den zusätzlichen Belastungsimpuls festgestellt. Die Steigung der Gerade in 40 cm Tiefe verringerte sich gegenüber der in 20 cm. Die vier Belastungsimpulse der Radüberrollung mit 23,5 kN und die vier Belastungsimpulse aus der Gummibandlaufwerksüberrollung zeigten in 20 cm Tiefe nahezu ein identisches Bild, wobei das durchschnittliche Druckniveau beim Gummibandlaufwerk gegenüber der vierfachen Überrollung mit dem Rad der Dimension 540/65 R28 und einer Last 23,5 kN um ca. 20 kPa niedriger lag.

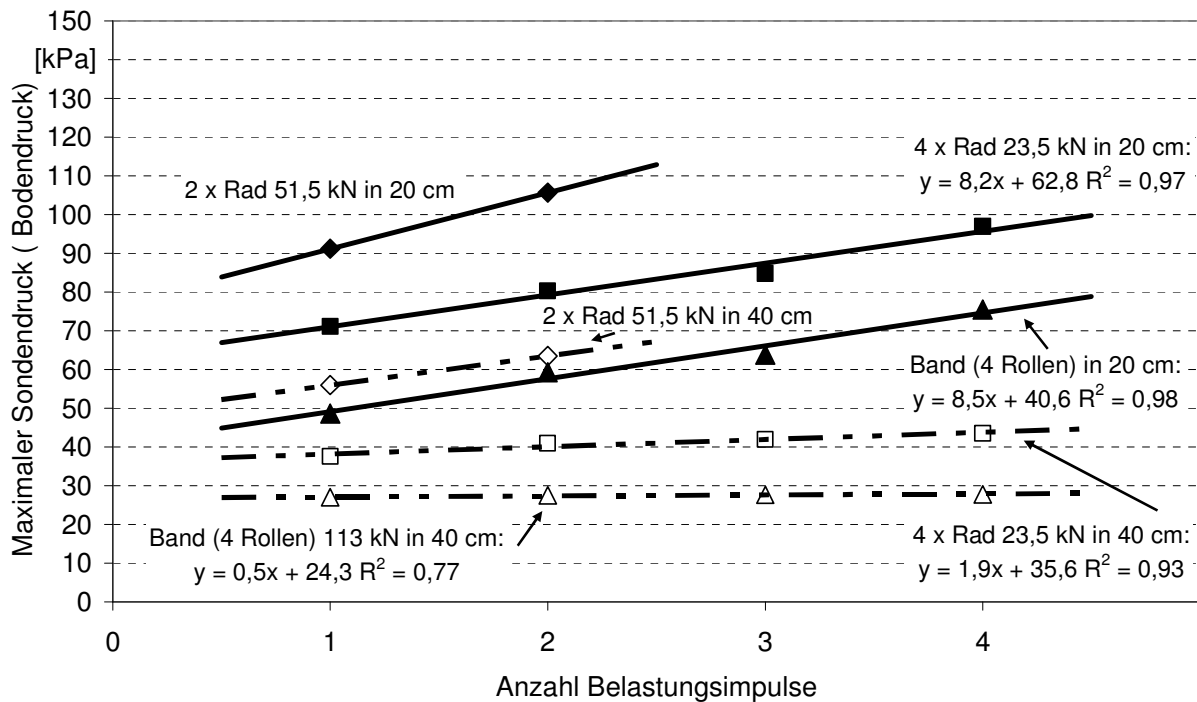


Abb. 61: Vergleich der Trendlinien der Überrollungssituationen in 20 und 40 cm Bodentiefe

In der Messtiefe von 40 cm flachte die Gerade der Gummibandlaufwerksimpulse (Band) gegenüber der vierfachen Überrollung mit dem Rad der Dimension 540/65 R28 und einer Last von 23,5 kN deutlicher ab. Das Bestimmtheitsmaß betrug beim Gummibandlaufwerk in 40 cm $R^2 = 0,77$ gegenüber $R^2 = 0,93$ beim vierfachen Radimpuls mit 23,5 kN. Neben dem Druckanstieg bei jedem zusätzlichen Überrollungsimpuls wurde ein differenzierter Druckabbau mit zunehmender Tiefe unter den verschiedenen Fahrwerken festgestellt.

Wie bereits beschrieben wurde beim Rad mit der Dimension 1050/50 R32 und einer Last von 51,5 kN, bei der zweiten Wiederholung in einer Tiefe von 50 cm, ein maximaler Bodendruck gemessen, der über dem eingestellten Vordruckniveau lag. Bei allen anderen Messungen konnte in dieser Tiefe kein maximaler Bodendruck beobachtet werden, der über dem eingestellten Vordruckniveau lag. Folglich baute sich der Bodendruck bis in 50 cm Tiefe nahezu vollständig auf das jeweils eingestellte Vordruckniveau ab.

Das Diagramm in Abb. 62 stellt den Druckverlauf der drei Belastungsvarianten dar. Als Werte werden die gemittelten maximalen Bodendrücke der sechs Wiederholungen nach dem jeweils letzten Überrollungsimpuls dargestellt. Alle drei Varianten grenzten sich hinsichtlich des Ausgangsniveaus in 20 cm Tiefe und der Abbaurrate über die Messtiefen voneinander ab.

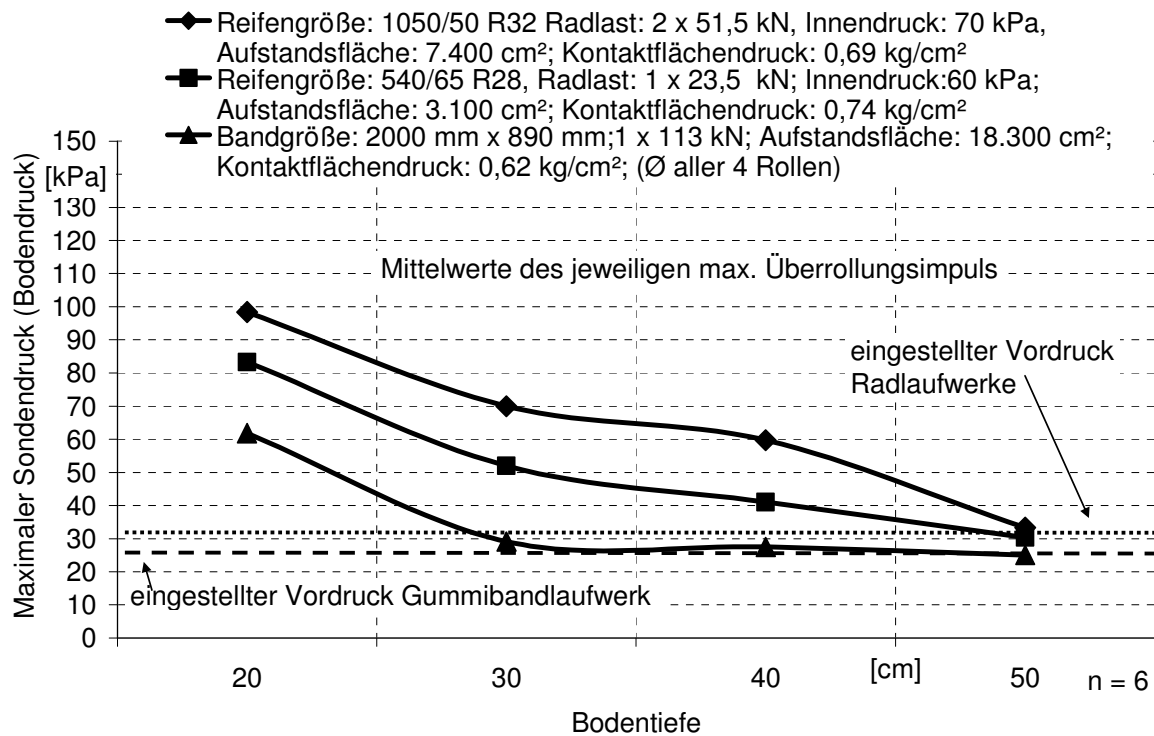


Abb. 62: Gemittelte Verläufe der Druckspitzen über die Messtiefen der jeweils letzten Überrollung (durch Rad bzw. Laufwerksrolle)

Die gemessenen mittleren Bodendrücke in einer Tiefe von 20 cm lagen bei den Luftreifen über den nach Herstellerangaben eingestellten Reifeninnendrücken. Die negative Steigung der jeweiligen Kurvenverläufe gibt Aufschluss über den Druckabbau in den Tiefen. Grundsätzlich sind sich die vierfache Überrollung mit dem Rad der Größe 540/65 R28 und der Last 23,5 kN sowie die Überrollung mit dem Gummibandlaufwerk sehr ähnlich. Unterschiedlich waren die durchschnittlichen maximalen Bodendrücke, die unter dem Gummibandlaufwerk in den Tiefen 20 – 40 cm auf einem niedrigeren Niveau lagen. Zum Vergleich des Druckabbaus über die Tiefe wurde die Differenz der mittleren maximalen Drücke zwischen den Tiefen von 20 auf 30 cm, von 30 auf 40 cm und von 40 auf 50 cm gebildet. Der Druckabbau mit P-Diff (Differenzdruck) ist in Abb. 63 dargestellt. Die Differenzdrücke wurden nach dem jeweils letzten Belastungsimpuls ermittelt.

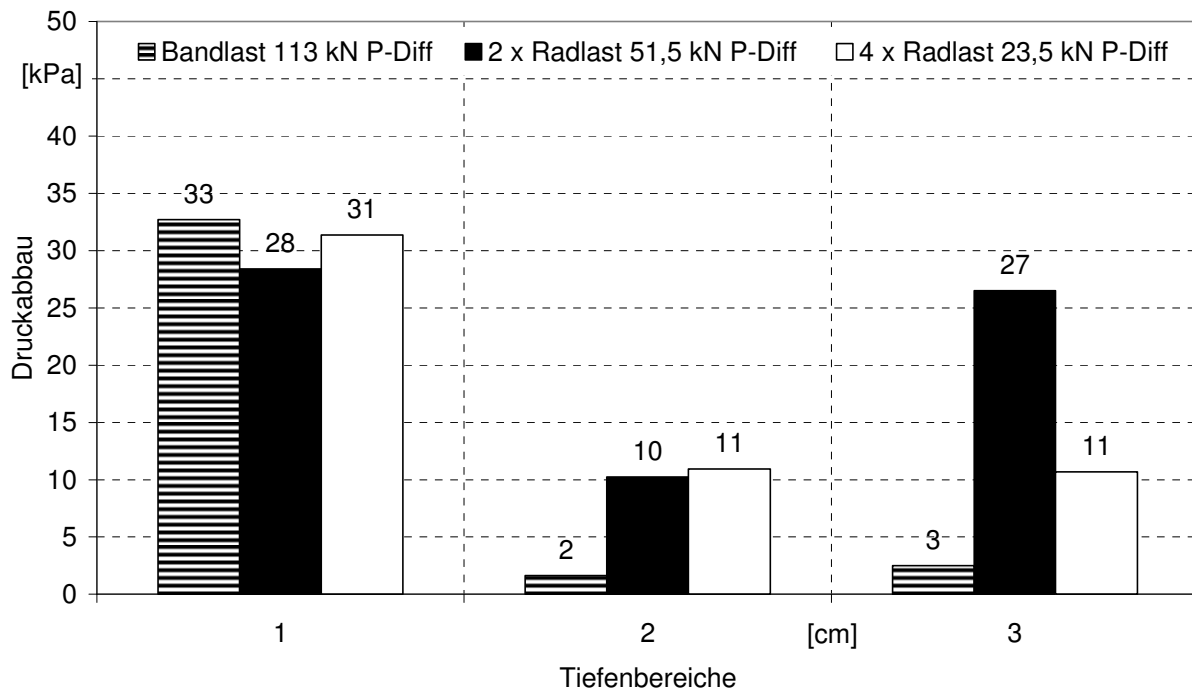


Abb. 63: Druckabbau der drei Belastungsvarianten über die Bodentiefe

Unter der zweifachen Überrollung mit dem Rad der Dimension 1050/50 R32 und einer Last von 51,5 kN wurde zwischen 30 und 40 cm durchschnittlich 28 kPa Druck abgebaut. Unter dem Rad mit der Dimension 540/65 R28 und einer Last von 23,5 kN bei vierfachen Überrollung sowie unter dem Gummibandlaufwerk mit 113 kN wurde der höchste Druckabbau zwischen 20 und 30 cm festgestellt. Unter dem Gummibandlaufwerk betrug der Abbau 33 kPa und lag damit höher als bei den Radfahrwerken in dieser Tiefe.

Im Bereich von 30 auf 40 cm baute sich bei den Radfahrwerken der Bodendruck um 10 bzw. 11 kPa ab. Beim Gummibandlaufwerk mit 113 kN Last war der Druckabbau mit 2 kPa am niedrigsten. Der Druckabbau nach zweimaliger Überrollung mit dem Rad der Größe 1050/50 R32 und der Last von 51,5 kN war mit 27 kPa in einer Tiefe von 40 auf 50 cm ähnlich hoch wie in der Tiefe 20 auf 30 cm. Unter dem Rad der Größe 540/65 R28 mit 23,5 kN Radlast bei vierfacher Überrollung wurde in der Tiefe von 40 auf 50 cm der Bodendruck bis auf das Vordruckniveau abgebaut. Wie in der Tiefe 30 auf 40 cm lag die Reduktion bei 11 kPa. Der maximale Bodendruck unter dem Gummibandlaufwerk mit 113 kN Last erreichte in 40 cm Tiefe annähernd das Vordruckniveau. Die Reduktion auf den gemessenen Vordruck in 50 cm Tiefe betrug 3 kPa. Ein Vergleich der gemessenen Bodendrücke, der vorgegebenen Reifeninnendrücke und der kalkulierten mittleren Kontaktflächendrücke ergab, dass sich diese z. T. ähneln. Diese Vergleichbarkeit ist in Abb. 64 dargestellt. Verglichen werden die gemessenen und eingestellten Drücke der Fahrwerke.

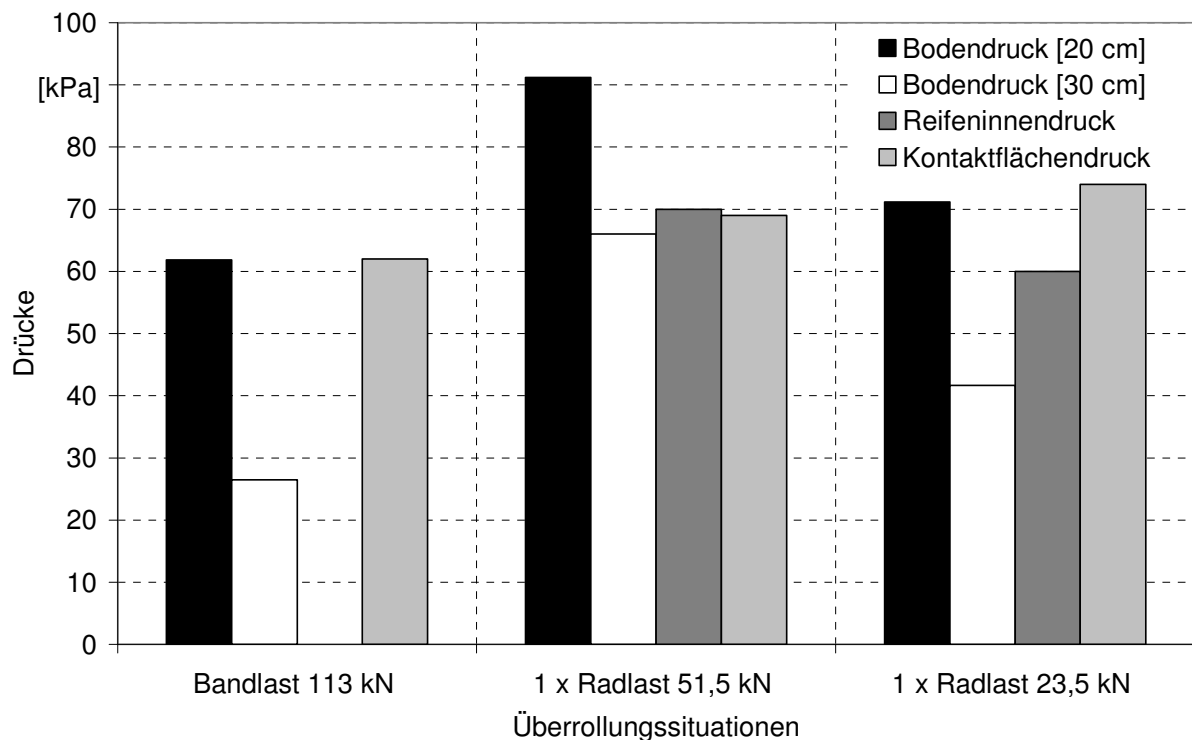


Abb. 64: Vergleich von Bodendruck (Tiefe 20 und 30 cm), Kontaktflächendruck und Reifeninnendruck der jeweiligen Fahrwerke

Bei der einmaligen Überrollung mit dem Reifen der Größe 1050/50 R32 und der Last 51,5 kN sind der gemessene Bodendruck in 30 cm Tiefe, der vorgegebene Reifeninnendruck und der rechnerische Kontaktflächendruck identisch. Der maximale Bodendruck in 20 cm Tiefe überstieg alle anderen Drücke dieser Überrollungssituation um mehr als 20 kPa. Bei der einfachen Überfahrt mit dem Reifen 540/65 R28 und einer Radlast von 23,5 kN, war der maximale Bodendruck mit 71 kPa in der Messtiefe 20 cm ähnlich dem mittleren Kontaktflächendruck. Beide gemessenen Drücke überstiegen den Reifeninnendruck um mehr als 10 kPa. Der Bodendruck in 30 cm Tiefe lag um 20 kPa unter den anderen Drücken dieser Überrollungssituation. Das Gummibandlaufwerk mit 113 kN Last erreichte in der Tiefe 20 cm (Durchschnitt aller Rollenimpulse) den maximalen Bodendruck des errechneten mittleren Kontaktflächendruckes. In der Tiefe 30 cm verringerte sich der maximale Bodendruck um mehr als die Hälfte zur ersten Messtiefe und zum rechnerischen mittleren Kontaktflächendruck.

6.4.1 Analyse der Restdrücke

Zusätzlich zur dynamischen Druckmessung während der Überfahrt, durch die sich die relativen Unterschiede beschreiben lassen, ist von Interesse, welche Überrollungssituationen bleibende Veränderungen im Boden hinterlassen, was ein Indiz für eine plastische Verformung darstellt. Bei der Bodendruckmessung mit den Schlauchdrucksonden ist eine Verformung gegeben, wenn der Enddruck nach der Belastung auf einem höheren Niveau bleibt als

der eingestellte Vordruck und dieses Niveau „dauerhaft“ beibehält. Nachfolgend werden diese Druckerhöhungen als positive Restdrücke bezeichnet. In Abb. 65 sind die Restdrücke nach der jeweils letzten Überrollung durch einen Luftreifen bzw. der letzten Gummibandlaufwerksrolle dargestellt.

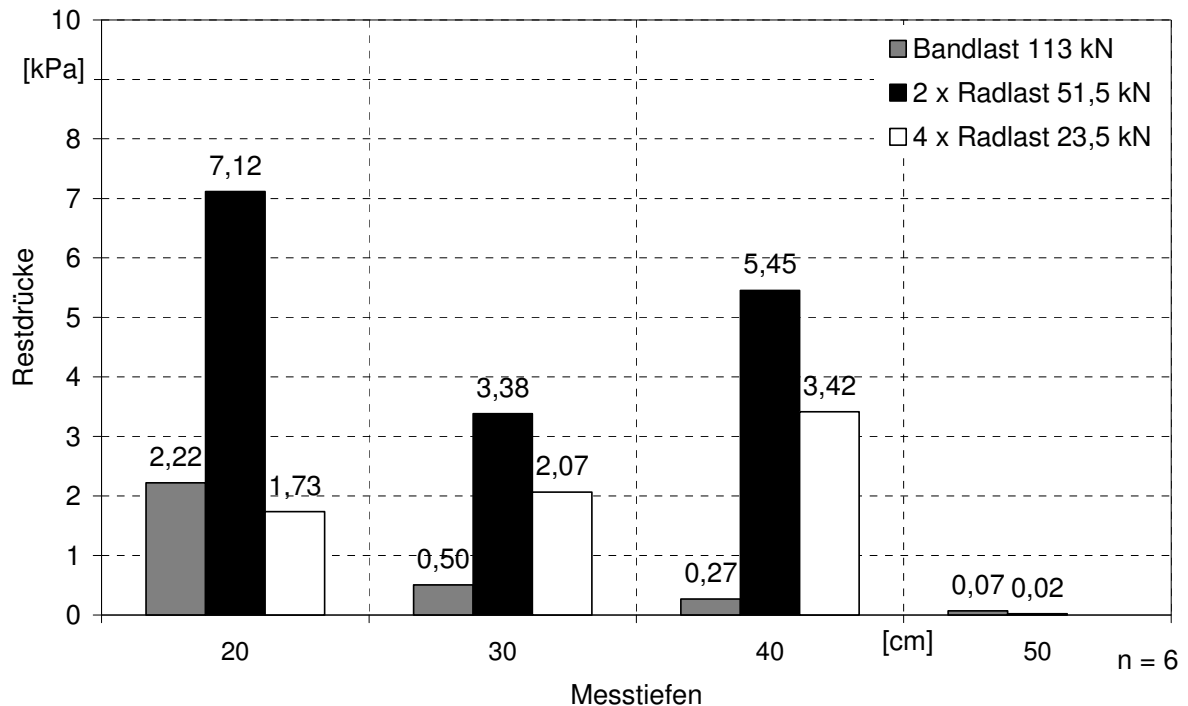


Abb. 65: Gemessene Restdrücke nach der jeweils letzten Überrollung durch Luftreifen oder das Antriebsrad des Gummibandlaufwerkes

Die Messung wurde bis maximal eine Minute nach der jeweiligen Überfahrt fortgeführt, so dass eine längerfristige Entspannung (Erholung) des Bodens nicht berücksichtigt werden konnte. Der Luftreifen mit der Dimension 1050/50 R32 und der Last von 51,5 kN hinterließ im Oberboden den höchsten Restdruck. In 30 cm Tiefe lagen alle drei Belastungsvarianten auf annähernd demselben Niveau. In der dritten Tiefe von 40 cm wurde der höchste Restdruck von der vierfachen Überrollung durch den Luftreifen mit der Dimension 540/65 R28 und der Last 23,5 kN erzeugt. In der Messtiefe 50 cm verblieb von keiner der Belastungsvarianten ein positiver Restdruck.

6.4.2 Dynamische Druckmessung unter Einbeziehung der Belastungsdauer

Die mit der dynamischen Druckmessung erfassten Daten (Bodendruck [kPa]) wurden wie in Kapitel 5.4.3.2 beschrieben nach Druckklassen sortiert und die jeweilige Belastungsdauer ermittelt. Diese sind in der Tab. 38 im Anhang dargestellt und wurden mit der Formel des GMPw [Gl. 5.3] berechnet. Die Ergebnisse der neuen Art der Bodendruckanalyse unter Einbeziehung der Belastungsdauer ist in Abb. 66 dargestellt.

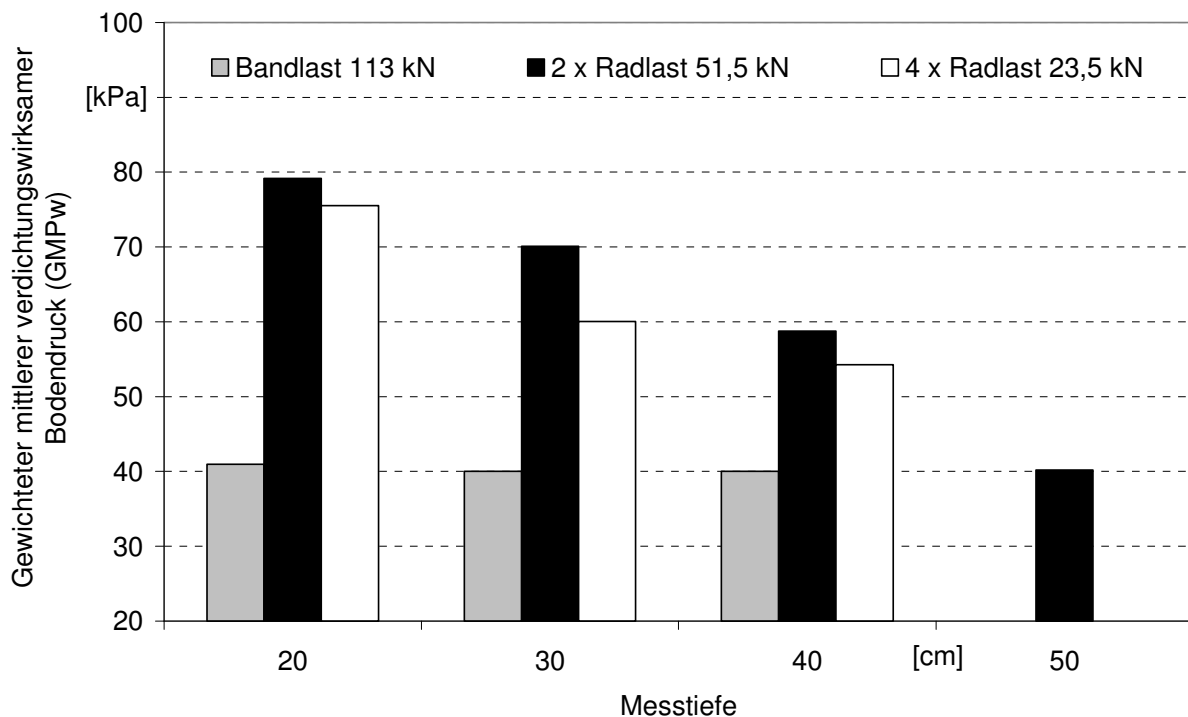


Abb. 66: Darstellung des „gewichteten mittleren verdichtungswirksamen Bodendruckes“ (GMPw) über die Messtiefen

In den Versuchen erzielte das Gummibandlaufwerk die niedrigsten Belastungswerte. Von den unterschiedlichen Radfahrwerken erreichte die vierfache Überrollung des Rades mit der Dimension 540/65 R28 und 23,5 kN Last einen niedrigeren gewichteten mittleren verdichtungswirksamen Bodendruck (GMPw) als die zweifache Überrollung mit dem Rad der Dimension 1050/50 R32 mit 51,5 kN Last. Die Analyse der Bodenbelastung mittels GMPw-Formel konnte in der vierten Messtiefe (50 cm) ausschließlich bei der zweifachen Überrollung mit dem Rad der Dimension 1050/55 R32 mit 51,5 kN Last einen verdichtungswirksamen Druck nachgewiesen. Dieser wurde durch die beiden Messwerte, die über dem eingestellten Vordruck der zweiten Wiederholung lagen verursacht.

6.5 Eindringwiderstands- und Spurtiefenmessung

Der mit dem Konuspenetrometer gemessene vertikale Eindringwiderstand ist eine Möglichkeit zum Vergleich der Bodendichte und Bodenverformung zwischen Ausgangs- und Endsituation. Bei einer Anzahl von 30 Einzelmesswerten je Überrollungssituation und sechs Feldwiederholungen war bei der Auswertung eine Differenzierung zwischen befahrenen und unbefahrenen Boden festzustellen. Zusätzlich konnten zwischen den einzelnen Überrollungssituationen Unterschiede beobachtet werden. In Abb. 67 sind die Eindringwiderstände aller Überrollungssituationen dargestellt.

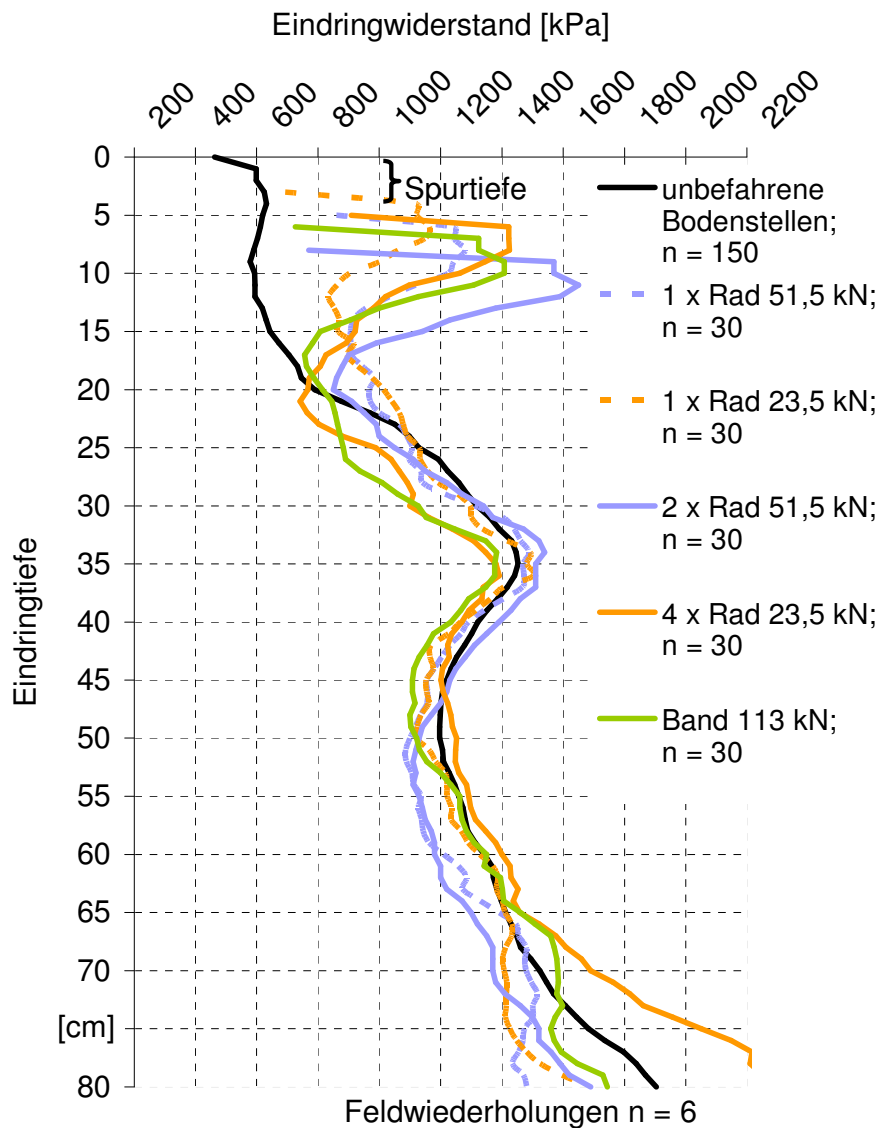


Abb. 67: Eindringwiderstände der einzelnen fünf Belastungsvarianten

Im Bereich von 0 – 20 cm Bodentiefe sind die unterschiedlichen Befahrungsmuster differenzierbar zuordenbar. Unterhalb von 20 cm laufen die Messkurven der befahrenen mit der Kurve der unbefahrenen zusammen. Durch das Befahren wurde bei jeder Variante eine Verformung des Bodens bis in 20 cm Tiefe erzeugt, die sich durch erhöhte Eindringwiderstände und in unterschiedlich tiefe Spuren widerspiegeln. In der oberen Bodenschicht (3 – 10 cm) war der Anstieg des Eindringwiderstandes durch das zweimalige Überrollen mit dem Luftreifen der Dimension 1050/50 R32 und 51,5 kN Last mit durchschnittlich 1.650 kPa in einer Tiefe von 11 cm am höchsten. Das Gummibandlaufwerk mit 113 kN Last und die vierfache Überrollung mit dem Luftreifen der Dimension 540/65 R28 mit 23,5 kN Last lagen mit durchschnittlich 1.425 kPa und 1.408 kPa in 8 cm und 10 cm Bodentiefe auf etwa gleichem Niveau. Die in 35 cm Tiefe detektierte Verdichtung war bei allen Belastungsvarianten ähnlich ausgeprägt. Unterhalb dieser Verdichtung, die als Pflugschle bezeichnet werden kann, wa-

ren die Kurvenverläufe bis in die maximale Messtiefe von 80 cm nahezu identisch. Keine der Überrollungssituationen wies einen statistisch differenzierbaren Widerstandsverlauf unterhalb der Krumbasis auf, wodurch eine Beeinflussung des Unterbodens durch die Versuchsanstellung bedingten Belastungen mit dieser Messmethode auszuschließen war. Die Messkurven der jeweils einfachen Überrollung durch die Luftreifen der Dimension 1050/50 R32 mit 51,5 kN Last bzw. der Dimension 540/65 R28 mit 23,5 kN Last zeigen, dass durch Steigerung der Überrollungsintensität die maximalen Eindringwiderstände zunehmen. In Abb. 68 sind die maximalen Eindringwiderstände der drei Endüberrollungsvarianten dargestellt.

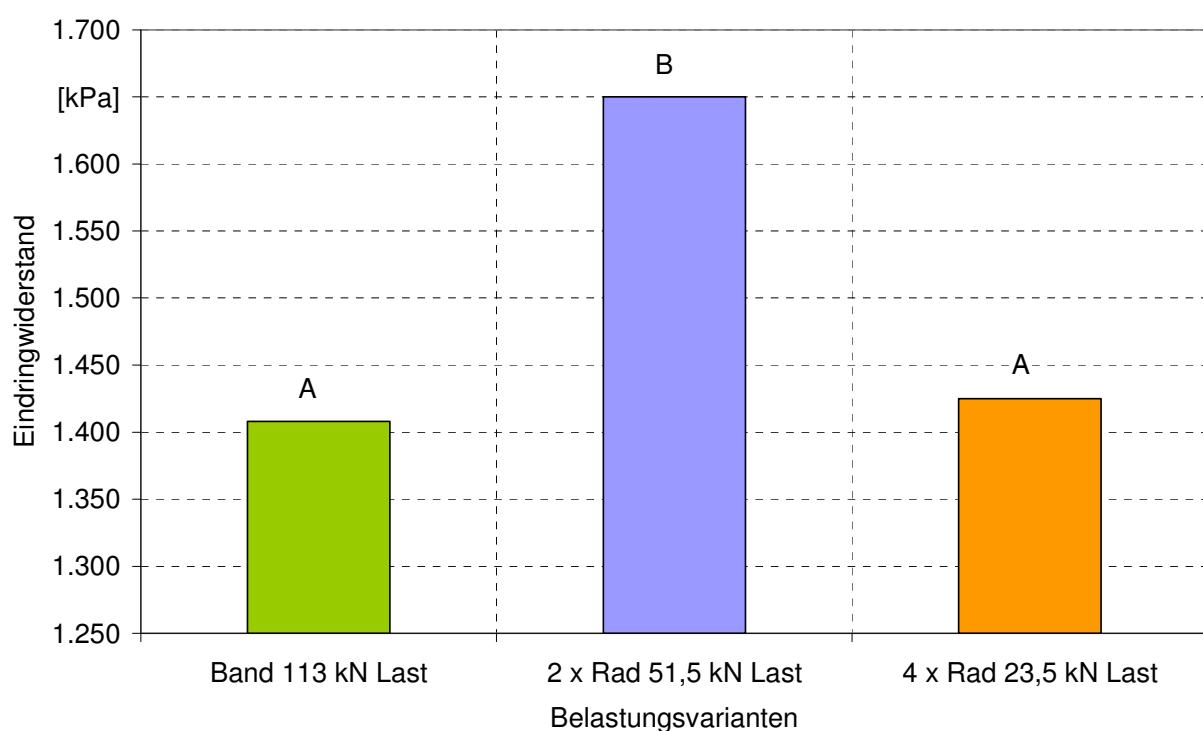


Abb. 68: Maximale Eindringwiderstände der drei Belastungsvarianten bis in einer Tiefe von 30 cm

Die maximalen Eindringwiderstände der drei Belastungsvarianten wurden auf Signifikanz untersucht und sind in Tab. 25 zusammengefasst dargestellt. Das Gummibandlaufwerk mit einer Last von 113 kN und die vierfache Überrollung des Luftreifens der Dimension 540/65 R28 mit 23,5 kN Last unterscheiden sich hinsichtlich des Eindringwiderstandes nicht signifikant voneinander. Die zweifache Überrollung des Luftreifens der Dimension 1050/50 R32 mit 51,5 kN Last erreichte einen signifikant höheren Eindringwiderstand als die beiden anderen Varianten.

Tab. 25: Signifikanz der maximalen Eindringwiderstände zwischen den drei Varianten mit der Gesamtbelastung von ca. 100 kN je Bodenstelle (ns = nicht signifikant; *s = signifikant bei $\alpha < 5\%$; **s = signifikant bei $\alpha < 1\%$)

Signifikanz der max. Eindringwiderstände	Gummibandlaufwerk 2.000 x 890 mm (113 kN)	2 x Rad 1050/50 R32 (2 x 51,5 kN)
4 x Rad 540/65 R28 (4 x 23,5 kN)	n.s	*s
2 x Rad 1050/50 R32 (2 x 51,5 kN)	**s	

Eine ähnliche Tendenz war bei der Bodensetzung (Spurtiefenmessung) festzustellen. Die höchste Bodensetzung mit einer Spurtiefe von 8 cm war bei der zweifachen Überrollung des Luftreifens mit der Dimension 1050/50 R32 und der Last von 51,5 kN zu finden, gefolgt vom Gummibandlaufwerk mit 113 kN Last von 6 cm und der vierfachen Überrollung durch den Luftreifen der Dimension 540/65 R28 mit 23,5 kN Last von 5 cm. In Tab. 26 sind die fünf Überrollungssituationen sowie die verursachten Spurtiefen und die maximalen Eindringwiderstände mit Tiefenangabe in einem Bereich von 0 – 30 cm, in dem statistisch veränderte Werte nachgewiesen wurden, dargestellt.

Tab. 26: Zusammenfassung der Spurtiefe und der maximalen Eindringwiderstände mit Tiefenangabe aller Überrollungssituationen

Überrollungssituation	Bereifung Fahrwerk	Radlast/ Bandlast Einsatz 19.04.06 [kN]	Maximale Spurtiefe [cm]	Maximaler Eindringwiderstand in Bodentiefe (0 – 30 cm) [kPa]
1. 1-fach Band	890 x 2000 mm	1 x 113	6	1.408 (in 10 cm)
2. 1-fach Rad	1 x 1050/50 R32	1 x 51,5	5	1.280 (in 8 cm)
3. 2-fach Rad	2 x 1050/50 R32	2 x 51,5	8	1.650 (in 11 cm)
4. 1-fach Rad	1 x 540/65 R28	1 x 23,5	3	1.163 (in 6 cm)
5. 4-fach Rad	4 x 540/65 R28	4 x 23,5	5	1.425 (in 8 cm)

6.6 Bodenphysikalische Untersuchungen

Die Messung der bodenphysikalischen Parameter mittels Stechzylindermethode sollte zusätzlich zur Eindringwiderstandsmessung Aufschluss über die Bodenverformung im Ober- und Unterboden geben. Die Daten der Schlauchdrucksondenmessung, welche die Bodenbeanspruchung als Relativwerte wiedergeben, sollten in Verbindung mit den Werten der Stechzylinderproben Aufschluss darüber geben, in wie weit sich die Beanspruchung tatsächlich auf die Bodenstruktur auswirkt. Durch die Versuchsanstellung konnten auf engem Raum

die befahrenen und die daneben liegenden unbefahrenen Bereiche jeder Parzelle der sechs Feldwiederholungen beprobt und analysiert werden. Es wurden die Veränderungen der bodenphysikalischen Eigenschaften wie Luftkapazität (LK), Gesamtporenvolumen (GPV), pneumatische Leitfähigkeit (PL) und Trockenrohdichte (TRD) erfasst. Bei der bodenphysikalischen Untersuchung wird die Porengrößenverteilung analysiert. Leitparameter ist die Luftkapazität (LK) also der Anteil an weiten Grobporen, die bei einer Verformung des Bodens als erstes geringer wird und deshalb die aussagekräftigste Information für den Gefügestand des Ackerbodens darstellt (Werner und Paul, 1999). Aus diesem Grund wurde die grafische Darstellung der bodenphysikalischen Ergebnisse auf die Luftkapazität und die pneumatische Leitfähigkeit beschränkt. Bei diesen beiden Parametern sind der Informationsgehalt und die Messunterschiede am größten. Der bei der LK festgestellte Trend lässt sich bei allen Parametern in ähnlicher Weise wieder finden. Alle Parameter sind in Tab. 27 dargestellt. Beim Parameter TRD erhöht sich der Wert im Falle einer Verdichtung. Bei den Werten LK und GPV nehmen die Werte ab.

Tab. 27: Zusammenfassung der nicht grafisch dargestellten bodenphysikalischen Parameter

Überrollungs-situation	Tiefe [cm]	Parameter		GPV [Vol.-%]	LK [Vol.-%]
		Status	TRD [g/cm ³]		
1 x 113 kN Band (2.000 x 890 mm)	15 – 20	unbefahren	1,45	44,7	14,2
		befahren	1,57	39,8	6,2
	38 – 43	unbefahren	1,59	40,0	8,2
		befahren	1,60	39,0	8,5
1 x 51,5 kN (1050/50R32)	15 – 20	unbefahren	1,52	41,8	10,3
		befahren	1,59	38,8	6,0
	38 – 43	unbefahren	1,56	41,2	9,5
		befahren	1,55	41,1	8,7
2 x 51,5 kN (1050/50R32)	15 – 20	unbefahren	1,46	44,3	14,0
		befahren	1,59	38,9	5,9
	38 – 43	unbefahren	1,55	41,1	9,1
		befahren	1,56	40,8	8,6
1 x 23,5 kN (540/65R28)	15 – 20	unbefahren	1,48	43,5	12,7
		befahren	1,57	39,5	6,7
	38 – 43	unbefahren	1,58	40,6	9,5
		befahren	1,56	40,4	8,5
4 x 23,5 kN (540/65R28)	15 – 20	unbefahren	1,51,5	41,9	10,5
		befahren	1,55	40,3	7,1
	38 – 43	unbefahren	1,56	40,9	9,4
		befahren	1,51,5	42,2	10,2

TRD = Trockenrohdichte; GPV = Gesamtporenvolumen; LK = Luftkapazität

In Abb. 69 ist die Luftkapazitäten der unbefahrenen Bereiche der fünf Überrollungssituationen für die Krume (Oberboden) dargestellt. Zwischen den einzelnen Überrollungssituationen sind Unterschiede festzustellen, die offensichtlich der Vorbelastung des Feldes geschuldet

sind. Bei allen Varianten lag die Luftkapazität über dem von Werner und Paul (1999) für diese Bodentiefe festgelegten Richtwert von mindestens 8 %. Bei den Varianten 2 und 5 lag das Ausgangsniveau auf der unbefahrenen Bodenstelle tiefer als bei den Situationen 1, 3 und 4.

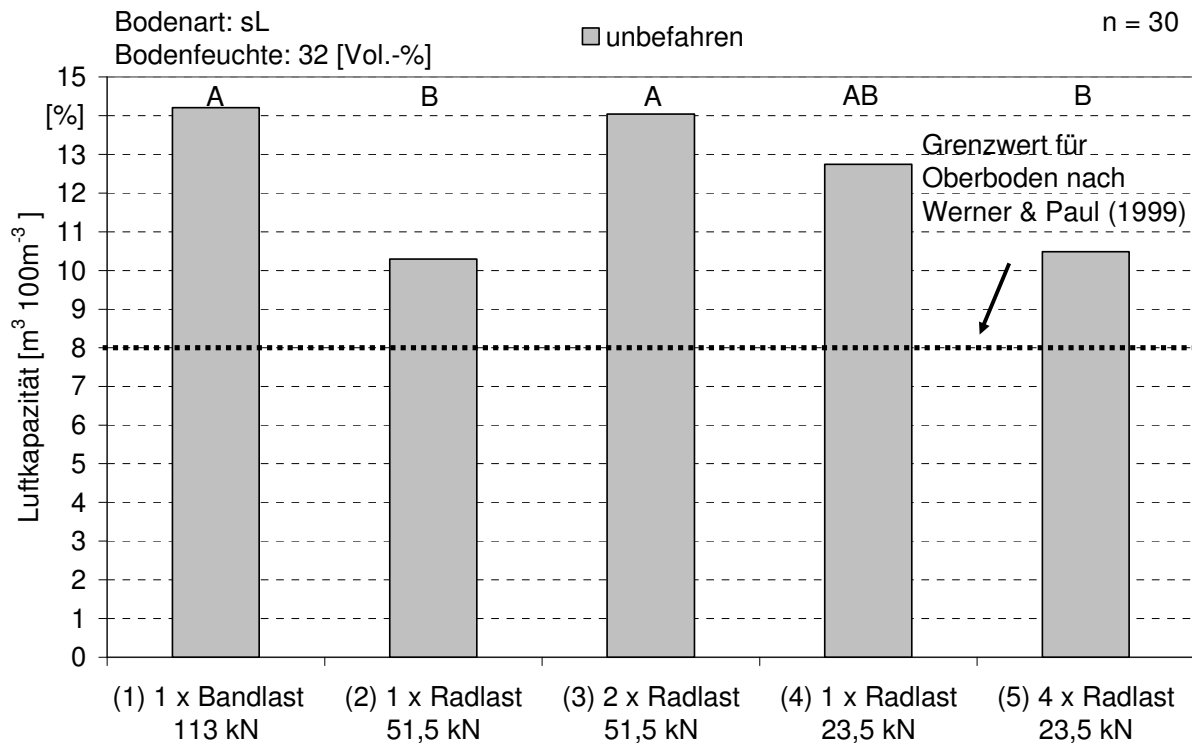


Abb. 69: Luftkapazität im Oberboden (15 – 20 cm) der unbefahrenen Beprobungsbereiche

Das Netzdiagramm in Abb. 70 veranschaulicht die Streuung der LK in der Krume der Ausgangssituation (nicht befahrenen Beprobungsstellen). Die Sektoren mit den Ziffern 111111 bis 555555 beinhalten die Überrollungssituationen 1 bis 5.

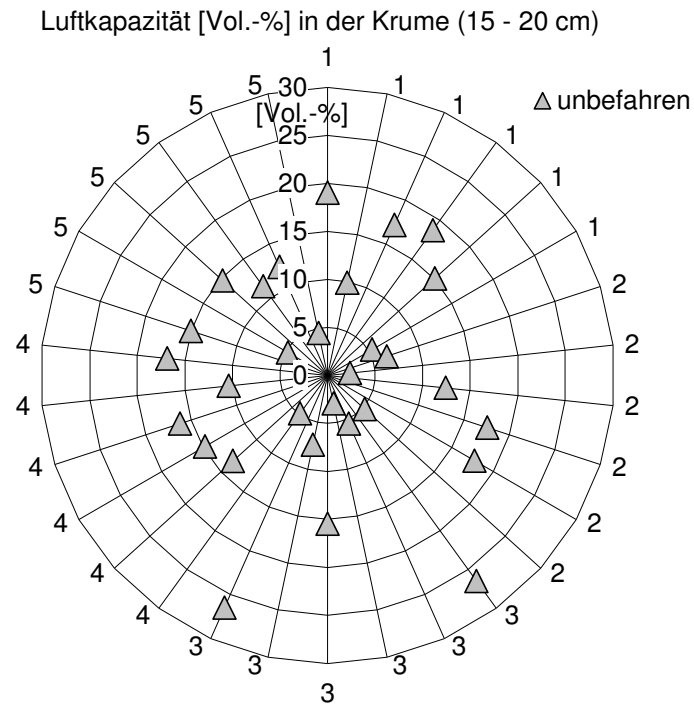


Abb. 70: LK im Krumbereich der fünf Überrollungssituationen (1 – 5) aus den jeweils sechs Beprobungsnestern je Wiederholung

Die dargestellten LK-Werte sind Mittelwerte aus 30 Einzelwerten (je 5 Stechringe pro Probenahmenest sowie 6fach wiederholt). Die Verteilung der Werte lässt auf heterogene Porengrößen und -verteilungen im Oberboden schließen. Im zweiten Beprobungshorizont (38 – 43 cm), der in Abb. 71 dargestellt ist, lagen die Ausgangswerte der LK auf einem einheitlicheren Niveau, was auf homogenere Bedingungen schließen lässt. Die Werte lagen mit 8 - 9,5 Vol.-% LK über der für diese Tiefe als kritisch beschriebene Grenze von 5 Vol.-% LK nach Werner und Paul (1999).

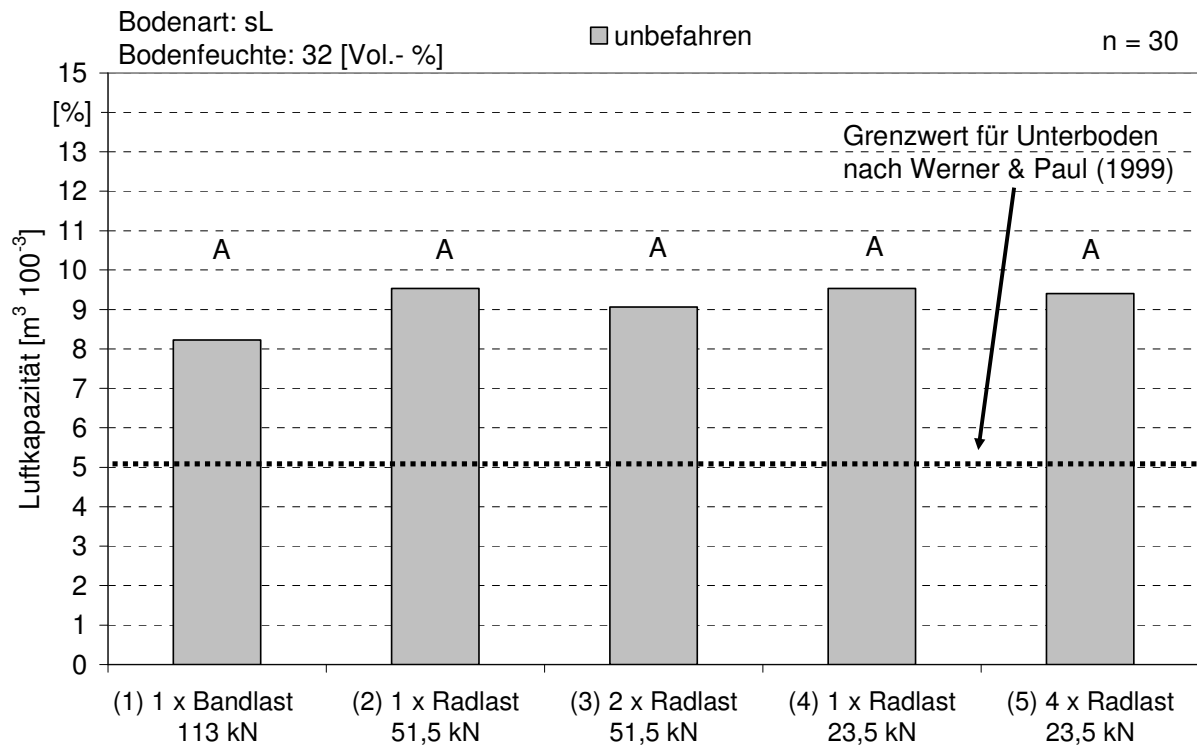


Abb. 71: Ausgangsniveau der unbefahrenen Beprobungsstellen im Unterboden (38 – 43 cm)

Das Diagramm für den Unterboden in Abb. 72 zeigt im Gegensatz zum Krumbereich eine geringere Streuung der fünf Überrollungssituationen vor der Befahrung und ein für den Unterboden typisches niedrigeres LK-Niveau.

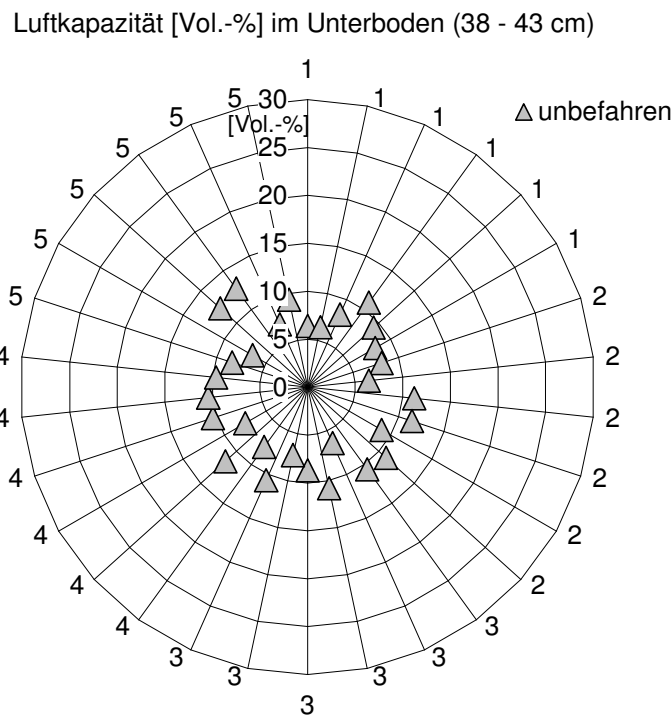


Abb. 72: LK im Unterboden der fünf Überrollungssituationen aus den jeweils sechs Beprobungsnestern je Wiederholung vor der Befahrung

In Abb. 73 sind die Luftkapazitäten der fünf Überrollungssituationen für den Bereich der Krume (15 – 20 cm) den direkt benachbarten unbefahrenen Probennahmestellen gegenübergestellt.

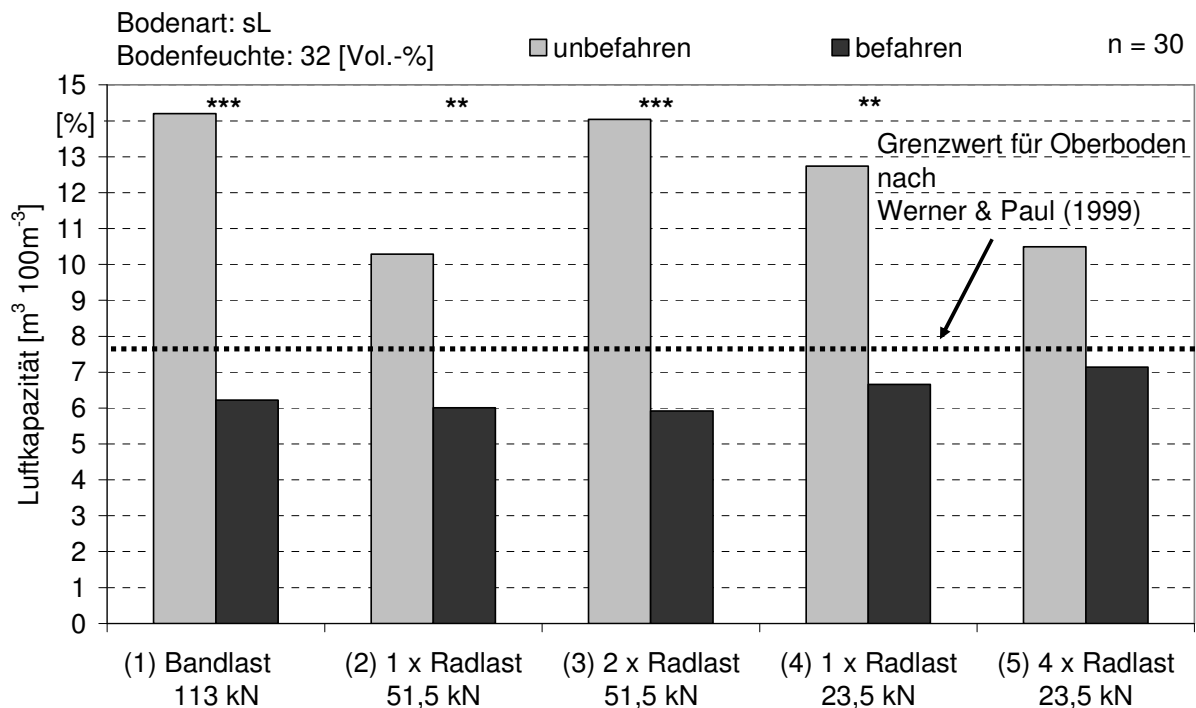


Abb. 73: Vergleich des Parameters Luftkapazität im befahrenen und unbefahrenen Bereich der Krume bei sechsfacher Feldwiederholung (ns = nicht signifikant; *s = signifikant bei $\alpha < 5\%$; **s = signifikant bei $\alpha < 1\%$)

Bei den Situationen 1 – 4 wurden hoch signifikante Veränderungen zwischen der unbefahrenen und der befahrenen Bodenstelle festgestellt. Bei der fünften Überrollungssituation (4 x Radlast 23,5 kN) wurde trotz einer gemessenen Reduktion der Luftkapazität keine Signifikanz erreicht. Mit jeder Befahrungsvariante wurde eine Reduzierung der Luftkapazität in der Tiefe von 15 – 20 cm erreicht. Zwischen den einzelnen Überrollungssituationen konnte nach der Befahrung keine Differenzierung festgestellt werden. Die Abnahme der LK im Krumenbereich nach der Befahrung wird im Diagramm der Abb. 74 verdeutlicht. Dieses zeigt, dass durch die Belastung aller fünf Überrollungssituationen eine Verschiebung der Mittelwerte hin zum Zentrum zu beobachten ist.

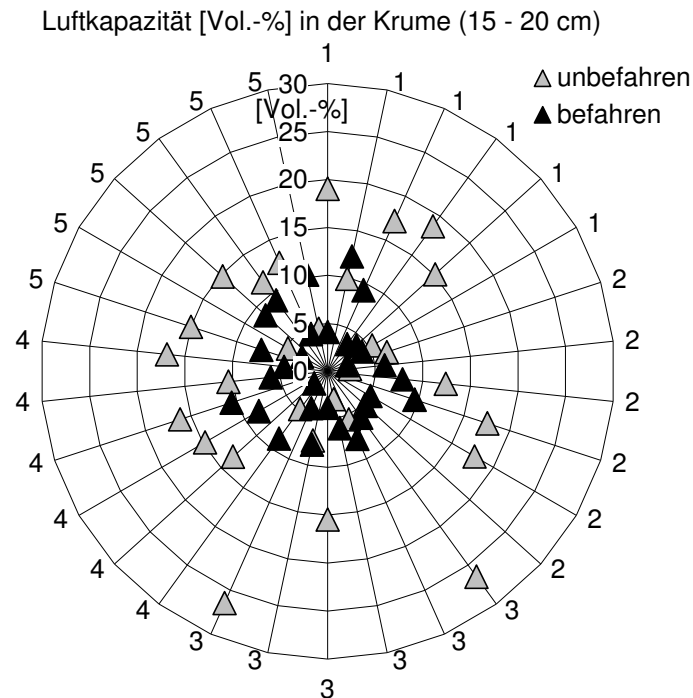


Abb. 74: Vergleich der LK der fünf Überrollungssituationen aus den sechs Beprobungspunkten der befahrenen und unbefahrenen Bereiche des Oberbodens

Die Mittelwerte der überrollten Bodenstellen zeigen gegenüber der unbefahrenen eine geringere Streuung auf. Die Gegenüberstellung der LK-Werte der unbefahrenen und befahrenen Bereiche in der Beprobungstiefe 38 – 43 cm ist in Abb. 75 dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass weder zwischen befahren und unbefahren, noch zwischen den Überrollungssituationen deutliche Unterschiede auftreten. Das Luftkapazitätsniveau blieb auf den befahrenen Stellen erhalten. In keiner Belastungsvariante konnten signifikante Veränderungen festgestellt werden.

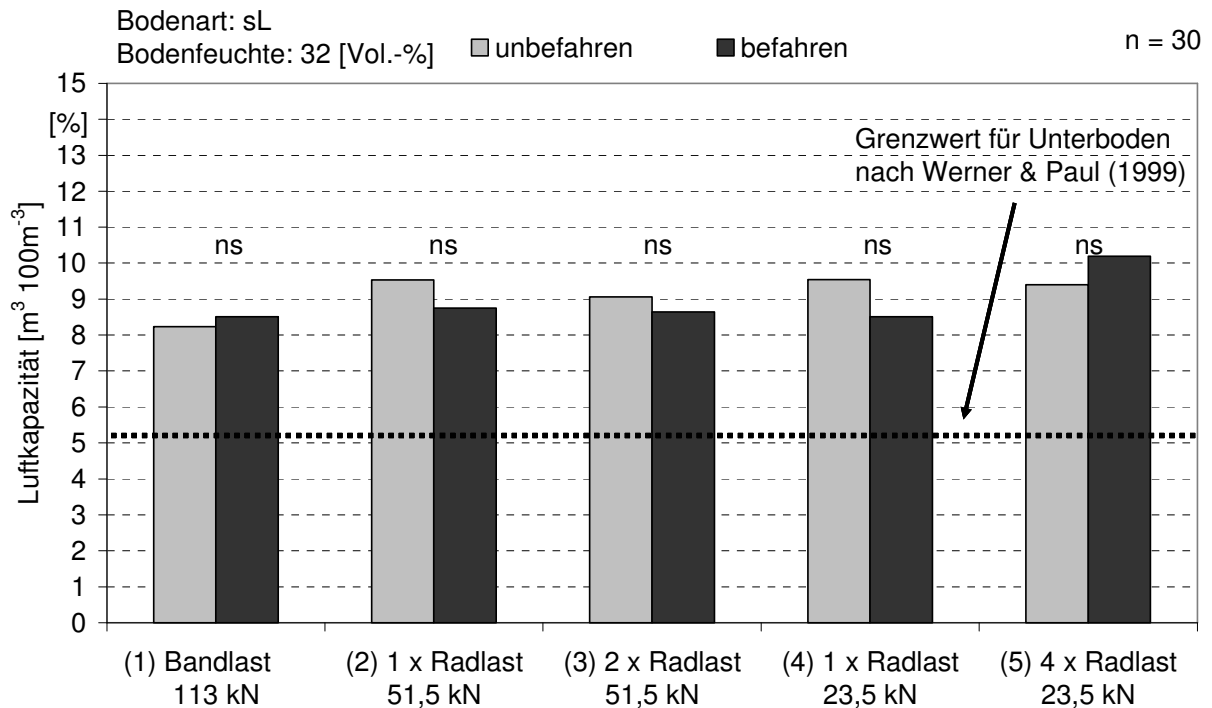


Abb. 75: Vergleich des Parameters Luftkapazität im befahrenen und unbefahrenen Bereich des Unterbodens (ns = nicht signifikant; *s = signifikant bei $\alpha < 5\%$; **s = signifikant bei $\alpha < 1\%$)

Der Vergleich der Mittelwerte aller beprobten Nester im Netzdiagramm der Abb. 76 verdeutlicht, dass die LK-Werte im Unterboden dichter beieinander liegen. Dies gilt für die befahrenen und unbefahrenen Bodenstellen sowie für die unterschiedlichen Überrollungssituationen. Die Streuung der Mittelwerte ist im Unterboden geringer als im Oberboden.

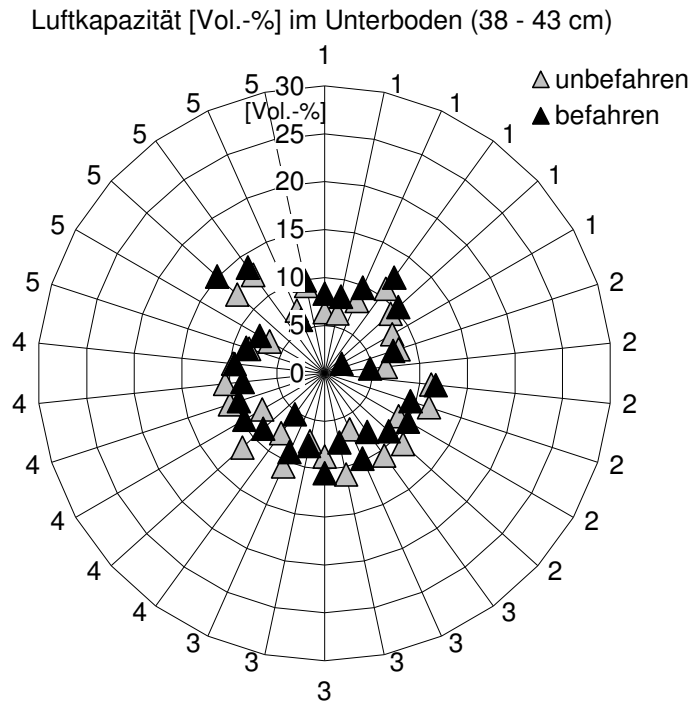


Abb. 76: Vergleich der Streuung des Parameters LK der fünf Überrollungssituationen aus den jeweils sechs Beprobungsnestern, neben und im überrollten Bereich des Unterbodens

Die pneumatische Luftleitfähigkeit als Maß der Luftaustauschmöglichkeit und Luftdurchdringbarkeit des Bodens (PL-Wert) zeigt ein identisches Verhalten wie der LK-Wert. Jede Überrollungsvariante bewirkte auf den befahrenen Parzellen im Bereich 15 – 20 cm eine signifikante Abnahme der PL-Werte. Die Ausgangswerte der fünf Überrollungssituationen, die in Abb. 77 für diese Tiefe dargestellt sind, sind mit einer Standardabweichung von 3,3 als heterogen zu bezeichnen. Die Ausgangswerte der Probenahme waren neben der einfachen Überrollung durch den Luftreifen mit der Dimension 1050/50 R32 und einer Last von 51,5 kN mit durchschnittlich $3,6 \text{ cm/s}^{-1}$ am niedrigsten. Die Überrollungssituationen unterschieden sich auf den befahrenen Parzellen nicht signifikant voneinander. Die zuvor beschriebene Streuung der Ausgangswerte war nicht mehr vorhanden, was eine Standardabweichung von 0,4 auf den befahrenen Pazellen belegte. Alle Überrollungssituationen verringerten die Leitfähigkeit auf weniger als 2 cm/s^{-1} . Der höchste Wert mit $1,8 \text{ cm/s}^{-1}$ wurde nach der einfachen Überrollung mit dem Luftreifen der Dimension 1050/50 R32 und 51,5 kN Last gemessen.

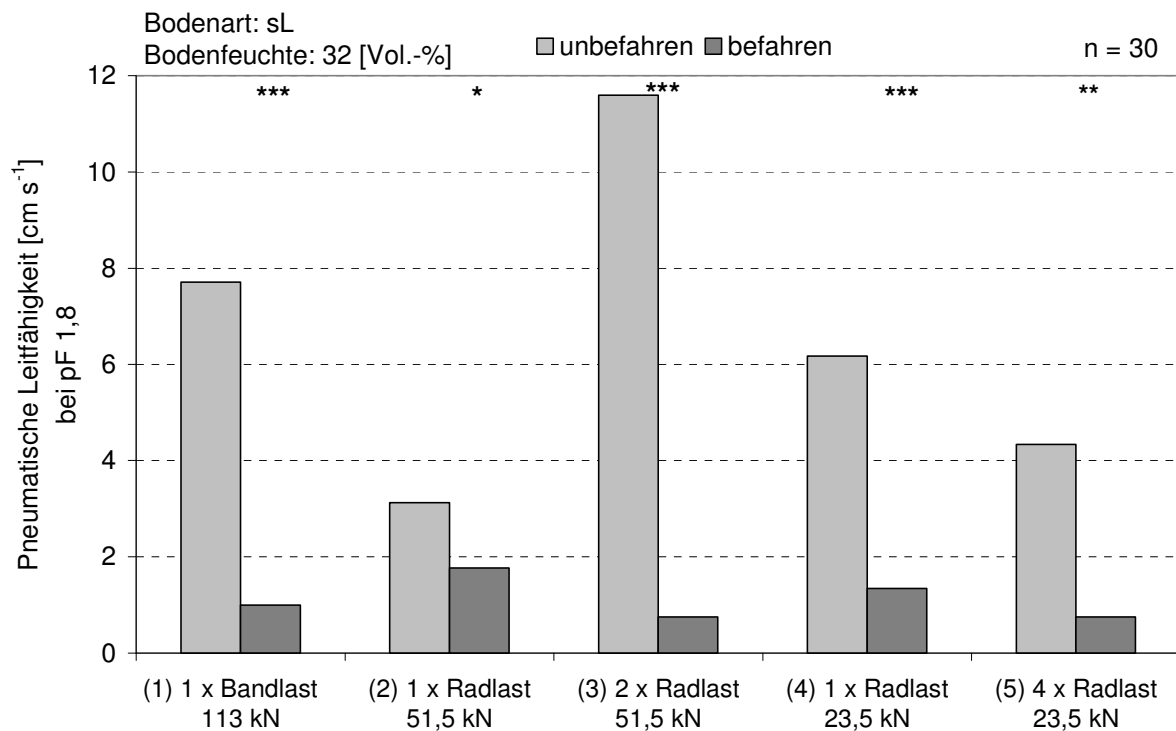


Abb. 77: Gegenüberstellung der pneumatischen Leitfähigkeit zwischen befahrenen und unbefahrenen Beprobungsstellen im Krumbereich (15 -20 cm) (ns = nicht signifikant; *s = signifikant bei $\alpha < 5\%$; **s = signifikant bei $\alpha < 1\%$)

Die pneumatische Leitfähigkeit in der zweiten Tiefe (38 – 43 cm) ist in Abb. 78 dargestellt. Zwischen den befahrenen und unbefahrenen Überrollungsparzellen gab es keine signifikanten Unterschiede. Die Überrollungssituationen 3 und 4 zeigten auf den unbefahrenen und befahrenen Parzellen die niedrigsten Werte mit ca. 4 cm/s^{-1} . Die höchsten Werte wurden auf den unbefahrenen und befahrenen Parzellen der vierfachen Überrollung mit dem Luftreifen der Dimension 540/65 R28 und der Last von 23,5 kN mit ca. 8 cm/s^{-1} gemessen. Die Standardabweichung zwischen den Überrollungssituationen lag auf den unbefahrenen Parzellen bei 1,4 und bei den befahrenen bei 1,7.

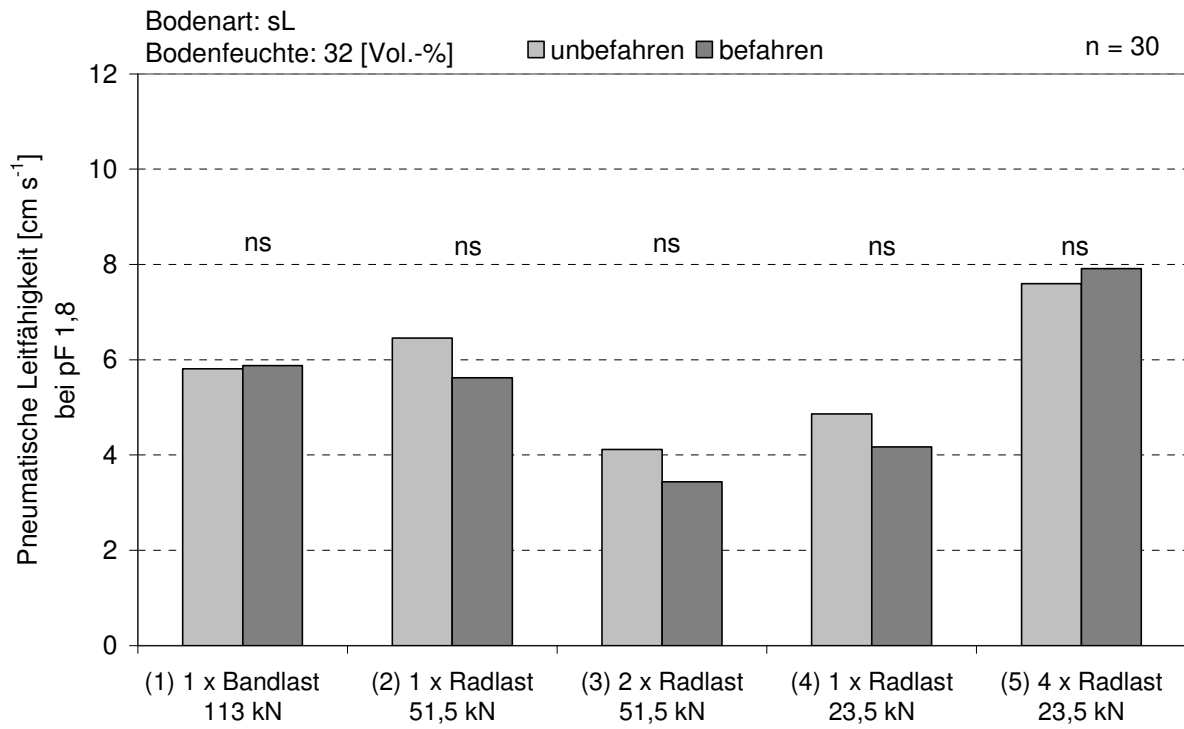


Abb. 78: Vergleich der pneumatischen Leitfähigkeit im Unterboden (38 – 43 cm) (ns = nicht signifikant; *s = signifikant bei $\alpha < 5\%$; **s = signifikant bei $\alpha < 1\%$)

7 Diskussion der Ergebnisse

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Messmethoden sowie die damit gewonnen Ergebnisse diskutiert und mit in der Literatur beschriebenen Ergebnissen verglichen.

7.1 Standortanalyse

Die Versuchsfläche wurde bis 2005 ortsüblich bewirtschaftet und dabei regelmäßig bis in eine Tiefe von 30 cm gepflügt und gelockert. In Tab. 28 sind die Ausgangsbodenparameter bei der Versuchsdurchführung für den Ober- und Unterboden dargestellt.

Tab. 28: Aufstellung der Mittelwerte verdichtungsrelevanter Bodenparameter auf den unbefahrenen Bodenstellen

Parameter Bodentiefe	TRD [g/cm³]	GPV [Vol.-%]	LK [Vol.-%]
15 – 20 cm	1,48	43,2	12,4
38 – 43 cm	1,57	40,8	9,2

TRD = Trockenrohddichte; GPV = Gesamtporenvolumen; LK = Luftkapazität

Der Krumbereich mit der vorherrschende Bodenart sandiger Lehm (sL) hatte eine Trockenrohddichte von 1,48 g/cm³. Dieser Wert ist nach Frielinghaus et al. (2001) und Czeratzki (1972) als mittel einzuschätzen. Das Gesamtporenvolumen war mit 43,2 Vol.-% in der Krume nach Czeratzki (1972) und Kuntze et al. (1988) ebenfalls im mittleren Bereich. Die Werte der Luftkapazität mit 12,4 Vol.-% sind nach Werner und Paul (1999) als hoch einzuschätzen. Der Unterboden (38 – 43 cm) weist erwartungsgemäß eine dichtere Lagerung auf als der Krumbereich. Die Luftkapazität lag mit 9,2 Vol.-% deutlich über der von Werner und Paul (1999) als kritisch bezeichneten Grenzwert von 5 Vol.-% in dieser Tiefe. Die höheren TRD- und GPV-Werte im Unterboden weist auf eine höhere Eigenfestigkeit hin, die in dieser Tiefe zu erwarten ist. Der durchschnittlich hohe Wert der Luftkapazität in der zweiten Tiefe weist auf einen nicht kritischen Verdichtungszustand hin.

Die Bodenfeuchte zum Zeitpunkt der Überrollungen entsprach mit durchschnittlich 30,6 Vol.-% im Bereich 15 - 20 cm und 31,0 Vol.-% in der Tiefe von 38 - 43 cm einer Auffüllung der Feldkapazität von 100 %. Aus den Daten der Stechzylinderbeprobung konnte eine homogene Verteilung der Bodenfeuchte festgestellt werden. Die feuchten Bedingungen stellen eine für die Bestellung im Frühjahr typische Situation dar. In der Abb. 79 ist der Eindringwiderstandsgraph für die nicht befahrenen Bodenstellen dargestellt. Dieser zeigt die Bereiche der regelmäßigen Bodenlockerung und die Bearbeitungstiefe auf. Die ab einer Tiefe von 33 bis 36 cm dichtere lagernde Bodenschicht stellt die Krumbasisverdichtung dar, die umgangssprachlich als „Pflugsohle“ bezeichnet wird.

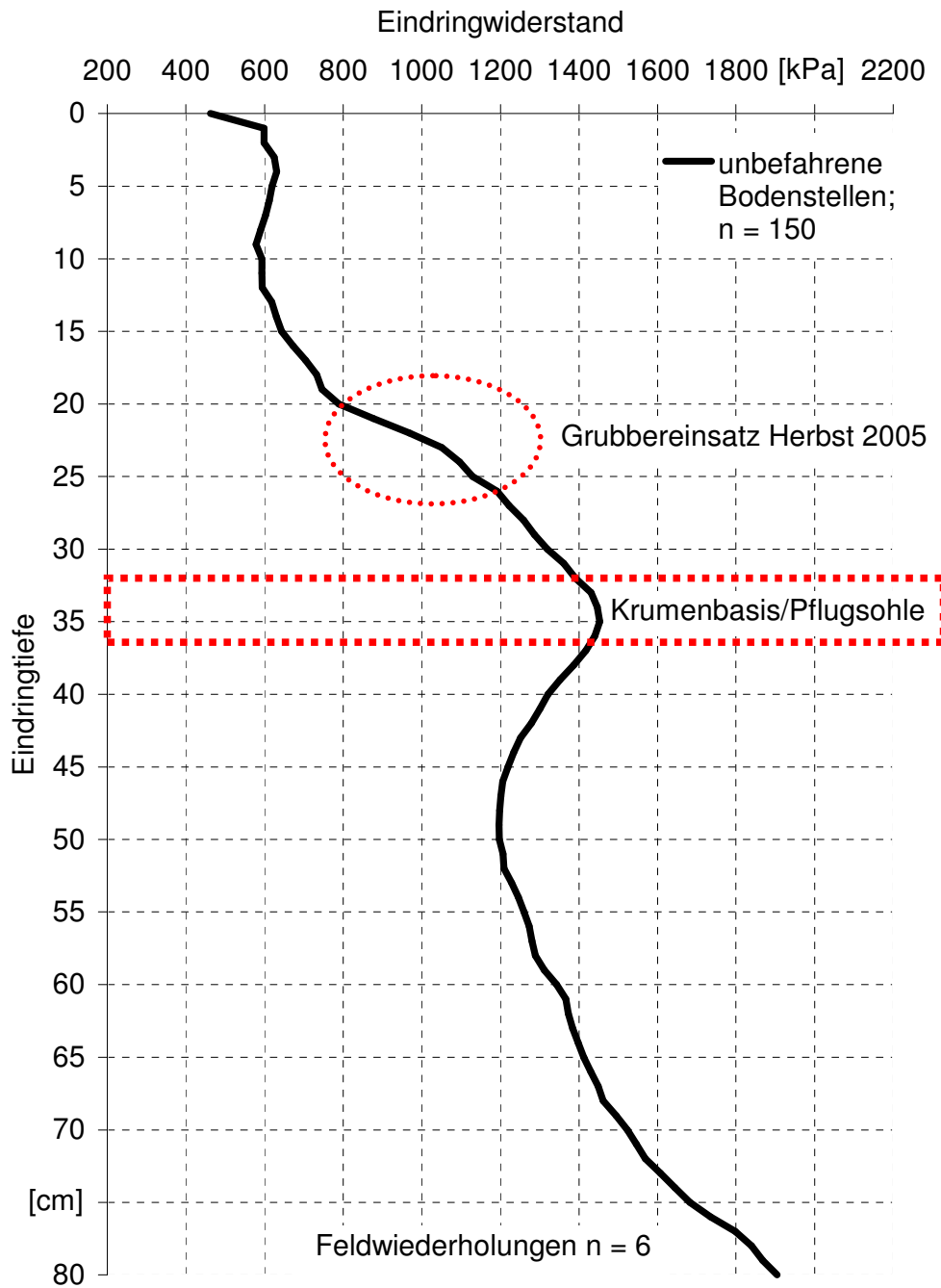


Abb. 79: Eindringwiderstandsmessung auf den nicht befahrenen Bodenstellen

Laut den Aufzeichnungen des Landwirts wurde in den Jahren mit Pflugeinsatz bis in eine Tiefe von 30 cm gelockert, wodurch die ermittelte Krumenbasis bestätigt wird. Die deutlich ansteigenden Eindringwiderstände im Bereich von 15 – 33 cm Bodentiefe können mit der letzten Lockerung nach Kartoffeln im Herbst 2005 erklärt werden. Dabei wurde die Fläche ca. 20 cm tief mit einem Grubber bearbeitet. Der mit einem roten Kreis markierte Bereich zwischen 20 und 25 cm, in dem ein schneller Anstieg des Eindringwiderstands beobachtet werden kann, wurde dabei nicht gelockert. Der Bereich verfestigte sich zusätzlich auf Grund der geringeren Eigenstabilität der vorangegangenen regelmäßigen Lockerung mit dem Pflug (Brunotte, 2007).

7.2 Fahrzeugparameter

Ziel des Versuches war es, eine Last von 100 kN mit unterschiedlicher Fahrwerkskonfigurationen in ein-, zwei und vierfacher Überfahrt auf dem Ackerboden abzustützen bzw. über den Boden zu bewegen. Da für diese Versuchsanstellung keine Laboranlagen wie z. B. eine Bodenrinne zur Verfügung stand, in der die Fahrwerke mit entsprechender Last beaufschlagt werden konnten, musste dies mit gewählten praxisüblichen Fahrwerken durchgeführt werden, wodurch Abweichungen bei den Lasten sowie der daraus resultierenden Fahrwerksparameter in Kauf genommen werden mussten. Mit dem Programm TASC wurde im Vorfeld eine erste Abschätzung der zu wählenden Fahrwerksdimensionen getroffen, um einen nach Möglichkeit einheitlichen rechnerisch mittlerer Kontaktflächendruck erreichen zu können.

7.2.1 Rad- und Laufwerkslasten

Der im Versuch gewählte großvolumige Radialreifen 1050/50 R32 mit einer Radlast von 51,5 kN und einem Reifeninnendruck von 70 kPa wird in der landwirtschaftlichen Praxis häufig mit der maximal technischen Radlast von ca. 120 kN bei 270 kPa belastet. Dabei wird der Leistungsbereich voll ausgeschöpft, wodurch sich die Reifen hinsichtlich ihrer Eigenschaften anders verhalten als im Versuch dargestellt. Das Verwiegen des KRB6 im Rahmen der Seligenstädter Zuckerrübenrodevorführung im Herbst 2006 (Demmel und Geischeder, 2007) belegte die maximal erreichbaren Fahrwerkslasten unter praxisüblichen Bedingungen. Die Gewichte der einzelnen Fahrwerke sind in Tab. 29 dargestellt.

Tab. 29: Gesamtgewichte und Radlasten von KRB6 mit gefülltem Bunker auf der Seligenstädter Maschinenvorführung 2006

Maschine	Gesamtgewicht	Band- / Reifendimension	Achs- bzw. Fahrwerkslast	Rechnerische Band-/ Radlast
KRB6 (Rau- penlaufwerk / Radachse)	540 kN	2000 x 890 mm 2 x 900/65 R32	320 kN (Raupen) 220 kN (Zwillingsrad)	160 kN Raupe 110 kN Reifen
KRB6 2achsige	430 kN	2 x 900/55 R32 2 x 1050/50 R32	130 kN 300 kN	65 kN 150 kN
KRB6 2achsige	430 kN	2 x 900/55 R32 2 x 1050/50 R32	140 kN 290 kN	70 kN 145 kN
KRB6 2achsige	420 kN	2 x 900/55 R32 2 x 1050/50 R32	130 kN 290 kN	65 kN 145 kN
KRB6 2achsige	410 kN	2 x 900/55 R32 2 x 1050/50 R32	120 kN 290 kN	65 kN 145 kN
KRB6 3achsige	570 kN	2 x 900/55 R32 2 x 1050/50 R32 2 x 1050/50 R25	110 kN 290 kN 170 kN	55 kN 145 kN 65 kN

Der ausgewählte Mittelsitztraktor war mit vier Radialreifen 540/65 R28 ausgestattet und nicht mit der ursprünglich vorgesehenen vier Radialreifen 620/70 R26. Dies hatte zur Folge, dass die Aufstandsfläche geringer ausfiel als simuliert. In Folge dessen ergab sich ein höherer Kontaktflächendruck. Durch die Ballastierung des Mittelsitztraktors mit Anbaugeräten in der Front- und Heckhydraulik wurde eine Gesamtlast von 95 kN erreicht, die 5 kN unter der angestrebten Last lag. Die Gewichtsverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse entsprach mit 49 % auf der Vorderachse und 51 % auf der Hinterachse annähernd der Vorgabe. In den Reifen der Größe 540/65 R28 Reifen wurden nach Angabe des Reifenherstellers der technisch niedrigste mögliche Reifeninnendruck von 60 kPa eingestellt.

7.2.2 Mittlerer Kontaktflächendruck

Bei der Berechnung des mittleren Kontaktflächendrucks aus Radlast und gemessener Aufstandsfläche bestätigte sich der höher als geplant ausfallende Kontaktflächendruck des am Traktor angebauten Reifens mit der Dimension 540/65 R28. Die tatsächlichen im Feld gemessenen und mit TASC 2.0 nach berechneten Lasten sind in Tab. 30 gegenübergestellt.




Tab. 30: Gegenüberstellung der gemessenen Radlasten und Aufstandsflächen der daraus berechneten mittleren Kontaktflächendrücken und den Simulationsergebnissen von TASC 2.0

Überrollungssituation	Bereifung Fahrwerk	Radlast/ Bandlast Einsatz 19.04.06 [kN]	Aufstandsfläche 19.04.06 [cm ²]	Mittlerer Kontaktflächendruck [kPa]	Aufstandsfläche (TASC 2.0) [cm ²]	Kontaktflächendruck (TASC 2.0) [kPa]
1. 1-fach Band	2.000 x 890 mm	1x113	18.300	62	17.800 (-2,7 %)	64 (+3,2 %)
2. 1-fach Rad	1 x 1050/50 R32	1 x 51,5	1 x 7.400	69	1 x 6.408 (-13 %)	79 (+14,5 %)
3. 2-fach Rad	2 x 1050/50 R32	2 x 51,5	2 x 7.400	69		
4. 1-fach Rad	1 x 540/65 R28	1 x 23,5	1 x 3.100	74	1 x 3.247 (+4,7 %)	71 (-4 %)
5. 4-fach Rad	4 x 540/65 R28	4 x 23,5	4 x 3.100	74		

Bei den Überrollungssituationen durch die Radialreifen mit der Dimension 540/65 R28 und einer Radlast von 23,5 kN, wurde der höchste Kontaktflächendruck mit 74 kPa ermittelt. Der geplante Kontaktflächendruck von 50 kPa konnte mit keinem der Fahrwerke erreicht werden, da außer den Gewichten auch die Kontaktflächen im Feld, nicht den theoretisch berechneten Dimensionen entsprachen. Mit dem Programm TASC 2.0 wurden bis auf die Variante mit dem Radialreifen 540/65 R28 geringere Kontaktflächen berechnet. Der größte Un-

terschied wurde beim Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 mit - 13 % festgestellt. Beim Gummibandlaufwerk war die Kontaktfläche von TASC 2.0 um 2,7 % kleiner und beim 540/65 R28 um 4,7 % größer. Die Kontaktflächendifferenz von - 13 % beim Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 zwischen Simulation und tatsächlicher Messung kann darauf zurückgeführt werden, dass sich unter Feldbedingungen der Reifen anders verhält als es die Simulation berechnet. Der Oberboden war zum Zeitpunkt des Befahrens weich, wodurch der Reifen tiefer einsinken konnte. Der Bodenzustand kann bei TASC 2.0 zur Berechnung der Druckausbreitung vorgewählt werden, wirkt sich jedoch nicht auf die zu berechnende Aufstandsfläche aus. Somit werden unter „weichen“ Bodenbedingungen tendenziell niedrigere Kontaktflächen ermittelt. Beim Reifen der Dimension 540/65 R28 war dies nicht der Fall. Hier war die simulierte Aufstandsfläche um 4,7 % höher als die im Feld gemessene. Diese Abweichung kann mit dem Einfluss des Bodenzustandes an der Messstelle und der Aufstandsflächenermittlung im Feld begründet werden. Zum Zeitpunkt der Feldmessung war die oberste Bodenschicht mit 5 – 10 cm abgetrocknet und tragfähig, so dass die Stollen des Radialreifens der Dimension 540/65 R28 mit 23,5 kN Last z. T. nicht komplett eingesunken sind und der Zwischenstollenbereich nicht ganzflächig aufgelegt ist. Die Bilder in Tab. 31 der umstreuten Aufstandsflächen verdeutlichen dies.

Tab. 31: Form und Größe der im Feld ermittelten Kontaktflächen

Überrol-lungssituation	Bereifung Fahrwerk	Radlast/ Bandlast Einsatz 19.04.06 [kN]	Aufstandsfläche 19.04.06 [cm ²]	Abgestreute Kontaktflächen 19.04.06
1-fach Band	2.000 x 890 mm	1 x 113	1 x 18.300	
1-fach Rad	1 x 1050/50 R32	1 x 51,5	1 x 7.400	
1-fach Rad	1 x 540/65 R28	1 x 23,5	1 x 3.100	

TASC 2.0 berücksichtigt beim Gummibandlaufwerk keine Aufstandsflächenunterschiede hinsichtlich Lastveränderungen, da dieses gegenüber einem Luftreifen als starr gilt und somit

kaum Aufstandsflächenveränderungen zu erwarten sind. Dies beweist der geringe Unterschied von -2,7 % zwischen Simulation und Felddaten.

Die mittleren rechnerischen Kontaktflächendrücke sind je nach Fahrwerk unterschiedlich zu bewerten. Untersuchungen der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft (z. B. Degrell, 2006) hinsichtlich der Druckverteilung unter verschiedenen Traktorenreifen mittels Drucksensormatten hatten eine heterogene Druckverteilung der aufstehenden Lauffläche gezeigt. In Abb. 80 ist die Druckverteilung über die Aufstandslänge von zwei Traktorreifen mit unterschiedlichem Reifeninnendrucken nach Degrell (2006) dargestellt.

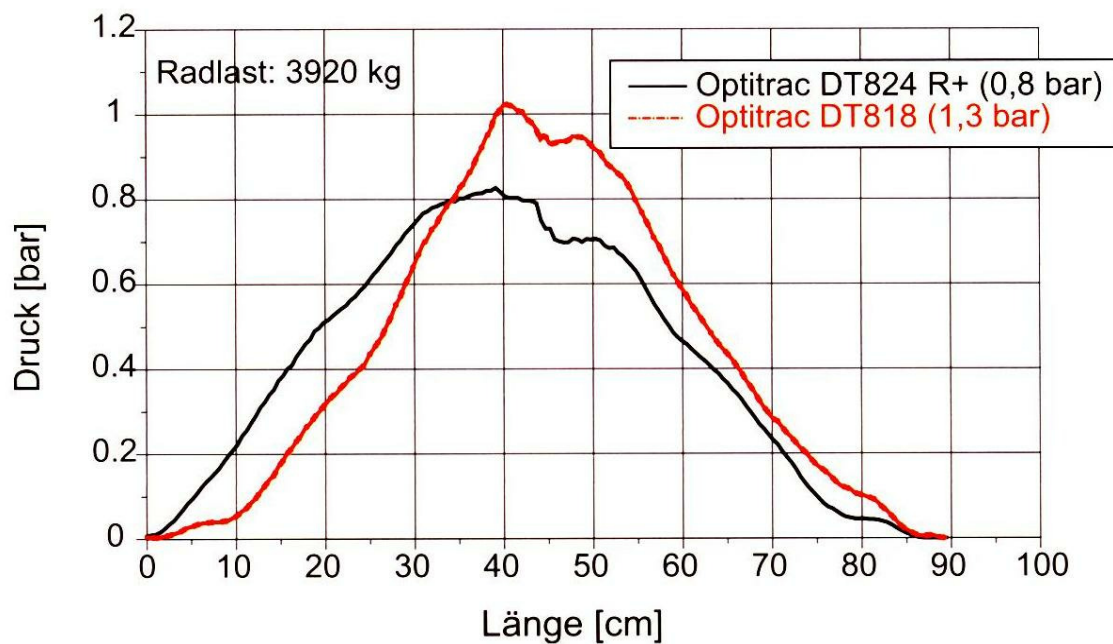


Abb. 80 Messung der Druckverteilung verschiedener Traktorreifen bei unterschiedlichen Reifeninnendrucken mittels Drucksensormatten (Degrell, 2006)

Der Grafik nach sind die höchsten Kontaktflächendrücke in der Mitte des Reifenrades zu finden, dort wo der Reifen am stärksten durch seine Rundung am Boden, bedingt durch die Reifenform, aufsteht. Gummibandlaufwerke sollen durch ihre lang gezogene Aufstandsfläche diesen Effekt verhindern. Höfflinger und Porkriefke (1993) hatten zum Vergleich von Aufstandsflächen zwischen Raupen und Rädern eine schematische Grafik erstellt (vgl. Abb. 11 Seite 40). Diese kann als Erklärung der unterschiedlichen Tiefenwirkung von Fahrwerken dienen.

Bedingt durch die Bauweise und –ausführung wird der Effekt der ungleichen Druckverteilung verringert, aber nicht gänzlich vermieden. Die Rollenpaare der Bandlaufwerke sind die tragenden Elemente, die die Laufwerkslast über das Gurtband auf den Boden abstützen. Eine hohe Bandspannung sowie ein hydraulischer Druckausgleich der Rollenpaare helfen diesen Effekt zu verringern. Gummibandlaufwerke, die bauartbedingt in erster Linie auf den Tragrollen aufstehen, um eine geringfügige Wölbung ähnlich einer Reifenform für bessere Lenkbar-

keit zu erzeugen, verursachen erwartungsgemäß höhere Drücke unter den Tragrollen (Weißbach, 2003). Die in Abb. 81 dargestellte Grafik zeigt die mit Sensormatten statisch gemessene Druckverteilung unter der Aufstandsfläche eines Gummibandlaufwerkes (Weißbach et al., 1996).

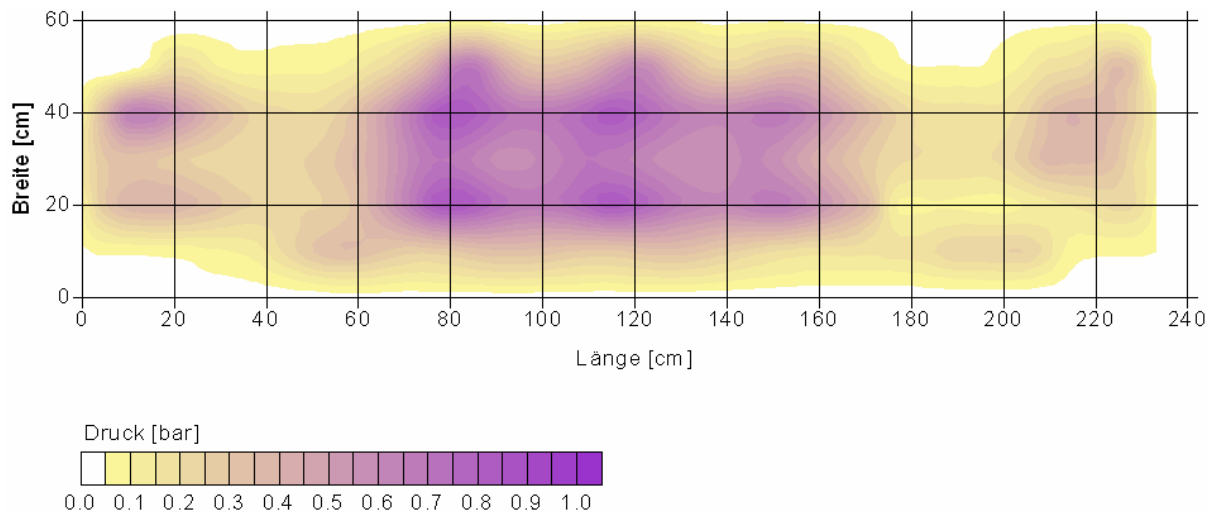


Abb. 81: Mit Sensormatten gemessene Druckverteilung (in 10 cm Tiefe) unter einem reibschlüssig angetriebenen Gurtbandlaufwerk (Weißbach et al., 1996)

Die Sensormatten wurden in einer Tiefe von 10 cm eingebracht und mit lockerem Oberboden bedeckt. Das Gurtband war mit ca. 80 kN vorgespannt. Das reibschlüssig angetriebene Gummibandlaufwerk erzeugte unter den Laufwerksrollen trotz einer Gurtspannung von 80 kN deutlich höhere Drücke (> 1 bar bzw. > 100 kPa) als der mittlere Kontaktflächendruck mit 0,4 bar, der errechnet wurde. Ein ähnlicher Effekt wurde bei der Messung mit der Schlauchdrucksonde festgestellt. Bei einer Bandspannung von > 160 kN wurden in der lockeren Schicht bis zu einer Tiefe von 20 cm unter den Laufwerksrollen Drücke von bis zu 100 kPa gemessen. Der rechnerische mittlere Kontaktflächendruck lag bei 62 kPa. Dies weist darauf hin, dass ein Gummigurtband trotz einer hohen Bandspannung die Gewichtskraft der Maschine im lockeren Oberboden nicht vollständig auf die gesamte Fläche gleichmäßig verteilen kann. Die Druckdifferenz zwischen den Druckspitzen der jeweiligen Laufwerksrolle und des Zwischenrollenbereiches lag bei 20 kPa.

7.3 Simulierte Druckspannungen (TASC 2.0)

Die von TASC 2.0 errechneten Druckspannungen über die Tiefe sind Werte, die für eine einfache Überrollung der jeweiligen Variante stehen. Die in der Arbeit untersuchten Effekte der mehrfachen Überrollung wurden von dem Programm nicht berücksichtigt. In der folgenden Tab. 32 sind die von TASC 2.0 errechneten Druckspannungen über die Tiefe von 100 cm

dargestellt. Damit lassen sich die Fahrwerke vergleichen und eine Differenzierung über die Tiefe wird ermöglicht. Der Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 mit 51,5 kN Radlast erzeugte an der Bodenoberfläche auf Grund des höchsten mittleren Kontaktflächendruckes den höchsten Ausgangswert mit 1,37 bar. Das Gummibandlaufwerk mit der höchsten Last von 113 kN Last und dem niedrigsten mittleren Kontaktflächendruck, erreichte den geringsten Ausgangswert von 1,08 bar an der Oberfläche. Der Simulation TASC 2.0 nach werden unter den beiden unterschiedlichen Radialreifen die Drücke über die Tiefe schneller abgebaut, so dass in einer Tiefe von 30 cm (rot markiert) beide Radialreifen unter dem Druckniveau des Gummibandlaufwerkes liegen. Bis in die angegebene Tiefe von 100 cm baut sich unter dem Radialreifen der Dimension 540/65 R28 mit 23,5 kN Last auf 0,08 bar nahezu komplett ab. Der Radialreifen mit der Dimension 1050/50 R32 und 51,5 kN Last erreicht in 100 cm Tiefe 0,16 bar und liegt doppelt so hoch, was mit der mehr als doppelt so hohen Radlast begründet werden kann. Das Gummibandlaufwerk mit 113 kN hat eine mehr als doppelt so hohe Last als der Radialreifen mit der Dimension 1050/50 R32 und 51,5 kN. Nach TASC 2.0 beträgt die Druckspannung unter dem Gummibandlaufwerk in 100 cm Tiefe 0,29 bar und ist fast doppelt so hoch. Der geringere simulierte Druckabbau des Gummibandlaufwerkes ist die Folge der höheren Last. In der Modellberechnung von TASC 2.0 fließt vor allem die Lasthöhe in die Berechnung der Druckspannung mit ein. Da die Heterogenität des tatsächlich vorliegenden Bodens nicht berücksichtigt werden kann, wird eine aus Messwerten zugrunde gelegte Abbaurate über die Tiefe kalkuliert, die den Druckabbau nur simulieren kann. Für den zu Grunde gelegten Boden waren die Druckspannungen unterhalb der regelmäßig gelockerten Bodenschicht (bis 30 cm) zu gering ($< 0,8$ bar), so dass keine Schadverdichtungsgefahr von TASC 2.0 angezeigt wurde.

Tab. 32: Gegenüberstellung der Bodendrücke der mit dem Rechenmodell TASC 2.0 simulierten Druckausbreitungen

Fahrwerksvarianten	Gummibandlaufwerk in Fahrtrichtung rechts	Radialreifen	Radialreifen
Dimension	890 x 2.000 mm	1050/50 R32	540/65 R28
Last [kN]	113	51,5	23,5
Tiefe	Druckspannung im Boden	Druckspannung im Boden	Druckspannung im Boden
[cm]	[bar]	[bar]	[bar]
0	1,08	1,37	1,23
2	1,08	1,36	1,22
5	1,06	1,33	1,18
10	1,02	1,25	1,07
15	0,98	1,14	0,93
20	0,92	1,02	0,78
25	0,86	0,90	0,65
30	0,80	0,79	0,54
35	0,74	0,69	0,45
40	0,68	0,60	0,37
45	0,63	0,53	0,31
50	0,58	0,46	0,27
60	0,49	0,36	0,20
70	0,42	0,28	0,15
80	0,36	0,23	0,12
90	0,31	0,19	0,09
100	0,29	0,16	0,08

7.4 Bodendruckmessung mit Schlauchdrucksonden

Die Bodendruckmessung mit Schlauchdrucksonden stellte in dieser Arbeit den Untersuchungsschwerpunkt dar. Neben der Quantifizierung der Bodenbeanspruchung durch verschiedene Laufwerkskonfigurationen sollten die Messwerte für die Entwicklung einer Formel zum Vergleich von Kennwerten über die zeitliche Beanspruchung und deren Validierung dienen. Sie ermöglicht eine Beurteilung der Wirkung verschiedener Fahrwerke bei annähernd gleichem Kontaktflächendruck unter Feldbedingungen. Eine typische landwirtschaftliche Arbeitsgeschwindigkeit kann 5 – 6 km/h betragen. Für den Versuch wurden 5 km/h gewählt, was einer Vorfahrt von 1,4 m/s entspricht. Von besonderem Interesse war das Erfassen der Druckverteilung unterhalb des Gummiraupenlaufwerkes. Beim Gummiraupenlaufwerk befinden sich alle vier Rollen innerhalb einer Laufwerkslänge von weniger als zwei Meter. Da bei der gewählten Vorfahrtsgeschwindigkeit des Gummibandlaufwerks nach ca. 1,4 s alle vier Rollen sowie der Zwischenrollenbereich die Messstelle passiert hatten, wurde bei allen Schlauchdrucksondenmessungen und Messaufzeichnungen eine Taktrate mit 100 Hz (100 Messungen/Sekunde) gewählt, die in der kurzen Überfahrtsdauer des Gummibandlaufwerkes alle Druckunterschiede erfassen kann. Bedingt durch die Bauart der Sonde (wassergefülltes Edelstahlrohr mit Silikonschlauch ausgeführtem Ende zur Druckaufnahme und Druckweiterleitung) musste ein Kanal von ca. 12 mm Durchmesser geschaffen werden. Durch das Eintreiben einer Metalllanze erfolgte dies durch die Verdrängung eines Volumens von ca. 12 cm³ an der Stelle, wo der silikonausgeführte Teil platziert wurde. Diese Verdrängung führte zu einer Komprimierung des Übergangsbereiches von Boden auf Sonde und somit zu einer Beeinflussung der Messwerte. Zur sicheren Messdatenerfassung wurde ein Vordruck von mind. 20 kPa eingestellt, damit der Silikonschlauch eine Verbindung zum Boden herstellte. Dieser Vordruck verhindert eine Auswertung unterhalb dieses Niveaus. Das Vordruckniveau wird bei den Abbildungen zur Schlauchdrucksondenmessung angegeben, da bei den Messungen die unterhalb des Vordruckniveaus lagen nicht festgestellt werden kann, ob der Messwert tatsächlich 0 kPa gewesen ist. Des Weiteren würde das pauschale Abziehen des Vordruckes bedeuten, dass sich die Druckspitzen um den Wert des Vordruckes verringern, was ebenfalls nicht der Realität entspräche (Bolling, 1987). Um den Einfluss des Vordruckes zu quantifizieren, wurde die Variante Gummibandlaufwerk ausgewählt, bei der am häufigsten das Vordruckniveau gemessen wurde. Hier war zu erwarten, dass unterschiedliche gewählte Vordrücke sich für eine Fehleranalyse am deutlichsten auswirken. Zur Fehleranalyse wurden der tatsächlich eingestellte Vordruck mit dem halben Vordruck, einem Vordruck 0 kPa und einer Verrechnung der Werte, die über dem Vordruckniveau lagen, durchgeführt. In der Abb. 82 ist der Einfluss der verschiedenen Fehlerbetrachtungen dargestellt.

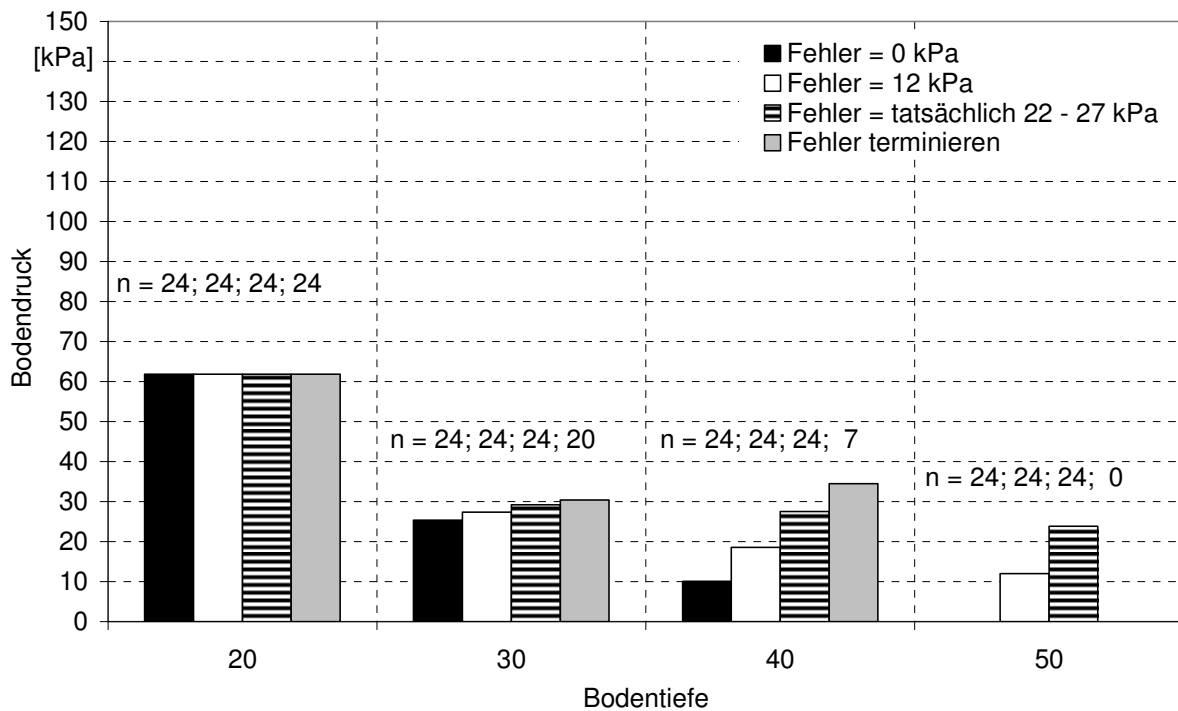


Abb. 82: Gegenüberstellung der Auswirkung unterschiedlicher Fehlerbetrachtungen für Bodendruckwerte, die innerhalb des Vordruckniveaus lagen

Je mehr Werte unterhalb dem Vordruckniveau lagen, desto stärker waren die Auswirkungen. In der Tiefe von 20 cm waren keine Unterschiede feststellbar, da in diesem Bereich alle Werte über dem eingestellten Vordruck lagen. Durch das terminieren der Werte des Vordruckniveaus erhöhten sich die Mittelwerte und das Stichprobenmittel verringerte sich. Der eingesetzte Wert 0 kPa verringerte die Mittelwerte in dem Maße, wie die die Anzahl der gemessenen Vordruckwerte stieg. In 50 cm wurde wie zuvor bei der Terminierung kein Druck angezeigt. Das Einsetzen der 12 kPa an Stelle des gemessenen Vordrucks verringerte die Mittelwerte gegenüber der Ausgangssituation in ähnlicher Weise wie bei 0 kPa auf einem höheren Niveau. Da z. T. in den verschiedenen Tiefen das Vordruckniveau knapp überschritten wurde kann davon ausgegangen werden, dass 0 kPa und das Terminieren der nicht überschrittenen Vordrücke einen zu hohen Fehlereinfluss auf die Ergebnisse hätte. Das Einsetzen des halben Vordruckwertes stellt eine Schätzung dar, die nicht bewiesen werden kann. Daraus ist ersichtlich, dass die Schlauchdrucksonde als eingesetztes Messgerät keine Differenzierung von Fahrwerken unterhalb des eingestellten Vordruckniveaus von mind. 20 kPa zulässt, wodurch eine Beurteilung der Fahrwerke in diesem Versuchsansatz für die Messtiefe 50 cm nicht erfolgen konnte.

7.4.1 Radfahrwerke

Die ursprünglich angestrebten identischen Kontaktflächendrücke der Versuchsvarianten konnten auf Grund der nicht verfügbaren Dimension 620/70 R25 des mit 23,5 kN befahrenen Rades nicht exakt erreicht werden. Durch den Einsatz des 540/65 R28 Reifens war der rechnerisch mittlere Kontaktflächendruck um 24 kPa höher als in der theoretischen und mit TASC berechneten Versuchsanstellung. Gegenüber dem Radialreifen 1050/50 R32 war er um 5 kPa höher. Nach Weißbach (1994) entspricht der Reifeninnendruck von Radialreifen in einer Bodentiefe von 10 cm dem Bodendruck. In den Versuchen lagen die durchschnittlichen gemessenen Bodendrücke in einer Tiefe von 20 cm bei einmaliger Überrollung mit dem Radialreifen der Dimension 540/65 R28 und 23,5 kN Last auf dem Niveau des Reifeninnendruckes. Beim Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 und 51,5 kN Last lag der Bodendruck bei einmaliger Überrollung in 20 cm über dem Niveau des eingestellten Reifeninnendruckes. Ein vergleichbarer Bodendruck zum Reifeninnendruck wurde in 30 cm Bodentiefe gemessen. Eine Erklärung für diese Abweichung ist wie bei der Kontaktflächengröße in der Bauart und dem Einsatzbereich des Reifens der Dimension 1050/50 R32 zu finden. Bei der einfachen Überrollung wurden in 20 cm Tiefe durchschnittlich 91 kPa und bei der zweifachen 107 kPa Bodendruck gemessen, was vergleichbar ist mit dem von Reifenhersteller angegebenen Reifeninnendruck von minimal 100 kPa (Michelin, 2007). Der Unterschied zwischen den Messtiefen von Weißbach (1994) und diesem Versuchsansatz kann durch die sehr lockeren Bodenbedingungen zum Zeitpunkt der Befahrung begründet sein.

Die von Weißbach (1994) sowie Keller und Arvidsson (2004) gegensätzlichen Aussagen bezüglich des Druckanstieges dreifacher Radüberrollung mit Lasten > 80 kN im Unterboden konnte mit diesem Versuchsansatz auf Grund der maximalen Radlast von 51,5 kN nicht exakt geprüft werden. Bei allen Radüberrollungsvarianten wurde in den Messtiefen 20, 30 und 40 cm ein Druckanstieg mit jeder zusätzlichen Radüberrollung festgestellt. Dies entspricht den Ergebnissen von Weißbach (1994) bzgl. der kumulativen Wirkung zusätzlicher Radüberrollung. In Tab. 33 sind diese zusammengefasst dargestellt. In 50 cm Bodentiefe wurde bis auf eine Wiederholung des Radialreifens der Dimension 1050/50 R32 mit 51,5 kN Last kein Druckanstieg über dem jeweils eingestellten Vordruck festgestellt. Dies lässt darauf schließen, dass die maximalen Einzelradlasten sowie die Überrollungsanzahl zu keiner negativen Beeinflussung des Bodens ab einer Tiefe von 50 cm geführt haben.

Tab. 33: Durchschnittliche Druckerhöhung (Einfach- und Mehrfachüberrollung) in den Mess-tiefen der beiden Radvarianten

Überrollungssituationen	Druckanstieg in einer Bodentiefe von:		
	20 cm [kPa]	30 cm [kPa]	40 cm [kPa]
1 x Rad 51,5 kN Absolut	91,2	66	56
1 x Rad 23,5 kN Absolut	71,1	41	36,8
2 x Rad 51,5 kN Absolut [kPa] Erhöhung 1. auf 2. Druckerhöhung 1. auf 2.	105,7 14,5 16 %	74,0 8,0 12 %	63,5 7,5 13 %
2 x Rad 23,5 kN Absolut [kPa] Erhöhung 1. auf 2. Druckerhöhung 1. auf 2.	80,3 9,2 13 %	49,5 8,5 21 %	40,3 3,5 10 %
4 x Rad 23,5 kN Absolut [kPa] Erhöhung 1. auf 4. Druckerhöhung 1. auf 4.	97,0 25,8 36 %	60,2 19,2 47 %	42,8 6,0 16 %

Die Radlasten waren unter den vorliegenden Bodenbedingungen nicht hoch genug, um in 50 cm Tiefe einen Bodendruck über dem Vordruckniveau zu verursachen. Bei der zweifachen Radüberrollung mit 51,5 kN war der höchste Druckanstieg in der lockeren Bodenschicht (Krume) in 20 cm zu beobachten. Dieser war mit 14,5 kPa etwa doppelt so hoch, wie die Druckanstiege in den beiden Tiefen 30 und 40 cm. Da sich der gemessene Druck in 30 und 40 cm bei etwa 70 und 60 kPa lag, waren die prozentualen Druckerhöhungen mit 12 und 13 % auf identischem Niveau. Die höhere Dichte des Unterbodens mit 1,6 g/cm³ (38 – 43 cm) zu 1,5 g/cm³ in der Krume (15 – 20 cm) sowie durch die Verfestigung bei der Mehrfachüberrollung in der Krume (15 – 20 cm) nach der ersten Radüberrollungen von 1,5 kg/cm³ auf 1,6 g/cm³ wirkten einer stärkeren Druckerhöhung nach Bolling (1987) entgegen.

Wie aus oben dargestellter Tabelle ersichtlich liegen die durchschnittlichen gemessenen maximalen Bodendrucke der Varianten mit Luftreifen auf unterschiedlichem Niveau, das sich mit der Erhöhung der Überrollungsanzahl differenziert erhöht. Die Überrollung mit dem Radialreifen der Dimension 540/65 R28 und einer Last von 23,5 kN erzeugte nach den vier Überrollungen in allen Tiefen einen durchschnittlich geringeren Bodendruck, als der 1050/50 R32 Luftreifen mit 51,5 kN. Dies entspricht dem Druckzwiebelmodell von Söhne (1953), dass bei identischem Kontaktflächendruck in gleicher Messtiefe durch das leichtere Rad ein niedriger Bodendruck erzeugt wird. Die zweifache Überrollung des Radialreifens mit der Dimension

540/65 R28 und der Last 23,5 kN verursachte in 20 und 30 cm einen etwa gleich hohen Druckanstieg um ca. 9 kPa. In 40 cm war dieser mit 3,5 kPa um mehr als die Hälfte geringer, was mit dem Druckabbau über die Bodentiefe, bedingt durch die Zunahme der Eigenfestigkeit des Bodens mit zunehmender Tiefe zu erklären ist. Des Weiteren wirkt die in 30 – 35 cm festgestellte Krümmenbasisverdichtung als Widerlager zum Unterboden. In 20 cm Bodentiefe war der Druckanstieg unter den Radialreifen 540/65 R28 und der Last von 23,5 kN mit 9,2 kPa niedriger als der Bodendruck von 14,5 kPa des Radialreifens der Dimension 1050/50 R32 bei einer Last von 51,5 kN und zweifacher Überrollung. In der zweiten Messtiefe von 30 cm waren beide Varianten auf annähernd dem gleichen Niveau. Dem Einfluss der Bodenheterogenität sowie unterschiedlicher Bodenbearbeitungstiefen aus den Bewirtschaftungsjahren zuvor wurde durch die zufällige Verteilung der sechs Beprobungspartellen begegnet. Der Bodendruck (absolut) beim Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 und einer Last von 51,5 kN lag bei der ersten Überfahrt im Schnitt der drei Messtiefen um ca. 20 kPa höher als bei dem 23,5 kN schweren Rad. Diese bei der ersten Überrollung produzierte höhere Verformung, führte zu einem differenzierteren Drucksetzungsverhalten der nachfolgenden Überrollungen, da mehr Luft aus den Bodenporen ausgepresst wurde und sich die federnde Wirkung des Bodens veränderte. Dies wurde ebenso bei Lebert (1989) in seinem Drucksetzungskurvenmodell beschrieben. Zur besseren Differenzierung der Radüberrollungen wurden die Differenzbodendrücke zwischen den beiden Radvarianten gebildet und in Abhängigkeit der Überrollhäufigkeit in Abb. 83 für die drei Messtiefen dargestellt. Dabei wurden die Differenzdrücke der gemessenen Bodendrücke zwischen den Radüberrollungen mit 51,5 kN und 23,5 kN gegenübergestellt.

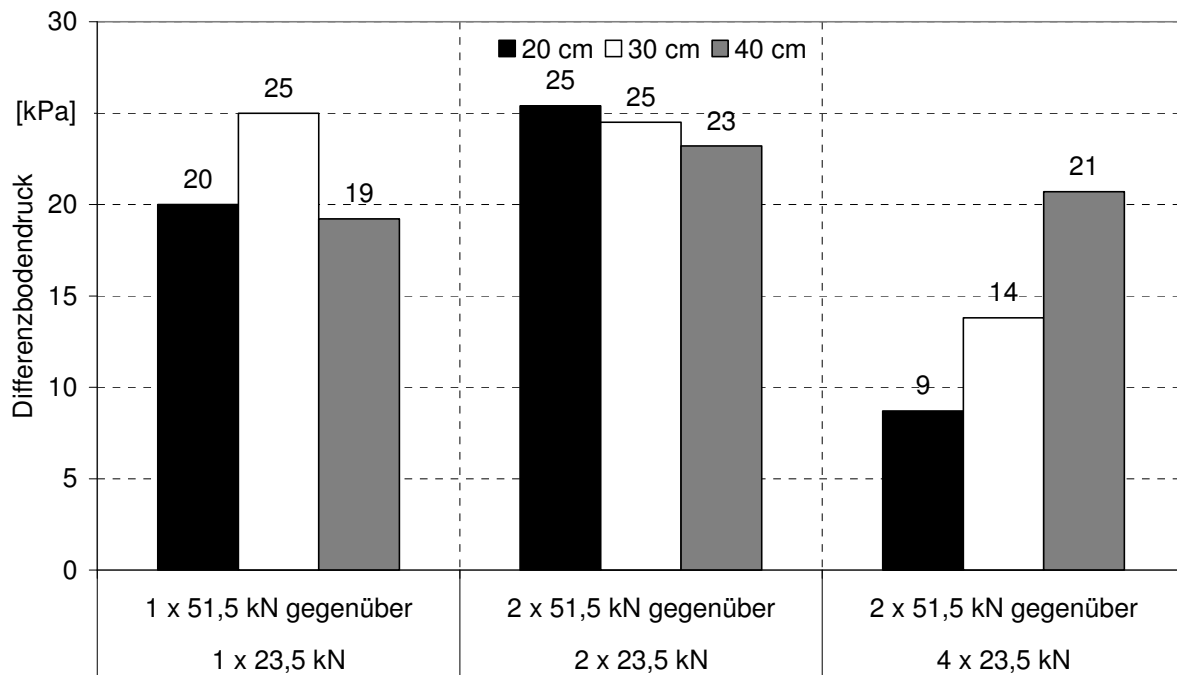


Abb. 83: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Differenzbodendrücke beider Radialreifenvarianten über die Messtiefen (20 – 40 cm)

Bei der einmaligen Überrollung durch die unterschiedlich großen und verschieden hoch belasteten Radialreifen waren die Differenzen in 20 und 40 cm Bodentiefe mit ca. 20 kPa gleich hoch. In 30 cm Bodentiefe war die Differenz vom Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 mit 51,5 kN Last gegenüber dem Reifen der Dimension 540/65 R28 und einer Last von 23,5 kN mit 25 kPa höher. Dies ist ein Indiz für die höhere Druckfortpflanzung bis in eine Tiefe von 30 cm des größer dimensionierten und höher belasteten Radialreifens, bei annähernd gleichem rechnerischen Kontaktflächendruck und einmaligem Überrollungsimpuls. Bei den zweifachen Radüberrollungen des Radialreifens der Dimension 1050/50 R32 mit 51,5 kN Radlast und des Radialreifens der Dimension 540/65 R28 mit der Radlast 23,5 kN lagen die Differenzdrücke mit 23 - 25 kPa in den Messtiefen 20, 30 und 40 cm auf relativ einheitlichem Niveau. Der Endzustand nach zwei- bzw. viermaliger Überrollung nach dem die Gesamtlast über die Messstellen transportiert wurde, zeigt ein differenzierteres Bild. Der Unterschied in der obersten Messtiefe von 20 cm verringerte sich zwischen der zweimaligen Überrollung mit dem Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 bei einer Last von 51,5 kN zur vierfachen Überrollung mit dem Radialreifen der Dimension 540/65 R28 mit der Last 23,5 kN auf durchschnittlich 9 kPa. In 30 cm war die Druckdifferenz 14 kPa. In der dritten Messtiefe lag die Differenz nach viermaliger Überrollung mit einer Radlast von 23,5 kN des Radialreifens 540/65 R28 gegenüber der zweifachen Überrollung mit der Radlast 51,5 kN und der Reifendimension 1050/50 R32 bei 21 kPa. Dies weist darauf hin, dass sich eine mehrmalige Über-

rollung mit geringerem Gewicht und kleinerem Rad stärker auf den Oberboden auswirkt. Höhere Radlasten in Verbindung mit größeren Reifen verursachen eine stärkere Tiefenwirkung. Die höhere Kontaktfläche beansprucht bei gleichem rechnerischem Kontaktflächendruck ein größeres Bodenvolumen, wodurch sich der Druck tiefer fortpflanzen kann. Diese Gesetzmäßigkeit wurde bereits von Galileo Galilei (1638) beschrieben. Zelenin (1950) veranschaulichte den Druckabbau über die Tiefe an Hand eines idealisierten Kugelmodells, wobei er den Boden in Kugelschichten darstellte. Dabei stellte er den Druckabbau wie in Abb. 84 idealisiert dar. Söhne (1953) sowie Gill und Vandenberg (1967) beschrieben in ihren Arbeiten den Druckabbau von größeren Reifen mit höheren Lasten in ähnlicher Weise und wiesen auf den Konzentrationsfaktor, bedingt durch die Reifenbauart hin. Dieser führt dazu, dass der Druck in der Reifenmitte am höchsten ist.

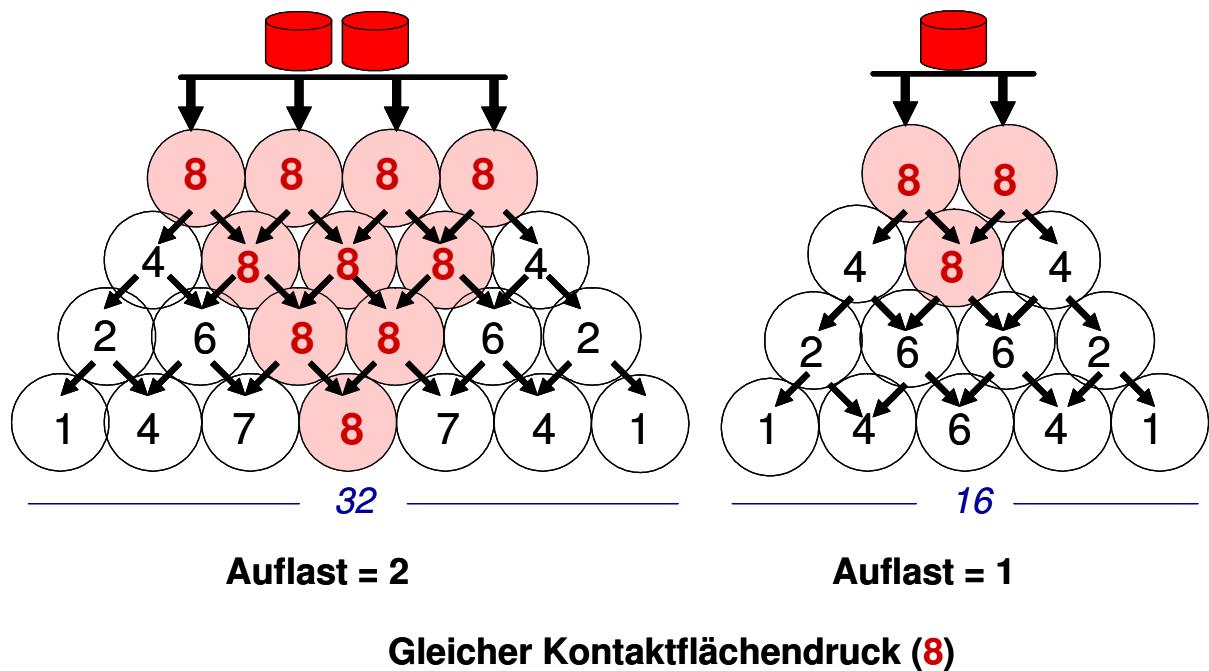


Abb. 84: Vereinfachte zweidimensionale Modelldarstellung der idealisierten Druckausbreitung über die Bodentiefe zweier unterschiedlicher Lasten und Aufstandsflächen bei rechnerisch gleichem Kontaktflächendruck (verändert nach Zelenin, 1950)

Neben dem Druckanstieg, bedingt durch zusätzliche Radüberrollungen, kann im Umkehrschluss der Druckabbau Aufschluss über die Druckausbreitung im Boden sowie den Einfluss der mehrfachen Überrollung auf die Bodenstruktur geben. Die Druckabsorption hängt von der Festigkeit des Bodens ab. Ein lockerer Oberboden hinterlässt bei einfacher Überrollung eine tiefere Fahrspur, da der Boden stark zusammengedrückt wurde. Bedingt durch luftgefüllte Poren kann dieses Luftpolster einmalig eingeleitete Drücke aufnehmen, wobei die Luft aus dem Boden gepresst wird. Kann sich der Boden nach der Überfahrt wieder entspannen, wird dies nach Lebert (1989) als elastischer Druckabbau beschrieben. Das Überschreiten

der Eigenfestigkeit des Bodens führt zu plastischen Verformungen. Dabei wird der Boden fester und tragfähiger. Ist der einwirkende Druck höher als die Festigkeit des Bodens, wird der Druck an die unteren Bodenschichten weitergeleitet, bis ein Kräftegleichgewicht entsteht. Eine Krumbasisverdichtung (Pflugsohle) stellt zum „unberührten“ Unterboden eine Art Widerlager dar, die diesen ggf. vor Verdichtung schützt. Diese Funktion wird durch Ergebnisse der Schlauchdrucksondenmessung für die gemessenen Bodenschichten unterhalb von 35 cm belegt. Unter den Überrollungsvarianten mit den Luftreifen konnten zwischen den jeweiligen Bodenschichten unterschiedliche Druckabbauraten beobachtet werden. Der höchste Druckabbau fand bei allen Überrollungsvarianten mit Luftreifen in der Bodenschicht zwischen 20 cm und 30 cm statt. Dabei erzeugte der Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 mit einer Last von 51,5 kN bei der ein- und zweifachen Überrollung die höchsten Bodendrucke in der Tiefe von 20 cm. Die höchste Abbaurate unter den Luftreifen fand unter der ein- und vierfachen Überrollung des Radialreifens der Dimension 540/65 R28 bei einer Last von 23,5 kN zwischen 20 und 30 cm statt, was eine geringere Druckfortpflanzung gegenüber dem größer dimensionierten und höher belasteten Rad beweist. Das kleiner dimensionierte und geringer belastete Rad hatte bei der einmaligen Überfahrt die geringste Abbaurate zwischen 40 und 50 cm. Das lag vor allem an dem niedrigerem Druckniveau in 40 cm Tiefe gegenüber den übrigen Überrollungsvarianten mit Luftreifen. Der Radialreifen mit der Dimension 1050/50 R32 und 51,5 kN Last erzeugte in der Tiefe 40 cm bei einmaliger Überfahrt ein höheres Druckniveau, was durch die höhere Tiefenwirkung des größer dimensionierten und höher belasteten Radialreifens erklärt werden kann. Auf Grund der Tatsache, dass in 50 cm Bodentiefe ausschließlich das eingestellte Vordruckniveau gemessen wurde, war der Druckabbau von 40 auf 50 cm unter der Überrollungsvariante mit dem Radialreifen 1050/50 R32 und der Last von 51,5 kN bei einfacher Überfahrt höher, da mehr Druck zum Abbau zur Verfügung stand. Nach Bolling et al. (1982), Bolling (1986), Krause et al. (1986) und Kühner (1997) trifft dieser Effekt für die Spannungsausbreitung bei Radlaufwerken in tiefere Bodenschichten zu, wobei die Höhe der Radlast entscheidend ist.

Durch die mehrfache Überrollung mit der Last von 23,5 kN des Radialreifens der Dimension 540/65 R28 wurde vorrangig der Oberboden bis 30 cm verfestigt, was Bolling (1987) bei seinen Grundlageuntersuchungen in der Bodenrinne ebenfalls festgestellt hat. Im Vergleich zum Druckanstieg unter der ersten und der letzten Überrollung der Überrollungsvarianten mit den beiden Luftreifen der Dimension 540/65 R28 mit der Radlast 23,5 kN und der Dimension 1050/50 R32 mit der Radlast 51,5 kN zeigte sich, dass nach jeder zusätzlichen Überfahrt mehr Last vom Boden abgestützt werden konnte. Dieser Effekt wurde in allen Messtiefen unter den Radfahrwerken festgestellt. Die Abbaurate in den Tiefenbereichen 20 auf 30, 30 auf 40 und 40 auf 50 cm war unterschiedlich hoch. Unter dem Radialreifen der Dimension 540/65 R28 mit 23,5 kN Last wurde der höchste Druckabbau bei vierfacher Überrollung in

der Tiefe von 20 auf 30 cm festgestellt, was darauf hinweist, dass sich im Oberboden eine verfestigte Schicht gebildet hat, die mehr Last abstützen konnte. In Abb. 85 ist der Effekt unter den beiden Luftreifenfahrwerken für die drei Tiefenbereiche dargestellt, in denen die Bodendrücke gemessen wurden.

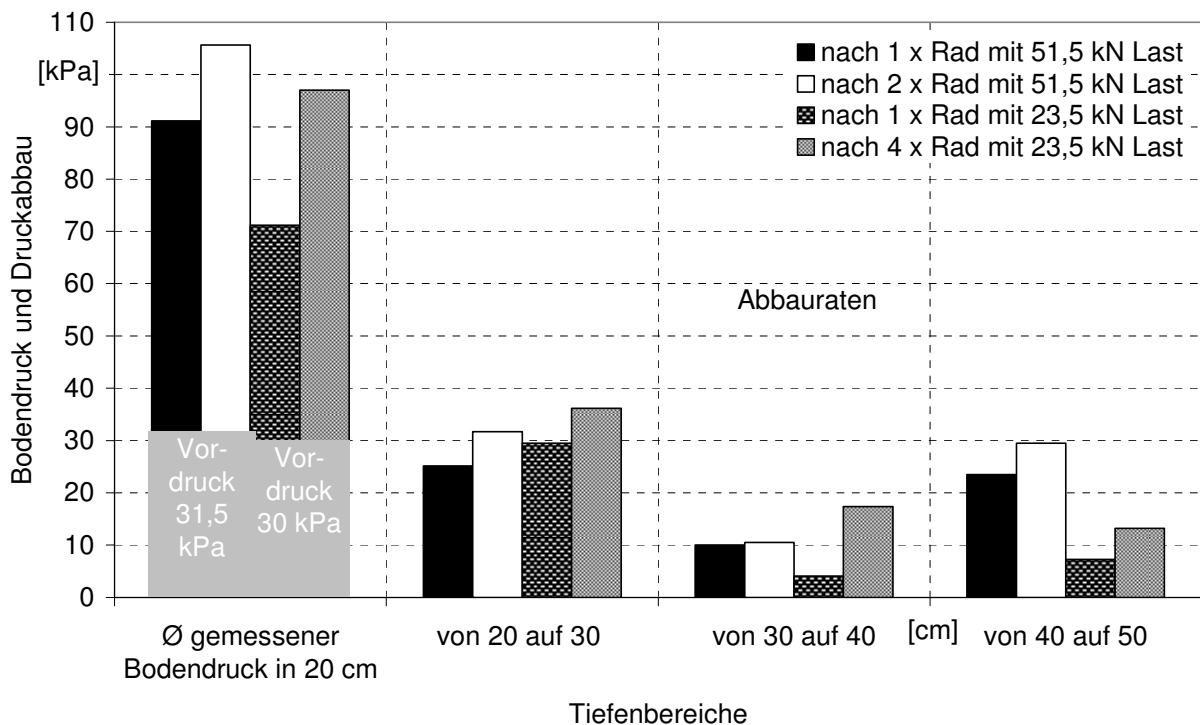


Abb. 85: Vergleich des Druckabbaus der beiden Radvarianten zwischen erster und letzter Überrollung. Als Ausgangsbasis wurde der mittlere Bodendruck in 20 cm mit angegeben

Bei beiden Radvarianten zeigte sich, dass sich mit der Erhöhung der Überrollhäufigkeit auch der Bodendruck in allen Messtiefen erhöht. Dies korrespondiert mit Untersuchungen von Weißbach (1994), der dies bei Radlasten von 83 kN in einer Tiefe von 40 cm nachgewiesen hatte. Die Beobachtung von Weißbach (1994), dass sich die mehrfache Radüberrollung mit einer Radlast von 83 kN auf den Unterboden in Form eines Druckanstieges einer jeden zusätzlichen Überrollung auswirkt, kann an Hand der Schlauchdrucksondenmessung in dieser Versuchsanstellung für geringere Radlasten (51,5 und 23,5 kN) bis in eine Tiefe von 40 cm bestätigt werden. Beide Radvarianten zeigten bei den zu Grunde liegenden Bodenparametern (lockere Frühjahrskrume und im Messhorizont auf Feldkapazität aufgefüllter Boden), dass ein Druckanstieg mit jeder zusätzlichen Überrollung stattfand.

7.4.2 Gummibandlaufwerk (reibschlüssig)

Im regelmäßig gelockerten Oberboden, der ersten Messtiefe von 20 cm, in der die Beanspruchung durch das Gummibandlaufwerk die größte Auswirkung zeigte, konnte zwischen

den gleich großen Umlenk- bzw. Antriebsrollen sowie zu den Tragrollen ein Druckabfall von durchschnittlich 30 kPa gemessen werden. In Abb. 86 ist exemplarisch ein Überfahrtsverlauf bei der Messung des Gummibandlaufwerkes in 20 cm Bodentiefe dargestellt. Zwischen den beiden Tragrollen fiel der Druck um etwa 3 kPa ab. Die Vorspannung des Gummibandes mit 180 kN verhinderte einen Abfall des Bodendruckes im Zwischenrollenbereich auf das Vordruckniveau, was in früheren Untersuchungen älterer Gummibandlaufwerke mit geringeren Vorspannungskräften vorkam.

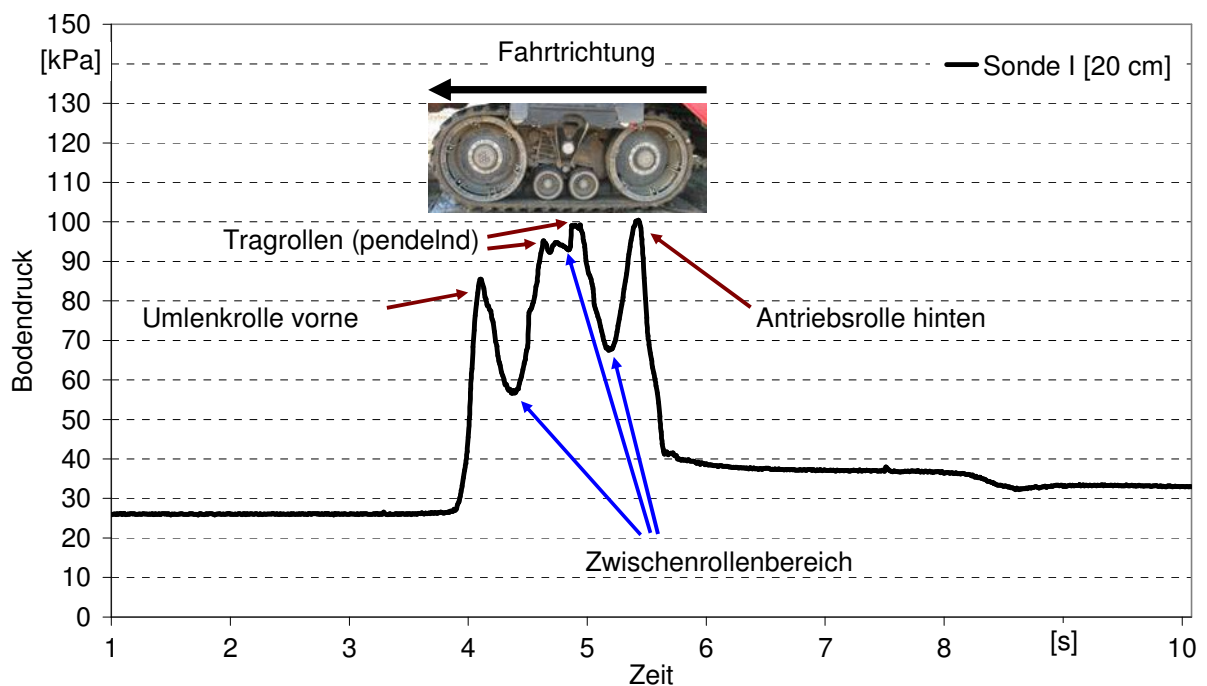


Abb. 86: Bodendruckmessung mit Schlauchdrucksonden in einer Tiefe von 20 cm unter dem Bandlaufwerk

Die höheren Bodendrücke unter den Tragrollen sowie der nachfolgenden Antriebsrolle lassen sich wie folgt erklären. Das pendelnd auf einer Achse aufgehängte Gummibandlaufwerk versucht bei geringer Last (113 kN), bedingt durch das Antriebsmoment der hinten liegenden Antriebsrolle, vorne aufzusteigen. Dieser Effekt wird in der Literatur von Kollen und Kuipers (1983) ausführlich beschrieben. Da die beiden kleineren Tragrollen innerhalb des Laufwerkes pendelnd aufgehängt sind, pendeln diese ebenfalls, wodurch die hintere Rolle einen höheren Spitzendruck verursacht. In früheren Veröffentlichungen zur dynamischen Druckmessungen unter Bandlaufwerken (Isensee und Olf, 1990; Weißbach, 1994), waren die Bodendrücke unter den kleineren Tragrollen höher (wie in Abb. 87 dargestellt), als die unter den Umlenk- und Antriebsrollen. Des Weiteren wurde bei den Messungen ein deutliches Absinken der Bodendrücke im Zwischenrollenbereich beobachtet, was mit der niedrigeren Bandspannung begründet werden kann (Obermeier-Hartmann et al., 2006).

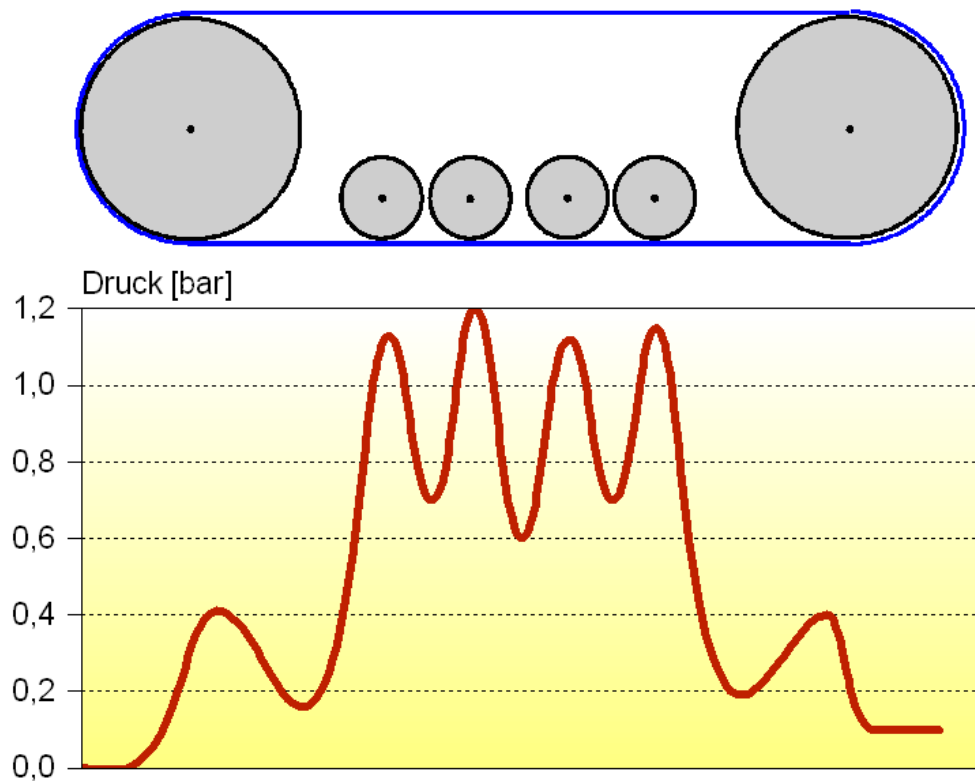


Abb. 87: Druckverlauf unter einem Laufwerk CAT 65 von Caterpillar in einer Tiefe von 10 cm (Weißbach, 1994)

In Abb. 88 und Abb. 89 sind zwei Druckverläufe von Schlauchdrucksondenmessungen auf unterschiedlichen Standorten dargestellt. Bei beiden Messungen wurde der gleiche Maschinentyp mit dem gleichen Laufwerk untersucht. Die Laufwerke unterschieden sich durch die jeweilige Last, da die Messungen mit vollem Bunker (Abb. 88) und bei leerem Bunker (Abb. 89) durchgeführt wurden. Der höhere Druck unter der Umlenkrolle vorne resultierte aus dem geringeren Pendelverhalten des Gummibandlaufwerkes, bedingt durch den vollen Bunker. Bei nahezu gleichen Messtiefen wurden identische mittlere Bodendruck von 10 kPa über dem Vordruckniveau unter den vier Laufwerksrollen gemessen. In der Literatur finden sich für die gleiche Art von Gummibandlaufwerken in dieser Tiefe ähnliche Werte (Weißbach, 2004).

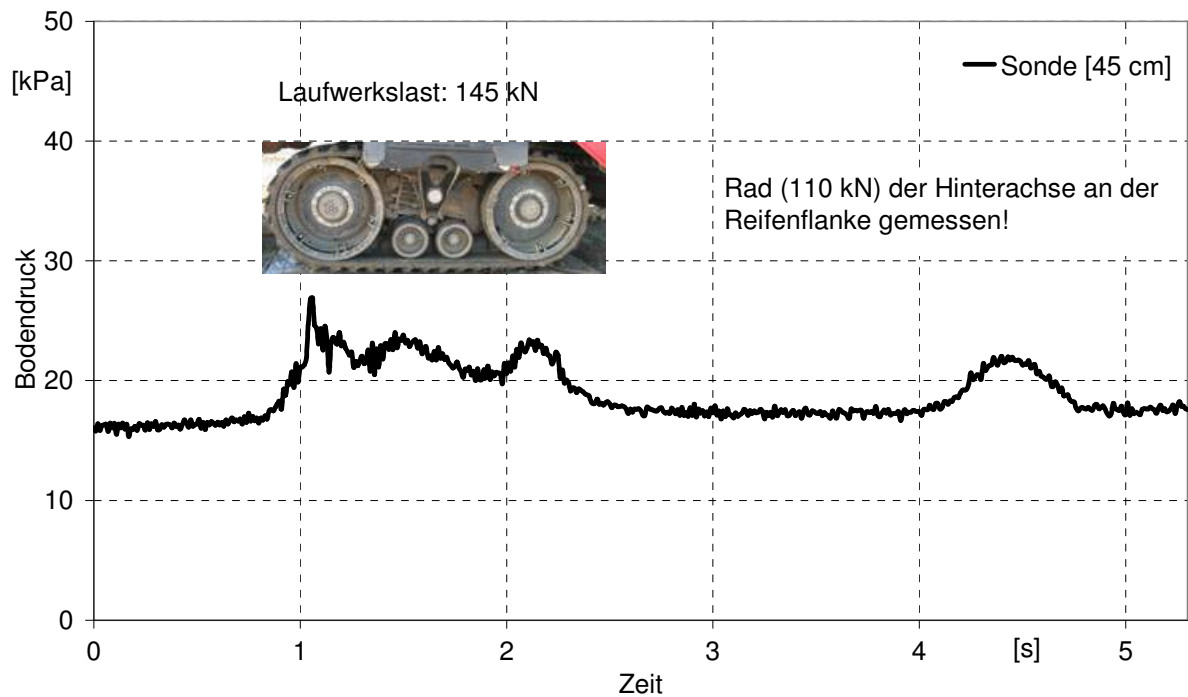


Abb. 88: Schlauchdrucksondenmessung unter Bandlaufwerk mit 142 kN (Bunker voll) im November 2004; Messtiefe 45 cm; Bodenfeuchte 23,5 Gew.-%; Bodenart uT 4 (stark schluffiger Ton)

In Abb. 89 ist in der Tiefe von 40 cm der höhere Druck unter der hinteren Antriebsrolle auf niedrigem Niveau feststellbar. Die beiden Tragrollen sind nicht eindeutig differenzierbar, sie stellen im Messschrieb eine gemeinsame Erhebung dar.

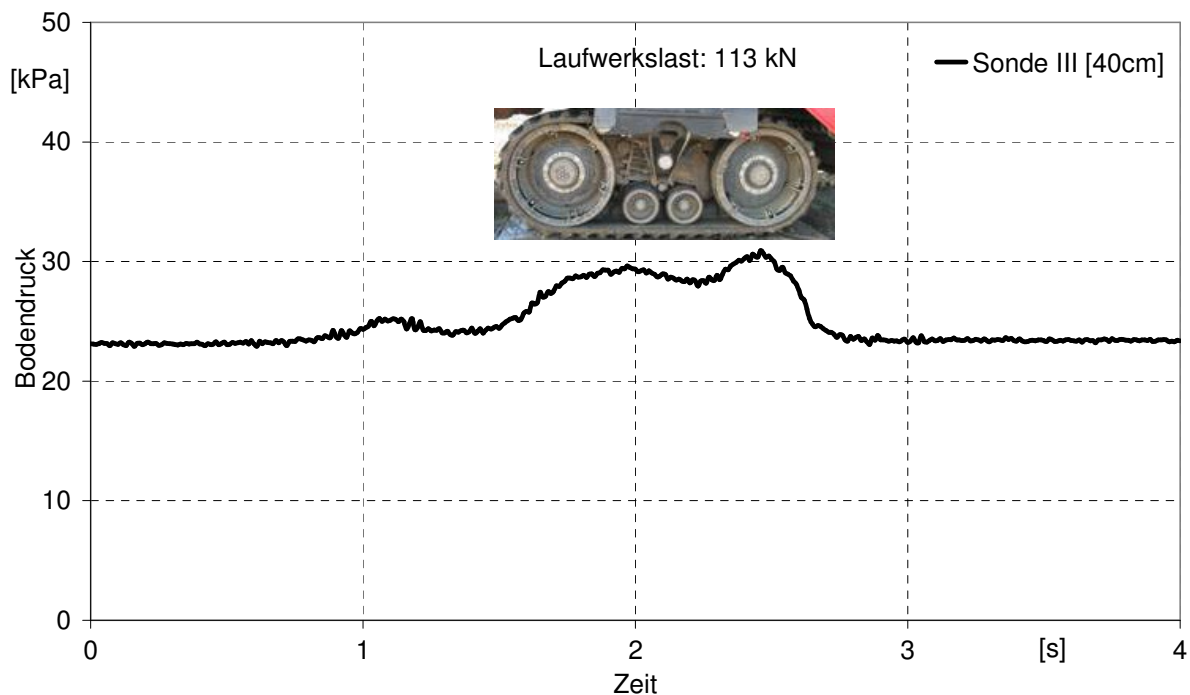


Abb. 89: Schlauchdrucksondenmessung unter dem Bandlaufwerk mit 113 kN (Bunker leer) im April 2006; Messtiefe 40 cm; Bodenfeuchte 24 Gew.-%; Bodenart sL (sandiger Lehm)

Der Druckabbau über die Tiefe ist in Abb. 90 dargestellt. Die höchste Abbaurrate fand zwischen 20 und 30 cm statt, was bereits im Ergebnisteil an Hand der Kurvensteigungen gezeigt wurde.

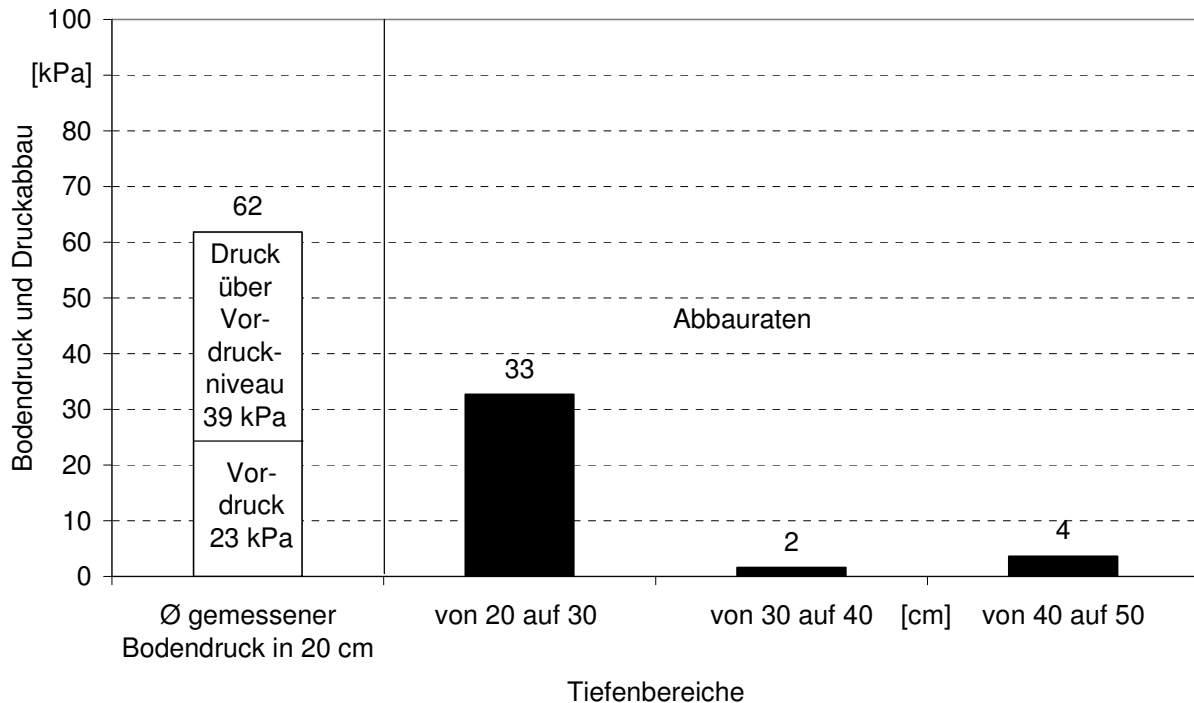


Abb. 90: Gegenüberstellung des Ausgangsniveaus in oberster Messtiefe sowie der Abbauraten über die Tiefenbereiche unter dem Gummiraupenlaufwerk

Die Differenz zwischen dem durchschnittlich gemessenen Bodendruck in 20 cm Tiefe und der Summe der Abbauraten stellte das Vordruckniveau von 23 kPa dar. In der Tiefe 30 bis 40 cm wurden 1,6 kPa abgebaut, wobei in 40 cm nahezu das Vordruckniveau erreicht wurde. Aus diesem Grund war die Abbauraten mit 3,7 kPa von 40 auf 50 cm minimal. Für gewöhnlich lag die Bearbeitungstiefe zwischen 25 - 30 cm, wodurch die 30 cm Sonde im Bereich der Pflugsole lag. Die höhere Lagerungsdichte der Krumbasis trug zu einer höheren Abbauraten bei.

Bei der Simulation vergleichbarer Rad- und Raupenlaufwerkslasten von Mähderscher Vorderachsen in einer Bodenrinne stellte Ansorge (2006) unter Laborbedingungen fest, dass die Deformation unter dem Gummibandlaufwerk über die Tiefe geringer ist als unter dem großvolumigen Rad mit vergleichbarer Last. Zwischen 20 und 30 cm Bodentiefe nahm die Deformation unter dem Gummibandlaufwerk stärker ab als in den darunter liegenden Schichten. In Abb. 91 ist die Wirkung der Bodendeformation des Rad- und Raupenfahrwerks dargestellt. Bei homogenen Bodenschichten in der Bodenrinne in der keine „Pflugsole“ vorhanden ist, konnte in der Tiefe von 20 bis 30 cm eine geringere Deformation festgestellt werden. Diese unter Laborbedingungen gewonnenen Ergebnisse bestätigen die im Feld für diese Tiefe ge-

messenen höheren Abbauraten unter dem Gummibandlaufwerk mit der Schlauchdrucksondenmessung.

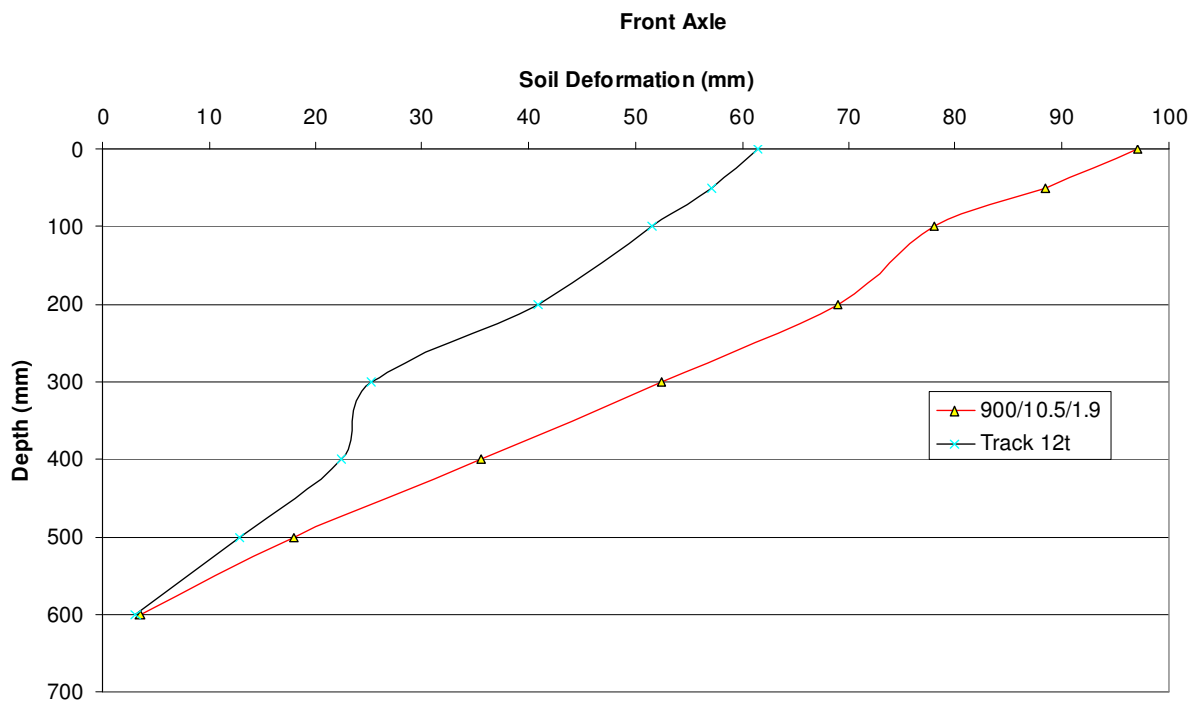


Abb. 91: Messung der Bodendeformation in einer Bodenrinne unter Laborbedingungen. Verglichen wurde ein 900 mm breiter Luftreifen mit 105 kN und einem Reifeninnendruck von 190 kPa mit einem 120 kN schwerem Gummibandlaufwerk (Ansorge und Godwin, 2006)

7.4.3 Gewichteter mittlerer verdichtungswirksamer Bodendruck (GMPw)

Analog der Berechnung des gewogenen mittleren Aggregatdurchmessers zur Beurteilung der Bodenstruktur wurde ein gewichteter mittlerer Bodendruck berechnet. Diese neue Analyse unter Einbeziehung des Faktors Zeit hat zu keiner veränderten Reihung hinsichtlich Auswirkung der drei Belastungsvarianten für 110 kN Last bzw. zu einer Verfälschung der Ergebnisse geführt. Der Trend der übrigen Analysen des dynamischen Bodendruckes wurde bestätigt. Zusätzlich konnte der in einer Wiederholung für die Bodentiefe von 50 cm gemessene Bodendruckanstieg auf > 40 kPa (über dem Vordruckniveau) bei der Radvariante mit $2 \times 51,5$ kN als verdichtungswirksam detektiert werden, was durch die mittleren maximalen Bodendrucke sich minimal bemerkbar machte. Eine Bodenbeanspruchung in dieser Tiefe ist als kritisch anzusehen. Da die Messungen mit dem Penetrometer und den Stechzylindern keine statistisch signifikanten negativen Veränderungen gezeigt haben, ist davon auszugehen, dass der festgestellte GMPw in 50 cm keinen Einfluss auf das Bodengefüge hatte. Dennoch konnten geringe Unterschiede festgestellt werden, wodurch eine relative Wertung möglich wird. Zur Evaluierung dieses neuen Ansatzes müssen weitere Versuchsanstellung damit getestet werden.

7.5 Eindringwiderstand

Die Bodenanalyse der Versuchspartellen in 15 – 20 cm und 38 – 43 cm zeigte, dass die Bodenzusammensetzung im Ober- und Unterboden als weitestgehend homogen angesehen werden kann (vgl. Abb. 38, Seite 89), wodurch bodenartbedingte Einflüsse bei der Eindringwiderstandsmessung bis in diese Tiefen vernachlässigt werden können. Die Ergebnisse der Eindringwiderstandsmessung (Abb. 92) zeigen die Bodenbeanspruchung durch die verschiedenen Überrollungsvarianten. Als Referenz dient der unbefahrene Boden unmittelbar neben jeder Überrollungssituation.

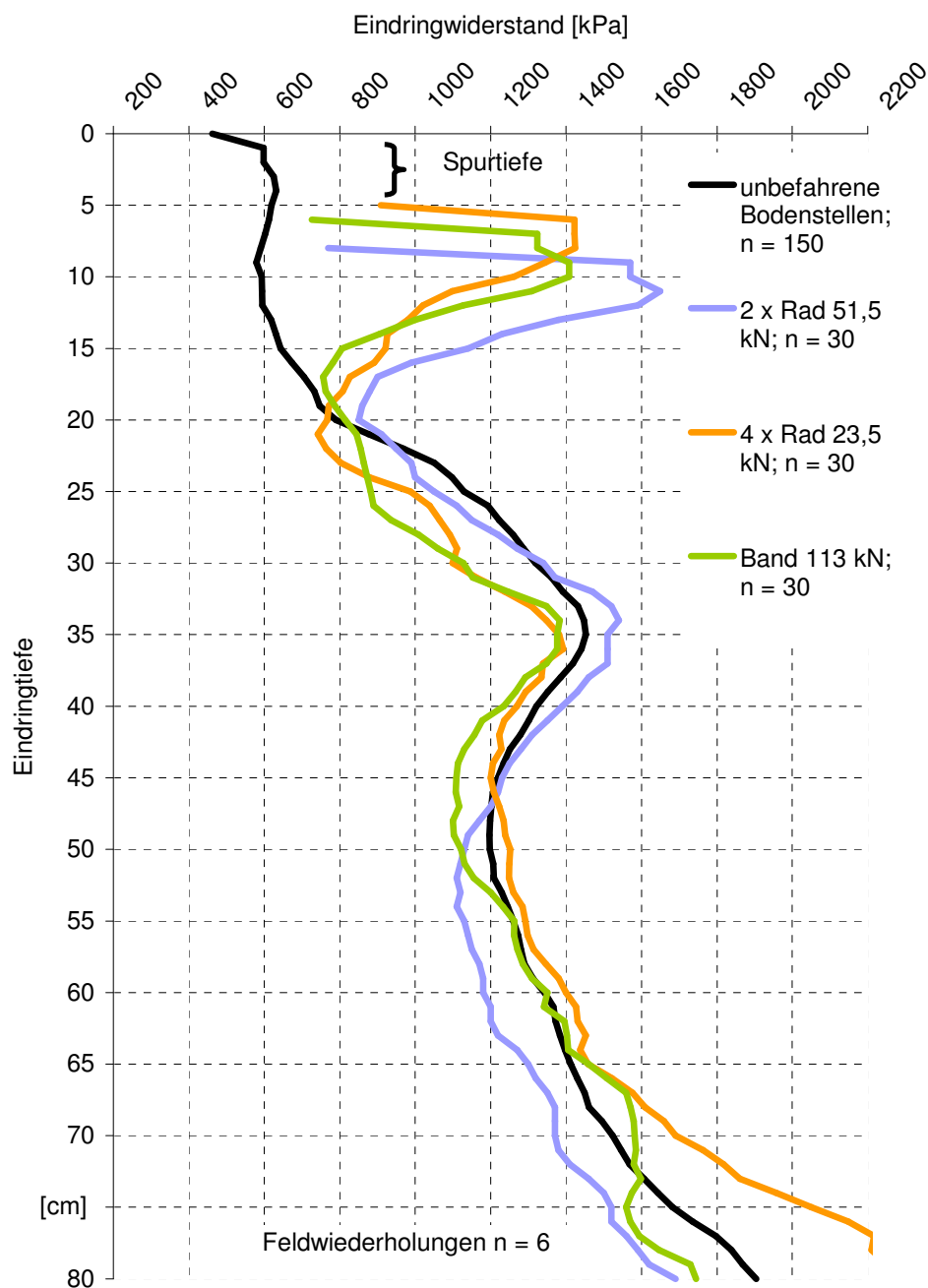


Abb. 92: Eindringwiderstandsmessung der drei Fahrwerksvarianten im Vergleich zur Kontrolle

Dadurch wurden möglichst kleinräumig beide Situationen erfasst, wobei die räumliche Varianz minimiert werden konnte. Für die Gesamtdarstellung konnten alle Daten der „Null-Parzellen“ (unbefahrene Bodenstellen) verrechnet werden. Die Kontrolle wurde aus 150 Einzelmessungen gebildet. Diese ergaben sich aus den sechs Feldwiederholungen multipliziert mit den fünf Überrollsituationen und den fünf Einstichen je Messung. Dieser Graph stellte die Ausgangssituation für den Bodenzustand im Frühjahr 2006 dar (vgl. Diskussion Standortanalyse S. 141 - 142). Der höchste Anstieg aller Eindringwiderstandsmessungen wurde in ca. 35 cm Tiefe bedingt durch die dichter lagernde Krumbasis detektiert und bei allen Überrollungssituationen festgestellt. Von 36 cm bis in 50 cm Bodentiefe nimmt der Eindringwiderstand ab, was auf weniger dicht lagernde Bodenschichten unterhalb der Krumbasis ohne signifikante Verdichtungswirkung der Belastungsvarianten hinweist. Ab 60 cm Bodentiefe laufen die Eindringwiderstandskurven weiter auseinander, was mit der zunehmenden Heterogenität in dieser Bodenschicht zusammenhängt und nicht als verdichtungswirksames Ereignis auf Grund der Befahrung mit unterschiedlichen Fahrwerken und Gewichten zusammenhängt. Der Radialreifen mit der Dimension 1050/50 R32 und einer Last von 51,5 kN verursachte bei zweifacher Überrollung signifikant höhere Eindringwiderstände im Oberboden (bis 12 cm) als alle anderen Überrollungssituationen und erreichte die höchsten Eindringwiderstände im Bereich der Krumbasis (33 – 39 cm). Die Eindringwiderstände unter dem Bandlaufwerk mit einer Last von 113 kN und unter dem Radialreifen der Dimension 540/65 R28 mit der Radlast von 23,5 kN bei vierfacher Überrollung, lagen in allen Tiefen auf identischem Niveau. Das weist auf eine vergleichbare Wirkung beider Varianten auf den Boden hin. Ab ca. 18 cm glichen sich die Eindringwiderstandskurven der Bandlaufwerksvariante mit der vierfachen Rad 23,5 kN und der Null-Variante an. Nur bis in diese Tiefe konnte eine Beeinflussung durch Bodenbelastung mit dem Penetrometer nachgewiesen werden. Die Haupteffekte und Unterschiede wurden bei allen Überrollungssituationen in der obersten Bodenschicht von 5 – 13 cm beobachtet. Die vierfache Rad- und einfache Bandlaufwerksüberrollung erzeugten in 8 bis 10 cm einen stabileren Horizont, bei dem der Eindringwiderstand über dem der Krumbasiswerte lag. Unmittelbar unter den Stollenabdrücken fanden sich die höchsten gemessenen Eindringwiderstände. Dies bestätigt den Ansatz von Söhne (1951), wonach die Spannungen direkt unter dem Rad den größten Betrag aufweist. Die Eigenstabilität des Oberbodens wurde überschritten, was zu einem Zusammenschieben der Bodenpartikel nach Lebert et al. (1991) führte. Das Diagramm verdeutlichte, dass keine der Überrollungsvarianten zu Verdichtungen unterhalb von 45 cm führten. Olf (1993) stellte bei seinen Untersuchungen zu Bandlaufwerken und Tandemachsfahrwerken fest, dass auf abgesetzten Flächen die Eindringwiderstände unter dem Bandlaufwerk in 15 cm Tiefe über und in 40 cm unter denen des Tandemfahrwerks lagen. In mittlerer Tiefe lagen beide Fahrwerke auf gleichem Niveau. Als Begründung für diesen Unterschied führte er das Phänomen des

kleinen Rades an. Die kleinen Stützrollen des Bandlaufwerkes bewirkten eine stärkere Bodenverdichtung der oberflächennahen Schichten.

Dies passt sowohl für die Penetromtermessergebnisse in Feldkirchen des Bandlaufwerkes mit 113 kN Last, als auch für die vierfache Überrollung durch den Radialreifen der Größe 540/65 R28 mit einer Last von 23,5 kN im Vergleich zur zweifachen Überrollung des Radialreifens der Dimension 1050/50 R32 mit 51,5 kN Radlast. Ergebnisse aus Untersuchungen unter Laborbedingungen von Ansorge und Godwin (2008) zu modernen Rad- und Raupenlaufwerken bestätigten dies. Hier wurde unter anderem die Wirkung der Fahrwerke auf den Boden mittels Eindringwiderstandsmessungen erhoben. Bei Messungen in einer Bodenrinne wurden ähnliche Zusammenhänge zwischen hoch belasteten Rad- und Raupenfahrwerken festgestellt, welche in Abb. 93 für unterschiedliche Reifeninnendrucke, Reifengrößen und Raupenlasten dargestellt sind.

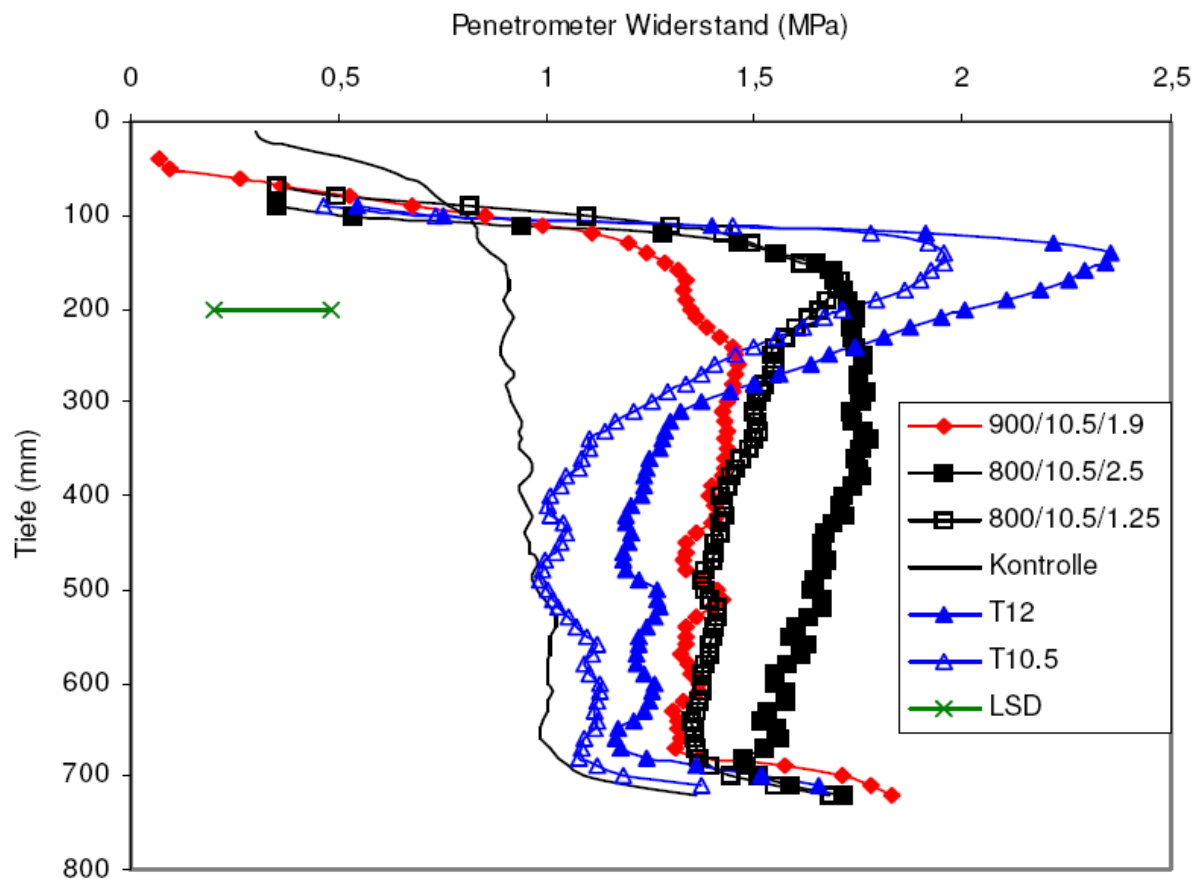


Abb. 93: Eindringwiderstandsmessung in der Bodenrinne unter Rad- und Raupenlaufwerken mit unterschiedlicher Ausführung (Ansorge und Godwin, 2008). In der Legende sind die jeweiligen Bereifungen mit Radlast und Reifeninnendruck angegeben. T12 und T10.5 steht für die jeweilige Last des Raupenlaufwerkes

Die beiden Raupenlaufwerksvarianten zeigen höhere Eindringwiderstände in 12 – 15 cm Bodentiefe. Beide Graphen fielen anschließend wieder ab und näherten sich der Kontrolle an. Da die Messungen in einer Bodenrinne mit künstlich geschichtetem Boden erfolgte, kann

bei dieser Messung keine Pflugssole detektiert werden. Ebenso verhalten sich die Minimal- und Maximalwerte der Penetrationsmessung, da ein eingefüllter Boden nicht mit einem über Jahre entstandenen natürlichen Boden zu vergleichen ist.

7.6 Fahrspursetzungen

Neben dem Eindringwiderstand ist ein weiteres Indiz für die Beanspruchung die Spurtiefe, die sich in Abhängigkeit der Befahrung (Last/Aufstandsfläche/Überrollhäufigkeit) unterschiedlich darstellt. Die Fahrspurtiefe wurde im Stollenabdruck durch Verschieben der Eindringwiderstandskurven der unbefahrenen zu den befahrenen Messstellen bestimmt. Nach Bolling et al. (1982), Bolling (1986), Krause et al. (1986), Smith et al. (1990) und Kühner (1997) bewirken gleiche Kontaktflächendrücke eine etwa gleich tiefe Fahrspur bei verschieden breiten Reifen.

Die mit dem Simulationsmodell TASC berechneten Kontaktflächendrücke der unterschiedlichen Überrollungsvarianten waren mit 69 bzw. 74 kPa bei den beiden Radvarianten in etwa gleich. Dies ließ laut Literatur gleiche Fahrspurtiefen erwarten. Bei der Bandlaufwerkvariante hingegen wurde mit 62 kPa einen etwas größeren Unterschied vermutet. Um die Fahrspurtiefe zu bestimmen, muss die Stollenhöhe von der gemessenen Einsinktiefe abgezogen werden, da nach Auflage des Zwischenstollenbereiches die gesamte Auflagefläche wirksam wird. Die einfachen Radüberrollungen erzeugten erwartungsgemäß die geringeren Spurtiefen. Die Variante durch vierfache Überrollung mit dem Radialreifen der Größe 540/65 R28 und einer Radlast von 23,5 kN führte zu einer Fahrspurtiefe von 5 cm. Die Stollenhöhe betrug 2 cm, so dass ein effektiver Einsinkeffekt in den Boden von 3 cm entstand. Gegenüber der einfachen Radüberrollung des Reifens 540/65 R28 mit 23,5 kN Last, vergrößerte sich die Spurtiefe um 2 cm. Die Verfestigung der Bodenschicht in einer Tiefe von 4 bis 6 cm wirkte einer tieferen Spurausbreitung entgegen, da diese Schicht als Widerlager wirkte und sich mit jeder weiteren Überrollung stärker verfestigte. Die Spurtiefe verdoppelte sich nahezu. Die zweifache Befahrung mit dem Radialreifen 1050/50 R32 und der Radlast von 51,5 kN erzeugte eine tiefere Fahrspur als nach der einmaligen Überrollung. Die Variante 2 x 1050/50 R32 mit 51,5 kN Last ergab nach Abzug der Stollenhöhe von 4 cm eine Einsinktiefe von 4 cm. Diese lag mit $\alpha < 0,05$ signifikant tiefer als die der anderen Varianten, was auf die höhere Tiefenwirkung der höheren Radlast hinweist.

Das Bandlaufwerk mit 113 kN Last verursachte eine Fahrspurtiefe von 7 cm, nach Abzug der Stollenhöhe (4 cm) sank dieses effektiv 3 cm in den Boden ein und erreichte das gleiche Niveau wie der Radialreifen der Größe 540/65 R28 mit der Last von 23,5 kN bei vierfacher Überrollung. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % bestand kein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen. Die Ergebnisse aus der Literatur, die aussagen, dass gleiche Kontaktflächendrücke zu gleichen Fahrspurtiefen führen, konnten nicht bestätigt werden, da das Bandlaufwerk mit dem niedrigsten rechnerischen Kontaktflächendruck die

gleiche Fahrspurtiefe erreicht wie der Radialreifen 540/65 R28 mit einem um 12 kPa höheren rechnerischen Kontaktflächendruck und vierfacher Überrollung. Der Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 mit 51,5 kN Last erzeugte bei zweifacher Überrollung und einem um 5 kPa niedrigeren Kontaktflächendruck eine signifikant tiefere Fahrspur als die vierfache Überrollung mit dem Radialreifen der Dimension 540/65 R28 und einer Last von 23,5 kN. Dies deutet darauf hin, dass die höhere Einzellast trotz der größeren Fläche tiefer einsinkt und vor allem nach der ersten Überrollung, die der Boden elastisch abfederte, bei der zweiten Überrollung ein weiteres Zusammendrücken verursachte und so eine signifikant tiefere Spur entstand.

7.7 Bodenphysikalische Parameter in Verbindung mit den Schadverdichtungsgrenzwerten

Die bodenphysikalischen Untersuchungen dienen neben der Eindringwiderstandsmessung der Untersuchung und Beurteilung der Verformungseffekte durch die unterschiedlichen Belastungsvarianten. Als Leitparameter wurde im Ergebnisteil die Luftkapazität gewählt, da diese den Einfluss der Überrollung auf die Bodenstruktur am deutlichsten beschreibt. Durch die zufällige Verteilung der Beprobungspartellen (siehe Anhang), sollte dem möglichen Einfluss heterogener Bodenzustände innerhalb des Versuchsgliedes begegnet werden. Es wurden fünf Stechzylinderproben je Parzelle und Tiefe genommen. In Verbindung mit den sechs Feldwiederholungen standen je Überrollungssituation und Bodentiefe 30 Einzelproben zur Mittelwertbildung zur Verfügung.

Durch die Befahrung wurden nur in der ersten Beprobungstiefe von 15 - 20 cm signifikante Veränderungen in der Bodenstruktur festgestellt. In der zweiten Tiefe von 38 – 43 cm konnte keine eindeutige Differenzierung zwischen befahrenen und unbefahrenen Boden festgestellt werden. In der Diskussion werden die ermittelten Parameter erläutert und mit den in der Literatur beschriebenen Kennzahlen verglichen. Die Differenzierbarkeit der Ergebnisse ist ausschließlich in der oberen Beprobungstiefe möglich, wodurch diese Tiefe intensiver betrachtet wird. Da es in dieser Arbeit um die Auswirkung der Bodenbelastung durch verschiedene Fahrwerkskonfigurationen mit 100 kN Gesamtlast geht, beschränkt sich die Diskussion auf die drei Varianten: 2 x Radialreifen 1050/50 R32 mit 51,5 kN Last, 4 x Radialreifen 540/65 R28 mit 23,5 kN Last und dem Gummibandlaufwerk der Größe 890 x 2000 mm mit 113 kN Last.

7.7.1 Trockenrohdichte

Die Ausgangswerte der Trockenrohdichte (TRD) wurden im Punkt 7.1 Standortanalyse auf Seite 141 beschrieben. Die Ausgangswerte in beiden Bodentiefen lagen für diese Bodenart laut Literatur auf einem mittleren Niveau. Durch die Befahrung stiegen die Werte im Oberbo-

den unter allen Überrollungssituationen auf ein hohes Niveau von 1,55 - 1,59 g/cm³ (nach Frielinghaus et al., 2001) an. Eine signifikante Differenzierung zwischen den Überrollungssituationen war ausschließlich zwischen der Variante der vierfachen Überrollung mit dem Radialreifen 540/65 R28 und einer Last von 23,5 kN zu allen anderen Varianten nachweisbar. Bei der einmaligen Radüberrollung durch den Radialreifen 540/65 R28 mit 23,5 kN Last kam es im Gegensatz zu den anderen Fahrwerksvarianten zu keiner signifikanten Veränderung zwischen unbefahren und befahren. Dies ist mit der geringeren Überrollungsanzahl zwischen einfacher und vierfacher Überrollung mit dem Radialreifen 540/65 R28 und 23,5 kN Last zu erklären. In der zweiten Beprobungstiefe (38 – 43 cm) blieben die TRD-Werte unbeeinflusst, d. h. die Bodenbelastung wirkte nicht bis in diese Tiefe.

7.7.2 Gesamtporenvolumen, Luftkapazität und Luftleitfähigkeit

Durch das Befahren der Messstellen mit den fünf Überrollungssituationen kam es bei allen Varianten in der Beprobungstiefe von 15 – 20 cm zu einer signifikanten Abnahme der Bodenparameter Gesamtporenvolumen (GPV), Luftkapazität (LK) und Luftleitfähigkeit (PL). Statistisch waren die Varianten nicht von einander unterscheidbar.

Gesamtporenvolumen

Die Messwerte von 40 – 43 Vol. % für den Oberboden werden in der Literatur als niedriger Wert eingeordnet (Scheffer und Schachtschabel, 1992; Kuntze et al., 1988 und Czeratzki, 1972). Nach dem Befahren der Parzellen war in 20 – 25 cm bei allen Varianten eine Abnahme auf durchschnittlich 40 Vol.-% zu beobachten, ein Wert, der als „gering“ eingestuft werden kann. In der Bodentiefe 38 – 43 cm kam es zu keiner Veränderung, wodurch eine Beeinflussung durch die Belastungsvarianten nicht stattgefunden hat.

Luftkapazität

Ein weiterer Leitparameter ist die Luftkapazität (LK). Hartge (1971) versteht darunter den Anteil der weiten Grobporen am Gesamtporenvolumen. Smith und Dickson (1990) nennen Luftkapazitätswerte von 5 bis 10 Vol.-% für funktionsfähige Böden, um ein ungestörtes Pflanzenwachstum zu ermöglichen. Stepniewski et al. (1994) fordert für ein ungestörtes Wachstum mindestens 5 – 8 Vol.-% für den Unterboden. Der sandige Lehm im regelmäßig gelockerten Krumenbereich des Versuchstandortes wies in den unbefahrenen Bereichen eine durchschnittliche Luftkapazität von 12 Vol.-% auf. Dieser laut Definition als „sehr hoch“ eingestufte Wert stand somit im Gegensatz zum GPV und TRD. Die Varianten mit den Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 und einer Last von 51,5 kN bei einfacher Überrollung sowie der Radialreifen der Dimension 540/65 R28 mit 23,5 kN Last und vierfacher Überrollung unterschieden sich beim LK-Niveau vor der jeweiligen Überrollung signifikant von allen

anderen Varianten. Im Unterboden lagen alle Überrollungssituationen der unbefahrenen Parzellen einheitlich zwischen 8 und 9 Vol.-% in dieser Bodentiefe auf hohem Niveau und waren statistisch nicht unterscheidbar. Durch die Überrollung wurde der Wert auf den befahrenen Messstellen in 15 – 20 cm im Mittel der Varianten auf 6 Vol.-% reduziert, was laut Literatur als ein für das Pflanzenwachstum kritischer Wert anzusehen ist (Werner und Paul, 1999). Da in der zweiten Probenahmetiefe (38 - 43 cm) ähnlich der zuvor beschriebenen Parameter keine statistisch nachweisbare Differenzierung zwischen unbefahrenen und befahrenen Boden festgestellt wurde, haben die Lasten und Fahrwerkskonfiguration unter den vorliegenden Bedingungen zu keiner signifikanten Verformung im Unterboden geführt. Die Erhöhung der Messwerte bei der Überrollungssituation 5 liegt im Schwankungsbereich des Parameters Luftkapazität was in diesem Fall mit der räumlichen Variabilität des Bodens begründet werden kann.

Luftleitfähigkeit

Die in Abb. 94 dargestellten Boxplots des Parameters Luftleitfähigkeit in der Krume zeigen eine hohe Streuung in den unbefahrenen Parzellen.

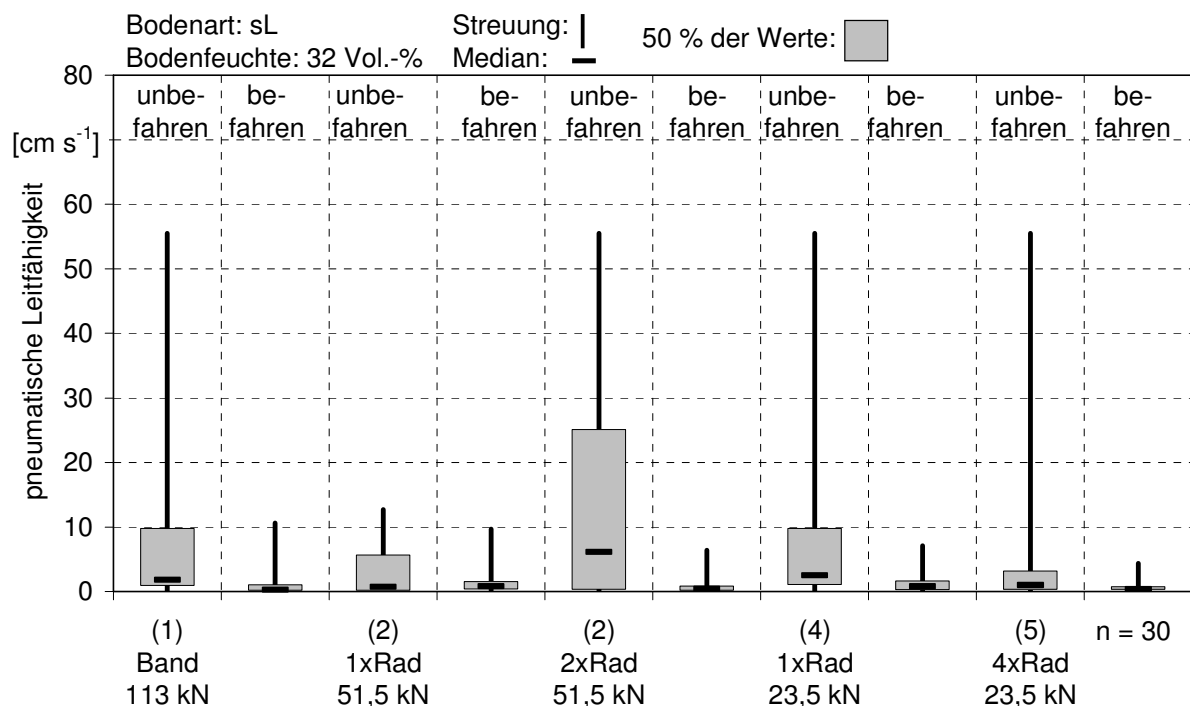


Abb. 94: Pneumatische Luftleitfähigkeit des unbefahrenen und befahrenen Bodens im Krumenbereich (15 – 20 cm)

Innerhalb der grauen Box befinden sich 50 % der Stichprobe. Der senkrechte Strich stellt die Streuung der Maximalwerte dar. Der Median ist als waagrechter Balken dargestellt. Aufgrund der regelmäßigen Bearbeitung dieses Bodenhorizontes sowie durch den Einfluss der Witte-

lung vom Zeitpunkt nach der Bearbeitung im Herbst 2005 bis hin zur Versuchsdurchführung im April 2006 (Frostgare), stellt die hohe Streuung der Luftleitfähigkeit keine Besonderheit dar. Zudem streuen Leitfähigkeitsparameter generell stärker als volumenbezogene Bodenparameter. Generell wurde durch die fünf unterschiedlichen Belastungsvarianten die Streuung im Oberboden geringer, wobei sich die durchschnittliche Luftleitfähigkeit bei allen befahrenen Messstellen auf weniger als 2 cm/s^{-1} reduzierte. Alle Überrollungssituationen verursachten nahezu den gleichen Effekt für die Beprobungstiefe von 15 – 20 cm. Aufgefallen ist, dass der niedrigste Wert der unbefahrenen Parzelle sowie der höchste auf der befahrenen Parzelle in der Messtiefe von 15 - 20 cm unter dem Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 und der Last 51,5 kN bei einfacher Überrollung gemessen wurde. Dies ist damit zu erklären, dass durch den dichter lagernden Boden in der Ausgangssituation eine höhere Tragfähigkeit vorhanden war, die eine einmalige Überrollung mit 51,5 kN besser abstützen konnte und den Boden weniger stark verformte. Eine statistisch nachweisbare Differenzierung zwischen den einzelnen Überrollungssituationen nach der Befahrung war in der Messtiefe 15 – 20 cm nicht möglich. Im Beprobungshorizont 38 – 43 cm kam es bei der Leitfähigkeit zu keiner Veränderung durch die Belastungsvarianten.

Unter den Bodenbedingungen im Frühjahr 2006, mit hoher Bodenfeuchte und lockerem Bodenhorizont bis in 15 cm Tiefe, führte jede Überrollung bereits bei der ersten Überfahrt zu einer Bodenverdichtung, wobei sich die Werte laut Literatur in kritische Bereiche verschoben haben. Das lässt den Schluss zu, dass bereits ein Radialreifen der Dimension 540/65 R28 mit einer Last von 23,5 kN und 60 kPa Reifeninnendruck bei einfacher Überrollung zum Zeitpunkt der Überfahrt im Frühjahr 2006 zu hoch waren. Das Transportieren der Gesamtlast durch viermalige Überrollung mit dem Radialreifen der Dimension 540/65 R28 und 23,5 kN Last bzw. durch zweimaliges Überrollens des Radialreifen 1050/50 R32 mit 51,5 kN und der einmaligen Überrollung mit dem Gummibandlaufwerk 2.000 mm x 890 mm mit 113 kN zeigte in der Endbelastung keine Differenzierung zwischen den Überrollungssituationen. In der zweiten Beprobungstiefe konnte weder eine Unterscheidung zwischen unbefahren und befahren, noch eine Unterscheidung der einzelnen Überrollungssituation festgestellt werden.

Die aus Stechzylinderproben ermittelten Veränderungen in der Ackerkrume infolge der Befahrung im Frühjahr 2006 können durch eine krumentiefe Bodenlockerung beseitigt werden. Ist eine Lockerung im Falle einer Überrollung, z. B. durch das Ausbringen von Wirtschaftsdünger nicht möglich, kann ein zu dicht lagernder Oberboden zu Ertragseinbußen führen. Der Zusammenhang von dicht lagerndem Oberboden ist in Abb. 95 dargestellt.

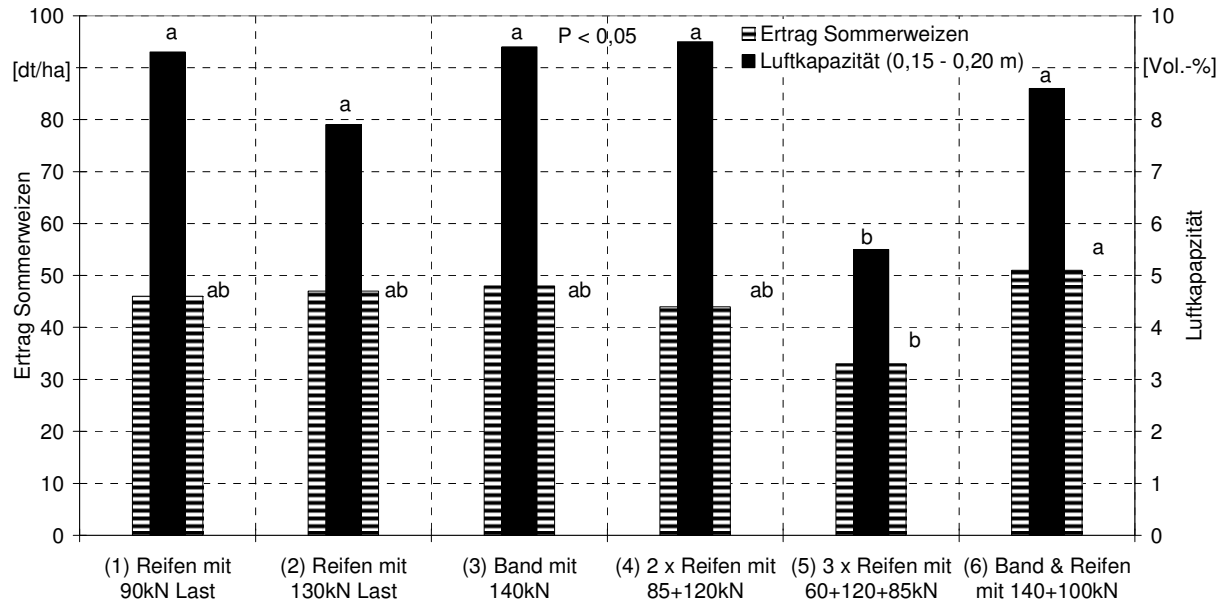


Abb. 95: Einfluss der Dichtlagerung des Oberbodens auf den Ertrag von Sommerweizen (Geischer et al., 2010)

Durch das Beernten der Frucht Sommerweizen bei unterschiedlich überrollten Streifen konnte der Zusammenhang zwischen Dichtlagerung des Oberbodens und Einflusses auf den Ertrag nachgewiesen werden (Geischer et al., 2010).

8 Schlussfolgerungen

Bei den im April 2006 für das Frühjahr typischen Bodenverhältnissen konnte mit der dynamischen Druckmessung (Schlauchdrucksondenmessung) und der anschließenden Analyse der Messdaten eine differenzierte Bewertung der unterschiedlichen Überrollungssituationen bis in eine Bodentiefe von 40 cm vorgenommen werden. Dabei wurde festgestellt, dass ein modernes Gummibandlaufwerk eine Last von 113 kN bei einfacher Überfahrt besser abtragen kann, als moderne Luftreifenfahrwerke mit 2 x 51,5 kN Radlast (Reifendimension: 1050/50 R32) oder 4 x 23,5 kN Radlast (Reifendimension: 540/65 R28) und nahezu identischem Kontaktflächendruck. Dies entsprach der in der Zielsetzung aufgestellten Hypothese (vgl. S. 87). Mit der Zunahme der Überrollungsanzahl konnte ein analoger Anstieg des Bodendruckes bis in eine Tiefe von 40 cm nachgewiesen werden, wobei die Radlast für die Höhe des Druckanstieges entscheidend war. Die vierfache Überrollung mit den 23,5 kN schweren Lasten kam der Überrollung mit dem Gummibandlaufwerk am nächsten. Das Einbeziehen des Faktors Zeit mittels der neu entwickelten Methode GMPw führte zu keiner veränderten Reihung der ermittelten Spitzendruckergebnisse. Weitere Anwendungen sind notwendig, um diese Methode zu evaluieren. Die von TASC 2.0 simulierten Werte waren im Bereich des Oberbodens (bis 20 cm) vergleichbar mit den gemessenen Schlauchdrucksondendaten. In den tieferen Schichten erzeugt laut TASC 2.0 das Gummibandlaufwerk höhere Druckspannungen, die von der Schlauchdrucksondenmessung nicht bestätigt wurden.

Im Oberboden bis 20 cm konnte eine negative Veränderung der meisten Bodenparameter durch die Befahrung der fünf Fahrwerksvarianten nachgewiesen werden. Die Penetrometermessung und die Stechzylindermethode detektierten eine statistisch nachweisbare Veränderung der Bodenstruktur im Oberboden (bis 20 cm). Eine Differenzierung zwischen den Überrollungssituationen hinsichtlich Bodenverformung bis 20 cm konnte nur mit dem Penetrometer nachgewiesen werden, wobei die Fahrwerksvariante mit Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 und 51,5 kN Last bei zweimaliger Überrollung signifikant höhere Eindringwiderstände als die übrigen Fahrwerksvarianten verursachte. Im Unterboden rief die jeweilige Gesamtlast von ca. 110 kN keine statistisch nachweisbaren Veränderungen der Bodenstruktur hervor.

Bauartbedingt verteilen moderne Gummibandlaufwerke die Last gleichmäßiger über die Aufstandsfläche als dies mit modernen Radialreifen möglich ist. Die geringere Tiefenwirkung von modernen Gummiraupenlaufwerken bei schweren Erntemaschinen, wie sie von Weißbach (2004) sowie Ansorge und Godwin (2007) beschrieben wurden, konnten bei der dynamischen Schlauchdrucksondenmessung bestätigt werden. Demnach können moderne Gummibandlaufwerke ein alternatives Fahrwerkskonzept zu Radlaufwerke bei sehr hohen Lasten von z. B. selbstfahrenden Erntemaschinen darstellen.

Geringere Radlasten mit erhöhter Überrollungsanzahl wirken sich vorrangig auf den Ober- als auf den Unterboden aus, wodurch eine Radlastverringerung gegenüber einer Verringerung der Überrollungsanzahl vorzuziehen ist. Eine pauschale Rad- bzw. Achslastbeschränkung, wie sie Ehlers et al. (2003) gefordert haben und Ende der 90er Jahre von einer internationalen Forschergruppe (Hakanson et al., 1987) vorgeschlagen wurde, kann nicht uneingeschränkt beigeplant werden. Radlasten, die deutlich höher sind als die in dieser Arbeit vorgestellten, stellen ein höheres Risiko hinsichtlich einer negativen Bodenverformung im Unterboden dar. Als besonders kritisch sind Radlasten einzuschätzen, die über der technischen Freigabe des Reifenherstellers liegen. In Tab. 34 sind statistisch nachweisbare Veränderungen in der Bodenstruktur für zwei Bereiche des Unterbodens während eines dreijährigen Feldversuches bei der Befahrung mit KRB6 dargestellt (Geischeder et al., 2007).

Tab. 34: Zusammenstellung der signifikanten (x) Verformungen (GPV und LK) in den zwei Beprobungstiefen bei den dreijährigen Überrollungsversuchen mit KRB6

Belastungsanzahl Reifen/ Gummiband [kN]	1 x 1050/50 R32		1 x 1050/50 R32		1 x 2.000x890 mm		2 x 1050/50 R32		3 x 1x900/60 R32+ 2x1050/50 R32 60+115+88		2 x 2.000x890 mm+ 900/65 R32 140 +100		
	30	40	30	40	30	40	30	40	30	40	30	40	
2004			x									x	
2005			x	x			x	x				x	
2006							x						

x signifikanter Unterschied bei GPV oder LK, vor und nach einer Überrollung

Das als Richtlinie dienende Befahrbarkeitsmodell nach Chamen et al., (2003) in Abb. 96 nutzt als Entscheidungshilfe den Faktor Reifeninnendruck. Wobei dieser einer Radlastbeschränkung hinsichtlich der Reifentragfähigkeit gleich kommt.

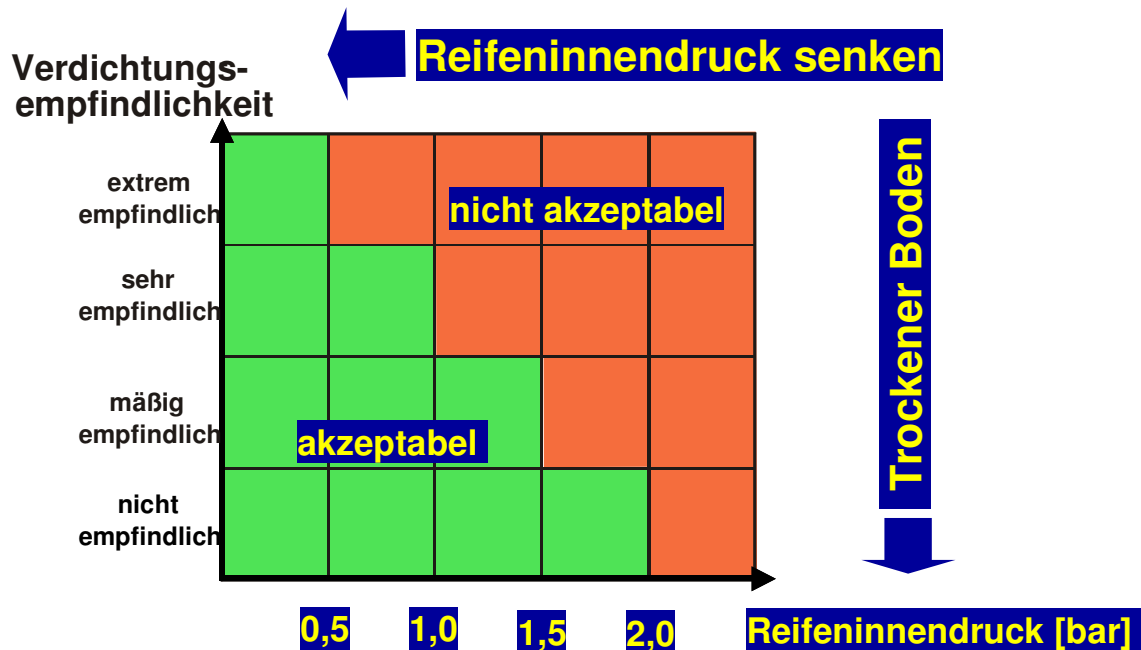


Abb. 96: Befahrbarkeitsmodell vereinfacht nach Tijinki und Spoor (2004)

Die im Versuch eingesetzten Radialluftreifen wurden nach Vorgabe der technischen Betriebsanleitung mit den jeweiligen Reifeninnendrücken entsprechend dem Gewicht befüllt. Der Radialreifen der Dimension 540/65 R28 und der Radlast von 23,5 kN wurde mit 70 kPa Reifeninnendruck, der Radialreifen 1050/50 R32 mit 51,5 kN Radlast wurden mit 60 kPa befüllt. Der im Frühjahr befahrene Boden ist nach dem Modell von Chamen et al. (2003) als extrem empfindlich einzustufen, da eine hohe Bodenfeuchte bei guter Lockerung im Frühjahr 2006 zu Grunde lag. Mit den eingestellten Reifeninnendrücken wurde die Vorgabe für diese Bedingungen knapp überschritten. Die Überschreitung führte in diesem Fall zu keiner Beeinträchtigung des Unterbodens, wenngleich im Oberboden signifikante Veränderungen aller Messparameter nach der Befahrung bei jeder Überrollungssituation festgestellt wurden.

9 Zusammenfassung

Die voranschreitende Rationalisierung der Landbewirtschaftung ist verbunden mit dem Einsatz von immer leistungsfähigeren und größeren Landmaschinen, wodurch das Risiko der Bodenschadverdichtung zunimmt. Gesetzliche und technische Grenzen verhindern den Einsatz von sehr großen und besonders breiten Reifen bei Großmaschinen wie z. B. Mähdrechern. Zusätzliche Achsen sind bauraumbedingt oft nicht realisierbar und verteuern die Maschinen. Aus diesem Grunde verbessert und optimiert die Landmaschinenindustrie die Standardfahrwerke wie z. B. die Reifentechnologie und entwickelt neue Fahrwerkskonzepte zur Erhöhung der Aufstandsfläche bei den größer werdenden Maschinen und zur Minimierung des technischen Verdichtungsrisikos. Hier liegt heute die größte Diskrepanz, bei Betrachtung der gestiegenen Fahrzeugmassen der letzten 40 Jahren. In der deutschen Übersetzung der von 1638 veröffentlichten „Discorsi“ stellte Galileo Galilei dies bereits fest. Söhne (1964) konkretisierte dies für Landmaschinen mit der Aussage: *„Mit Rücksicht auf Bodenverdichtung und Kraftübertragung soll der Druck in der Berührungsfläche gleich bleiben, ja er sollte sogar bei größeren Schleppern kleiner werden...“*.

Moderne Radialreifen besitzen ein hohes Optimierungspotential, was durch eine Innendruckanpassung ausgeschöpft werden kann. An den selbstfahrenden Erntemaschinen ist das Potential zumeist bereits ausgeschöpft. Weiterentwickelte Radialreifen erlauben eine höhere Belastbarkeit bei geringerem Reifeninnendruck und größerer Aufstandsfläche (z. B. < 100 kPa bei gleich bleibender Tragfähigkeit, unabhängig vom Geschwindigkeitsbereich).

Die in der Literatur z. T. widersprüchlichen Aussagen zur Wirkung von Rad- und Gummibandlaufwerke auf den Ackerboden sowie die Untersuchungen der ersten Gummibandlaufwerksgeneration konnten nicht uneingeschränkt auf moderne Rad- und Gummibandlaufwerke übertragen werden. Dazu wurde ein streng systematischer Versuchsansatz gewählt, der auf Grund einer fehlenden Bodenrinne im Feld durchgeführt wurde. Dabei wurde die Wirkung unterschiedlicher Fahrwerke bei annähernd gleichem Kontaktflächendruck und einer etwa gleich hohen Gesamtlast in einem randomisierten, sechsfach wiederholten Parzellenversuch untersucht.

Alle ermittelten Ergebnisse durch Simulation und Messung ergaben ein identisches Bild für den Oberboden bis 20 cm. Hier verursachte jede Art der Überrollung:

1. Gummibandlaufwerk (2.000 mm x 890 mm) 113 kN Last bei einfacher Überfahrt,
2. Radialreifen 1050/50 R32 mit 51,5 kN Last bei einfacher Überfahrt,
3. Radialreifen 1050/50 R32 mit 51,5 kN Last bei zweifacher Überfahrt,
4. Radialreifen 540/65 R28 mit 23,5 kN Last bei einfacher Überfahrt und
5. Radialreifen 540/65 R28 mit 23,5 kN Last bei vierfacher Überfahrt

eine signifikante Veränderung der Bodenparameter. Die Schlauchdrucksondenmessung wies eine Differenzierung der Belastungsvarianten bis in eine Tiefe von 40 cm nach, wobei das Gummibandlaufwerk den geringsten Bodendruck aller Messungen verursachte. Dabei konnten in der obersten Messtiefe von 20 cm alle vier Laufwerksrollen mit den Schlauchdrucksonden detektiert werden. Gegenüber früheren Messungen wurde zwischen den Laufwerksrollen kein Druckabfall bis auf das eingestellte Vordrucksniveau beobachtet, da die hohen Spannkkräfte moderner Gummibandlaufwerke in Fahrtrichtung eine gleichmäßigere Druckverteilung ermöglichen.

Bei den Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 mit 51,5 kN Last und zweifacher Überfahrt sowie der Dimension 540/65 R28 mit 23,5 kN und vierfacher Überfahrt konnte mit jeder zusätzlichen Überrollung eine Druckerhöhung in den Tiefen 20, 30 und 40 cm mit den Schlauchdrucksonden festgestellt werden. Die vierfache Radüberrollung des Reifens 540/65 R28 mit 23,5 kN Last verursachte bis in einer Tiefe von 40 cm einen niedrigeren Bodendruck als das Rad der Dimension 1050/50 R32 mit 51,5 kN Radlast. Der höchste Druckabbau wurde bei beiden Radvarianten zwischen 40 und 50 cm festgestellt, wobei keines der Fahrwerke eine statistisch nachweisbare Druckerhöhung in 50 cm erzeugte, die über dem eingestellten Vordruckniveau lag. Die dynamische Druckmessung wies unter den Radialreifenfahrwerken eine größere Tiefenwirkung als beim Gummibandlaufwerk nach. Grundsätzlich verhielten sich das Gummibandlaufwerk mit 113 kN Last und die vierfache Radüberrollung mit der Dimension 540/65 R28 und 23,5 kN Last ähnlich. Beide Fahrwerksvarianten wirkten sich stärker auf die Bodenoberfläche bis in 20 cm aus. Der Druckabbau über die Tiefe ging schneller von statten als bei dem Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 mit 51,5 kN Last. Die Gewichtung der maximalen Bodendrucke aus der dynamischen Messung unter Berücksichtigung der einwirkenden Zeit mit dem neu angewendeten GMPw (Gewichteter Mittleren verdichtungswirksamen Bodendruck) veränderte das Ergebnis nicht. Die Vorzüglichkeit der Lasteinbringung mit einem modernen Gummibandlaufwerk sowie der mehrfachen Überrollung mit dem Reifen der Dimension 540/65 R28 und 23,5 kN Last gegenüber der Überrollung mit dem Radialreifen der Dimension 1050/50 R32 mit 51,5 kN Last blieb bestehen. Weitere Tests sollten in Zukunft zur Validierung dieser neuen Methode erfolgen.

Die Messung der Bodenverformung mittels Stechzylinderproben zeigte neben einer signifikanten Veränderung der Bodenparameter zwischen befahren und unbefahren keine Differenzierung innerhalb der fünf Überrollungssituationen im Oberboden. Eine Unterscheidung der Überrollungsvarianten bis zu dieser Tiefe von 25 cm war mit dem Penetrometer möglich. Die mehrfache Überrollung durch die Radlaufwerke und die Überrollung mit dem Gummibandlaufwerk erzeugten höhere Eindringwiderstände im Oberboden, als die jeweils einmalige Überrollung der unterschiedlichen Radialreifen. Im Unterboden kam es weder bei der Penetrometermessung noch bei der Auswertung der Bodenproben zu Veränderungen zwischen

befahrenen und unbefahrenen Messstellen. Die für diese Tiefe hohe LK von durchschnittlich > 8 Vol.-% (Werner und Paul, 1999) wurde durch die unterschiedlichen Belastungsstufen nicht beeinträchtigt. Das bedeutet, dass unter den vorhandenen Feldbedingungen des Frühjahr 2006, die mit den Fahrwerken abgetragenen Lasten von bis zu 110 kN und annähernd gleichen mittleren Kontaktflächendruck, zu gering waren, um eine Verformung im Unterboden hervorzurufen.

Summary

The trend forward for improvements of productivity in agriculture is associated with usage of more and more powerful and bigger agricultural machines by which a higher risk of soil compaction is increasing. Legal restrictions and technical limits prevent the usage of high volume and especially big tyres on machines like combines for example. Additional axles increase costs and are not possible on each machine by reason of available space. Based on these circumstances the agricultural mechanical engineering industry is optimizing and improving standard undercarriages e. g. tyre technology and is developing new undercarriage concepts for increasing the contact area of getting larger machinery and for minimizing the risk of soil compaction. Today we have the biggest discrepancy in this point regarding the increased vehicle masses over the last 40 years. Galileo Galilei did conclude this discrepancy. It is published in a German translation from 1638 called "Discorsi". In 1964 Söhne did concretise that for agricultural machines with the words: *"With consideration on soil compaction and power transmission the pressure in the contact area should remain constant, yes the pressure should be smaller by bigger tractors..."*.

Modern radial tyres have a high potential for optimizing which is utilizing by inflation pressure adjustment. For self-propelled machines that potential is utilized most of the time. New developed radial tyres have a higher load capacity with less inflation pressure and a higher contact area (e. g. less than 100 kPa with the same load capacity, independently of the speed). In the literature described partly inconsistent statements of the impact of undercarriage systems consist of modern radial tyres and rubber belt tracks on arable soil is not unrestricted transferable on modern wheel and rubber tracked undercarriages. A stringently systematic field trial was designed because no suitable soil bin was available. The investigation was made by different undercarriage systems with nearly the same contact area pressure and the same load. The randomized field trial with six repetitions of each tracking situation has been carried out.

All determined results by simulation and measurements show an identically picture in the upper soil till 20 cm. Each kind of passes:

- 1st single pass with a rubber belt track (2.000 mm long, 890 mm wide) and 113 kN load,
- 2nd single pass with a radial tyre 1050/50 R32 and 51.5 kN load,
- 3rd double passes with a radial tyre 10/50/50 R32 and 51.5 kN load,
- 4th single pass with a radial tyre 540/65 R28 and 23.5 kN load and
- 5th four passes with a radial tyre 540/65 R28 and 23.5 kN load

causes a significant change in soil parameters. Soil pressure during the passing over was recorded by hose type pressure transducers and shown differentiation between the treatments in a depth till 40 cm by that the rubber belt track had the minimal soil stress of all repetitions. All four track rollers were detected in the upper depth of 20 cm by hose type pressure

transducers. Against previous investigations with this type of sensors there was no observation in decrease of pressure to pre-pressure level between the rollers. The better distribution of pressure in driving direction is caused by high tension forces of modern rubber belt tracks. A pressure increasing was recorded by hose type pressure transducers in the depth of 20, 30 and 40 cm by every pass of the radial tyre with the dimension of 1050/50 R32 and 51.5 kN load (two times) and by the radial tyre with the dimension of 540/65 R28 and 23.5 kN load (four times). The four passes of the radial tyre 540/65 R28 and 23.5 kN load caused till 40 cm depth less soil stress than the double pass by the radial tyre 1050/50 R32 and 51.5 kN. The highest pressure reduction under the treatment by tyres was located between 40 and 50 cm depth. No soil stress was detected in 50 cm depth by any undercarriage system. The dynamic measurement recorded a higher depth effect under the wheeled undercarriage systems. The performance of the rubber belt track with 113 kN load and the four passes of the radial tyre 540/65 R28 with 23.5 kN load were basically similar. Both undercarriage systems had a higher impact on the upper soil till 20 cm. The reduction of pressure was faster than under the radial tyre 1050/50 R32 with 51.5 kN load. The weighting of the maximum soil stress of the dynamic measurement in due consideration react on time with the new developed GMPw (weighted averaged effective soil compaction) did not change the result and the ranking of the treatments. The excellence of the carriage load by modern rubber belt tracks against multi pass by radial tyre 540/65 R28 with 23.5 kN load and by radial tyre 1050/50 R32 with 51.5 kN load persists. For the future further tests should making for validation.

The soil deformation measured by soil samples shown a significant change between treated and untreated areas in the upper soil but no differentiation between the five treatments. A determination of the treatments till 25 cm depth was possible with the cone penetrometer. The multi pass by tyres and the pass by rubber belt tracks create higher penetration resistance in the upper soil than the treatments with one pass by each of the two radial tyres. For the sub soil there were no differences between passed and not passed areas with cone penetrometer and soil samples detected. After passing a high coarse porosity of average > 8 volume % (Werner & Paul, 1999) was detected for the subsoil and was an evidence for no influence by passing with different treatments. This means under the field conditions in spring 2006 and the treatments by different undercarriage systems with nearly the same contact area pressure the load up to 110 kN was to less to deform the sub soil.

Literaturverzeichnis

1. **AG BODENKUNDE (1994):** Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Auflage, Hannover. S. 329.
2. **AICHELE, M., DOPHEIDE, G. und HAVERKAMP, M. (2010):** Entwicklung von hoch flexiblen Niederdruckreifen für Erntemaschinen, speziell für Mähdrescher. VDI-Berichte Nr. 2111. S. 441 – 450.
3. **ANSORGE, D. (2006):** Soilmanagement and Profitability. Available at: http://www.claas.com/countries/generator/cl-pw/de/services/fachschulservice/terra_trac/download/praesi,lang=de_DE.pdf
4. **ANSORGE, D. und GODWIN, R. (2006):** High Axle Load – Track – Tire Comparison. Soil Management for Sustainability. Advances in Geocology 38, S. 9 – 14.
5. **ANSORGE, D. und GODWIN, R. (2007):** Raupen und Reifen. Landtechnik 62: S. 30 – 31.
6. **ARVIDSSON, J., TRAUTNER, A. and KELLER, T. (2002):** Influence of tyre inflation pressure on stress and displacement in the subsoil. Sustainable Land Management – Environmental Protection – A Soil Physical Approach. Advances in Geocology 35: S. 331 – 338.
7. **ASAE – NORM (1987):** Soil cone penetrometer. ASAE Standard: ASAE 313.
8. **BALLARAT UNIVERSITY VICTORIA (2006):** 4th Australian Controlled Traffic Farming Conference 2006 September 27th – 29th. Available at: www.actfa.net/conferences/CTF06_overview.pdf.
9. **BAVEL van, C. H. M. (1950):** Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 14: S. 20.
10. **BECHER, H. H. (1978):** Wasserspannungsabhängiger Eindringwiderstand von Modellböden. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 141: S. 621 – 633.
11. **BLUME, H. – P. (1984):** Bodenkundliches Laborpraktikum, Kiel.
12. **BMU (1998):** Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (BBodSchG). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Bundesgesetzblatt I 1998, 502 FNA 2129-32, GESTA NO 18, geändert durch Art. 3 G vom 09.12.2004.
13. **BMELVL (2007):** Bundesministerium für Verbraucher, Ernährung und Landwirtschaft Agrarpolitischer Bericht der Bundesregierung, S. 42.
14. **BOLLING, I. H. und SÖHNE W. (1982):** Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge. Landtechnik 37 (2): S. 54 – 57.
15. **BOLLING, I. H. (1985):** How to predict the soil compaction of agricultural tires. In Proc. International Conference on Soil Dynamics: S. 936 – 952. Auburn, AL: Auburn University.

16. **BOLLING, I. H. (1986):** Beanspruchung des Bodens beim Schlepper- und Maschineneinsatz. In KTBL – Schrift 308 Bodenverdichtungen beim Schlepper- und Maschineneinsatz und Möglichkeiten zu ihrer Verminderung: S. 51 – 58. KTBL–Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup (Westfalen).
17. **BOLLING, I. H. (1987):** Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen – Neue Mess- und Rechenmethoden. Dissertation, TU München.
18. **BRINCH HANSEN J. und LUNDGREN H. (1960):** Verdichtungstheorie. In Hauptprobleme der Bodenmechanik. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer Verlag. S. 110 – 115
19. **BRUNOTTE, J. (1990):** Landtechnische Maßnahmen zur bodenschonenden und bodenschützenden Zuckerrübenanbau. Dissertation, Universität Kiel.
20. **BRUNOTTE, J. und LORENZ, M. (2006):** Mündliche Mitteilung vom 05.07.2006. Vergleich von Bodendruck bei Reifen- und Gummibandlaufwerken.
21. **BRUNOTTE, J. (2007):** Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide. Landbauforschung Völkernrode Sonderheft 305, S. 60 – 61, S. 160.
22. **CHAMEN, W. C. T., CHITTEY, E. T., LEEDE, P. R., GOSS M. J. and HOWSE, K. R. (1990):** The effect of tyre soil contact pressure and zero traffic on soil and crop responses when growing winter wheat. J. Agr. Eng. Res. 47, S. 1 – 21.
23. **CHAMEN, W. C. T., ALAKUKKU, L., PIRES, S., SOMMER, C., TIJINK, F. and WEISSKOPF, P. (2003):** Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2: Equipment and field practices. Soil Till. Res. 73: S. 161-174.
24. **CLAAS (2006):** Available at: www.claas-cit.com. Accessed 5. May 2006.
25. **COOPER, A. W. (1957):** Strain gag cell measures soil pressure. Agric. Engng. 38, Nr. 2, S. 232 – 235 u. 246.
26. **CZERATZKI, W. (1972):** Die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand. Landbauforschung Völkernrode 22 (1): S. 29 – 36.
27. **DBV DEUTSCHER BAUERNBERBAND (2008):** Situationsbericht 2008. Eigenverlag DBV, Berlin: S. 288.
28. **DEGRELL, O. (2006):** Ackerschlepperreifen. DLG-Prüfbericht 5600F: S. 3 – 4.
29. **DEMMELE, M. und GEISCHEDER, R. (2006):** Die „Leichtigkeit“ des Erntens - Verwiegung der Zuckerrübenroder. Deutsche Zuckerrübenzeitung (dzz). Ausgabe Nr. 6/200,; S. 9.
30. **DIEPOLDER, M., RASCHBACHER, S., BRANDHUBER, R. und DEMMELE, M. (2010):** Weniger Druck machen. dlz agrarmagazin 3/2010, S. 26 – 31.
31. **DIN 19683-13, (2007):** Bodenbeschaffenheit – Physikalische Laboruntersuchungen – Teil 13: Bestimmung des Substanzanteils, Porenanteils und der Porenziffer. Beuth Verlag, Berlin. S. 5.
32. **DIN ISO 11272 (2001):** Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Trockenrohdichte. Verlag Beuth, Berlin. S. 10.

33. **DIN ISO 11508 (2002):** Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Kronrohddichte (ISO 11508: 1998). Verlag Beuth Berlin. S. 9.
34. **DIN ISO 11274 (2001):** Bodenbeschaffenheit – Bestimmung Wasserrückhaltevermögens – Laborverfahren (ISO 11274: 1998). Verlag Beuth Berlin. S. 22.
35. **DISERENS, E. (2002):** Ermittlung der Reifen-Kontaktfläche im Feld mittels Rechenmodell. Bericht der Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwissenschaft und Landtechnik (FAT), Nr. 613, Schweiz, S. 16.
36. **DISERENS, E. and STEINMANN, G. (2002):** Calculation of pressure distribution in moist arable soils in eastern switzerland: a simple model approach for the practice. In (Ed) L. Vulliet, L. Laloui und B. Schrefler. Environmental Geomechanics. Monte Verita
37. **DISERENS, E. (2004):** Wechselwirkung zwischen Fahrwerk und Ackerboden. FAT Berichte 613: S. 1 – 16.
38. **DISERENS, E. (2010):** Tyres/Tracks And Soil Compaction (TASC 2.0). Eine PC-Anwendung zur Prävention von Schadverdichtungen in der Praxis. Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), Schweiz.
39. **DUMBECK, G. (1986):** Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden. Dissertation, Universität Giesen. Giessener Bodenkundliche Abhandlungen 3.
40. **DÜRR, H. J., PETELKAU, H. und SOMMER, C. (1994):** Literaturstudie Bodenverdichtung. Bericht aus dem Institut für Betriebstechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) im Auftrag des Umweltbundesamtes. Unveröffentlicht.
41. **EBEL, A. (2006):** Druckverteilung auf Kontaktflächen unter Forstreifen. Dissertation, Universität Göttingen.
42. **EHLERS, W., SCHMIDTKE, K. und RAUBER, R. (2003):** Änderung der Dichte und Gefügefunktion südniedersächsischer Lössböden unter Ackernutzung. Landnutzung und Landentwicklung. Heft 1/2003: S. 9 – 18.
43. **ETANA, A. and HAKANSSON, I. (1994):** Swedish experiments on the persistence of subsoil compaction caused by vehicles weight high axle load. Soil & Tillage Research 29: S. 167 – 172.
44. **FELDHAUS, D. und KRÖGER, H. (1984):** Messung des Durchdringungswiderstandes im Boden mit einem Minipenetrometer hoher Empfindlichkeit. Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkud. Berlin 28 (12): S. 715 – 721.
45. **FRIELINGHAUS, M., PETELKAU, H. und SEIDEL, K. (2001):** In: Schadverdichtungen in Ackerböden – Entstehung, Folgen, Gegenmaßnahmen. 14. Wissenschaftliche Fachtagung Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, 5. Dezember 2001. S. 88.
46. **Galileo, Galilei (1638):** Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetzte betreffend („Discorsi“). Erstdruck 1638, deutsche herausgegeben von A. von Oettingen. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1964

47. **GARCIA Y GARCIA, A. (1967):** Statische Verdichtung von sandigem Lehmboden, leichtem Sand und schwerem Tonboden. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Landmaschinen, TU München.
48. **GEISCHEDER, R., DEMMEL, M. und BRANDHUBER, R. (2007):** Preventive Soil Protection at Sugar Beet Harvest – Comparison of Different Types of Undercarriages. VDI-Berichte Nr. 2001, 2007. S. 455 -462.
49. **GEISCHEDER, R., DEMMEL, M. und BRANDHUBER, R. (2007):** Wirkung verschiedener Fahrwerke auf die Bodenstruktur bei gleichem Kontaktflächendruck. Landtechnik SH/2007: S. 268 – 269.
50. **GEISCHEDER, R. und RAINER, H. (2008):** Gefedertes Gummigurtbandlaufwerk für schwere Landmaschinen mit automatischer Auflagekraftoptimierung. VDI-Berichte Nr. 2045: S. 151 – 156.
51. **GEISCHEDER, R., RAINER, H. und HALLER, CH. (2010):** Aktiv gefedertes Gummibandlaufwerk mit automatischer Auflagekraftoptimierung. Landtechnik 65: S. 170 – 173.
52. **GEISCHEDER, R., DEMMEL, M. und BRANDHUBER, R. (2010):** Effects of Heavy Agricultural Machines for Sugar Beet Harvesting on Physical Soil Properties. Soil Engineering – Soil Biology Volume 20. Springer Verlag Berlin Heidelberg. S. 91 – 100.
53. **GILL, W. R. and VANDENBERG, G. E. (1967):** Soil dynamics in tillage and traction. Agric. Handbook 316. ARS, USDA.
54. **GLIMERTOTH, G. (1953):** Untersuchungen über Verfestigungs- und Verlagerungsvorgänge im Ackerboden unter Rad- und Raupenfahrzeugen. Zeitschrift für Acker- und Pflanzbau: S. 219 – 234.
55. **GRIEBEL, J. (1986):** Strukturfördernde Bodenbearbeitung. Lohnunternehmer 41 (2): S. 103 – 110.
56. **GRIMME Landmaschinenfabrik GmbH & Co. KG (2004):** Persönliche Mitteilung und Überlassung durch die Fa. Grimme.
57. **GRUBER, W. (1993):** Auswirkungen der Bodenbelastung mit landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen und der Bodenbearbeitung auf das Bodengefüge. Dissertation, Universität Giesen.
58. **GYSI, M., MAEDER, V. and WEISSKOPF, P. (2001):** Pressure distribution underneath tires of agricultural vehicles. Transactions of the ASAE 44 (6): American Society of Agricultural Engineers ISSN 0001-23 551. S. 1385 - 1389.
59. **HAKANSSON, I., HENDRIKSSON, L. and GUSTAFSSON, L. (1985):** Experiments on reduced compaction for heavy clay soils and sandy soils in Sweden. Proc. Int. Conf. on Soil Dynamics. June 17 - 19 Auburn, Univ., Auburn, AL, USA. S. 995 - 1009.
60. **HAKANSSON, I., VOORHEES, W. B., ELONEN, P., RAGHAVAN, G. S. V., LOWERY, B., Van WIJK, A. L. M., RASMUSSEN, K. and RILEY, H. (1987):** Effects of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. Soil Tillage Res. 10. S. 277 -304.

61. **HAKANSSON, I. and REEDER, R. C. (1994):** Subsoil compaction by vehicles with high axle load – extent, persistence and crop response. *Soil & Tillage Research* 29: S. 277 – 304.
62. **HAKANSSON, I. (2005):** Compaction of arable soils. Incidence - consequences – counter - measures. Reports from the division of soil management 109. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
63. **HARAIN Maschinenbau GmbH (2007):** Persönliche Mitteilung und Überlassung durch die Fa. HARAIN.
64. **HARRACH, T. und VORDERBRÜGGE, T. (1991):** Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. *Berichte über Landwirtschaft* 204: S. 69 – 82.
65. **HARTGE, K. H. (1971):** Eine Labor- und Praktikumsanweisung. Die physikalische Untersuchung von Böden. Enke Verlag Stuttgart, S. 21 –30.
66. **HARTGE, K. H. und HORN, R. (1989):** Die physikalische Untersuchung von Böden. 2. Auflage. Enke Verlag Stuttgart.
67. **HARTGE, K. H. Und HORN, R. (1999):** Einführung in die Bodenphysik. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, S. 304.
68. **HEITMANN, G. (2008):** Landwirtschaftliche Fahrzeuge im Straßenverkehr. Hsg. aid Infodienst Verbraucherschutz. S. 19 – 25, S. 76 – 77.
69. **HÖFFLINGER, W. und PORKRIEFKE, M. (1993):** Weniger Bodenverdichtung durch Raupenlaufwerke? *KTBL-Schrift* 362: S. 124 – 128.
70. **HÖFFLINGER, W. (1998):** Raupenfahrwerke für landwirtschaftliche Großgeräte: Technisch-wirtschaftliche Entwicklungsfortschritte. *Tagung Landtechnik VDI-Verlag Düsseldorf* 1998: S. 41 – 46.
71. **HOLMER Maschinenbau GmbH (2004):** Persönliche Mitteilung und Überlassung durch die Fa. Holmer.
72. **HORN, R. (1981):** Die Bedeutung der Aggregation von Böden für die mechanische Belastbarkeit. *Schriftenreihe TU Berlin, Fachbereich Landschaftsentwicklung* 10: S. 200. Hrsg. TU Berlin 1981.
73. **HORN, R. (1986):** Auswirkung unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die mechanische Belastbarkeit von Ackerböden. *Zeitung für Pflanzenernährung und Bodendruck* 149: S. 9 – 18.
74. **HORN, R., BURGER, M., LEBERT, M. und BADEWITZ, G. (1987):** Druckfortpflanzung in Böden unter langsam fahrenden Traktoren. *Zeitung für Kulturtechnik und Flurbereinigung* 28: S. 94 – 102.
75. **HORN, R. (1988):** Compressibility of arable land. In: DRESCHER; HORN & DE BOODT (Hrsg.): *Impact of water and external forces on soil structure. Catena supplement* 11, S. 53 – 71 pp.

76. **HORN, R. und LEBERT, M. (1989):** Bedeutung des Bodenaufbaus und der Fahrgeschwindigkeit von Traktoren für die Druckfortpflanzung in Ackerböden. Reifen Landwirtschaftlicher Fahrzeuge Tagung München, 27. – 28. April 1989 VDI-MEG Kolloquium Landtechnik 7, VDI-Verlag Düsseldorf: S. 63 – 71.
77. **HORN, R. und KÜHNER, S. (1993):** Ergebnisbericht des SFB 192, 1991 – 1993, Teilprojekt C1. S. 283 – 308.
78. **HORN, R., DOMZAL, H., SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A. and van OUWERKERK, C. (1995):** Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. Soil Tillage Research 35: S. 23 – 36.
79. **HORN, R. (2001):** Die Verformung von Böden – Ursachen und Folgen für eine nachhaltige Landnutzung. 14. Wissenschaftliche Fachtagung der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn: S. 75 – 79.
80. **ISENSEE, E. und OLF, W. (1990):** Effekte des Gummibandlaufwerkes auf den Boden. Landtechnik 45 (7/8): S. 265 – 266.
81. **JOHNSON, J. F., VORHEES, W. B., NELSON, W. W. and RANDALL, G. W. (1990):** Soybean growth and yield affected by surface and subsoil compaction. Agronomy J. 82 (5), S. 937 – 979.
82. **KELLER, T. und ARVIDSSON, J. (2004):** Technical solutions to reduce risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. Soil & Tillage Research 79: S. 191 – 205.
83. **KÉZDI, A. (1969):** Handbuch der Bodenmechanik – Teil 1: Bodenphysik. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, S. 259.
84. **KNITTEL, H. (1975):** Auswirkungen der Minimalbestelltechnik auf physikalische Bodeneigenschaften. Forschungsbericht Agrartechnik MEG 6: S. 27 - 28. Dissertation. Technische Universität München.
85. **KMOCH, H. G. (1966):** Vergleichsmessungen der Luftdurchlässigkeit des Bodens im Freiland und im Labor. Zeitschrift f. Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde 111: S. 10 – 23.
86. **KOCH, H.-J., HEUER, H. und TOMANOVÁ, O. (2007):** Soil properties and sugar beet growth as affected by repeated passes of heavy machinery and soil tillage. VDI-Berichte Nr. 2001, S. 447 – 453.
87. **KREITMYAR, J. (2009):** Verfahren der Bodenbelastung und Einfluss hoher Radlasten. Available at <http://www.lfl.bayern.de/publikationen/iab/jahresbericht/38841>.
88. **KÖHLER, R. (1949):** Der biotechnische Ackerbau: Bayerischer Landwirtschaftsverlag München, S. 187 – 193.
89. **KOOLEN, A., J. and KUIPERS, H. (1983):** Agricultural Soil Mechanics. Advanced Series in Agricultural Science 13: S. 181 – 182.
90. **KOOLEN, A., J. (1994):** Mechanics of Soil Compaction. Soil Compaction in Crop Production in Elsevier Sciences: S. 23; S. 40 - 41.

91. **KRAUSE, R. und STEIMKAMPF, H. (1986):** Die Befahrbarkeit des Bodens. KTBL - Schrift 308 Bodenverdichtung beim Schlepper- und Maschineneinsatz und Möglichkeiten zu ihrer Verminderung. KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup (Westfalen).
92. **KROMER, K.-H. (1983):** Verkehrsorientierte Anbausysteme – Definition und Verfahrenstechnische Lösungen. Landtechnik 44 (6): S. 225 – 226; S. 231 – 232.
93. **KULLI, B., GYSI, M. and FLÜHLER, H. (2003):** Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. Soil Tillage Research 70: S. 29 – 40.
94. **KÜHNER, S. (1997):** Simultane Messung von Spannungen und Bodenbewegungen bei statistischen und dynamischen Belastungen zur Abschätzung der dadurch induzierten Bodenbelastungen. Dissertation, Schriftenreihe des Institutes für Pflanzenernährung und Bodenkunde der CAU zu Kiel, Band 39.
95. **KUNTZE, H. (1983):** Die Bedeutung des Bodengefüges für die Ertragsbildung in Jahren mit extremer Witterung. Zuckerrübe 32 (3), S. 144 – 147.
96. **KUNTZE, H., ROESCHMANN, G. und SCHWERDTFEGER, G. (1988):** Bodenkunde, 4. Aufl. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
97. **LEBERT, M. (1989):** Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Dissertation, Bayreuth, Bayreuther Bodenkundliche Berichte 12, S. 132.
98. **LEBERT, M. und HORN, R. (1991):** A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. Soil & Tillage Research 19, S. 275 – 286.
99. **LEE FARM, UNILEVER R&D COLWORTH (2004):** Available at: <http://www.controlledtrafficfarming.com>.
100. **LEWIS W. A. (1954):** Further studies in the compaction of soil and the performance of compaction plant. Dept. Sci. and Indus. Res. Road Res. Lab., Tech. Paper 33, illus.
101. **LI, Y. X., TULLBERG, J. N., FREEBAIRN, D. M., and CIESIOLKA, C. A. (2004):** Effect of controlled traffic and conservation tillage on runoff and crop yield. ASAE Paper 941071, American Society of Agricultural Engineering.
102. **LOMBARD, A. (1901):** Logging – Engine. U.S. Patent 674737.
103. **MARSILI, A., SERVADIO, P., PAGLIAI, M. and VIGNOZZI, N. (1998):** Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber- and metal-tracked tractors. Soil & Tillage Research 49: S. 185 – 199.
104. **McRAE, J. L. (1950):** A study of stresses in soil during laboratory compaction: 14 pp. Unpublished. Dept. of Civil Engin., Northwestern University.
105. **MICHELIN (2007):** Betriebsanleitung landwirtschaftlicher Reifen. Hrsg. Michelin: S. 7, S. 20 – 27.
106. **MICHELIN (2009):** Betriebsanleitung landwirtschaftlicher Reifen: Hrsg. Michelin: S. 30 - 31, S. 50 – 53.
107. **MOHSEMANESH, A. and WARD, S. M. (2007):** On-the-move monitoring of soil-tire interaction on soft soil using wireless data acquisition. Transactions of the ASAE. 50 (6): S. 1919-1925. American Society of Agricultural Engineers ISSN 0001-2351.

108. **MÜLLER, E. (1984):** Zur Entstehung von Bodenverdichtungen im Weinbau durch das Befahren mit Traktoren. Landtechnik 39, H. 9. S. 396 – 398.
109. **NICHOLS, T. A., BAILEY, A. C., JOHNSON, C. E. and GRISSE, R. D. (1987):** A stress state transducer for soil. ASAE 30 (5): 123 7 – 1241.
110. **N. N. (1979 – 80):** Siol cone Penetrometer. ASAE Standard: ASAE S313.1 Agric. Eng. Yearbook, S. 269 – 270.
111. **OBERMEIER-HARTMANN, R., BLEISCHWITZ, S. and KÄSLER, R. (2006):** New track undercarriage for agriculture application. Proceedings CIGR World Congress Agricultural Engineering for a better World 2006: VDI-Berichte Nr. 1958, S. 123 – 124.
112. **OBERMEIER-HARTMANN, R. (2010):** New track undercarriage for agriculture application. VDI-Berichte Nr. 2111, S. 49 – 54.
113. **OIDA, A. und TANAKA, A. (1981):** Analysis of viscoelastic deformation of soil by means of finite element method. Proc. 7th International Conference of the International Society of Terrain Vehicle Systems 3: Calagry, Alberta, S. 1473 – 1492.
114. **OLF, W. (1993):** Beurteilung bodenschonender Fahrwerke. In Forschungsbericht Agrartechnik (MEG) 234, Dissertation, Universität Kiel.
115. **PAUL, R. (1999):** Zur Verdichtungsgefährdung im Rahmen des Bodengefügeschutzes auf großen Flächen. Kolloquium Friedrich Schiller Universität Jena.
116. **PETELKAU, H. und SEIDEL, H. (1982):** Kompressibilität von Bodenproben unterschiedlicher Substrate bei stufenweiser uniaxialer Belastung in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Archiv Acker- und Pflanzenbau Bodenkunde 26 (6): S. 389 – 393.
117. **PETELKAU, H., SEIDEL, K. und FRIELINGHAUS, M. (1988):** Ermittlung des Verdichtungswiderstandes von Böden des Landes Brandenburg und Bewertung von Landmaschinen und landwirtschaftlichen Anbauverfahren hinsichtlich der Beeinträchtigung von Bodenfunktion durch die Verursachung von schwer regenerierbaren Schadverdichtungen. Abschlussbericht 1998, Münchberg.
118. **PLOEG van der, R. R., EHLERS, W. und HORN, R. (2006):** Schwerlast auf dem Acker. Spektrum der Wissenschaft 8: S. 80 – 88.
119. **PYTKA, J. (2005):** Effects of repeated rolling of agricultural tractors on soil stress and deformation state in sand and loess. Soil Till. Res. 82: S. 77-88.
120. **RADEMACHER, J. und WEISSBACH, M. (2004):** Mähdrescher und Bodendruck. Hrsg. Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft (RKL). Kapitel 4.1.4.1.4 Druschfruchternte und Bodenschonung. S. 713 – 727.
121. **RAGHAVEN, G. S. V., Mc KYES, E. and CHASSE, M. (1977):** Effects of wheel slip on soil compaction, Jour. Agric. Engin. Res. 22: S. 79 – 83.
122. **REAVES, C. A. and COOPER, A. W. (1960):** Stress distribution in soils under tractor loads. Agr. Engin. 41: S. 20 – 21, S. 31.
123. **RICHTER, R. und HOFMANN, B. (1981):** Probleme des Einsatzes von Fahrzeugen auf landwirtschaftlich genutztem Boden. Agrartechnik 31 (9): S. 419 – 421.

124. **ROPA Fahrzeugbau GmbH (2004):** Persönliche Mitteilung und Überlassung durch die Fa. ROPA.
125. **SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2005):** Bodendruck und Bodenbelastbarkeit. Schriftreihe der Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), 10. Jahrgang, Heft 15: Eigenverlag Leipzig. S. 5, 19 und 85.
126. **SCHEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P. (1992):** Lehrbuch der Bodenkunde. 13. Auflage. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart.
127. **SCHJONNING, P., LAMANDÈ, F., TOGERSEN, A., ARVIDSSON, J. and KELLER, T. (2006):** Distribution of vertical stress at the soil tyre interface: Effects of tyre inflation pressure and the impact on stress propagation in the soil profile. *Advances in GeoEcology* 38: S. 38 - 46.
128. **SCHLEE; R., RENARD-LAFLEUR, F. und PUEL, B. (2003):** XeoBib – ein neues Traktor-Reifen-Konzept von Michelin. VDI-Berichte Nr. 1798, S. 137 – 141.
129. **SCHULZE-LAMMERS, P., TSCHEPE, M. und STRÄTZ, J. (2001):** Bodenbelastung durch Rad- und Achslasten von Landmaschinen in der Zuckerrübenenernte. Schadverdichtungen in Ackerböden – Entstehung, Folgen, Gegenmaßnahmen. 14. Wissenschaftliche Fachtagung Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, 5. Dezember 2001. S. 150 – 158.
130. **SCHWANGHART, H. (1998):** Gummibandlaufwerke. *Landtechnik Sonderheft* 53: S. 207 – 209.
131. **SEMMELE, H. (1993):** Auswirkungen kontrollierter Bodenbelastung auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch-mechanische Kenngrößen von Ackerböden. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Universität Kiel, Heft 26.
132. **SIMMER, K. (1994):** Grundbau 1 – Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen. 19. Auflage, Stuttgart, Teubner Verlag.
133. **SEMMELE, H., HORN, R., STEINKAMPF, H., SCHWANGHART, H. und NEUKAM, M. (1993):** Druckfortpflanzung im Boden – ein Messgerätevergleich. *Landtechnik* 48 (1/2): S. 42 – 45.
134. **SMITH, D. L. and DICKSON, J. W. (1990):** Contributions to vehicle weight and ground pressure to soil compaction. *Journal of Agricultural Engineering Research* 46: S. 13 – 29.
135. **SÖHNE, W. (1951):** Das Mechanische Verhalten des Ackerbodens bei Belastungen, unter rollenden Rädern sowie bei der Bodenbearbeitung. *Grundlagen der Landtechnik* 1 (1): S. 87 – 94.
136. **SÖHNE, W. (1952):** Die Verformbarkeit des Ackerbodens. *Grundlagen der Landtechnik* 2 (3): S. 51 – 59.
137. **SÖHNE, W. (1953):** Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. *Grundlagen der Landtechnik* 5: S. 49- 63.
138. **SÖHNE, W. (1964):** Allrad- oder Hinterradantrieb bei Ackerschleppern hoher Leistung. *Grundlagen der Landtechnik* 20: S. 44 -52.

139. **SOMMER, C. (1984):** Ursachen und Folgen von Bodenverdichtungen, sowie Möglichkeiten zu ihrer Verminderung. Landtechnik 40 Heft 9. S. 378 – 384.
140. **SOMMER, C. (1986):** Bodenschonende und bodenschützende Pflanzenproduktion – dargestellt an Beispielen der Bodenbearbeitung. Landtechnik 41 Heft 9.
141. **SOMMER, C. und BRUNOTTE J (2003):** Lösungsansätze zum Problembereich Bodenschadverdichtung in der Pflanzenproduktion. Landnutzung und Landentwicklung 44, H. 5. S. 220 – 228.
142. **SOMMER, C. und PETELKAU, H. (1990):** Bodenverdichtung. Landtechnik 45 (11): S. 404 – 406.
143. **STEINKAMPF, H. und SOMMER, C. (1989):** Druck und Verdichtungsmessungen im Feld unter großvolumigen Reifen. In – VDI-MEG Kolloquium Landtechnik. Heft 7 Reifen Landwirtschaftlicher Fahrzeuge. Tagung München, 27. – 28. April 1989, VDI-Verlag Düsseldorf: S. 156 – 169.
144. **STEINKAMPF, H. (1974):** Ermittlung von Reifenkennwerten und Gerätezugleistungen für Ackerschleppern. Dissertation, Universität Braunschweig
145. **STEPNIEWSKI, W., GLINSKI, J. and Ball, B. C. (1994):** Effects of compaction on soil aeration properties. Soil Compaction in Crop Production. Verlag Elsevier: S. 167 – 189.
146. **STOCK, M. (2007):** Climate change and effects on the European agriculture. Conference: Agricultural Engineering 2007. Beiblatt zum Tagungsband.
147. **STVZO – STRAßENVERKEHRS-ZULASSUNGS-ORDNUNG –** in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. September 1988, zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 25. September 2008 (BGBl. I S. 1878).
148. **TEBRÜGGE, F. (1982):** Wirkung verschiedener Bodenbearbeitungstechniken auf Strukturaufbau und –stabilität des Bodens. Landtechnik 37 (2): S. 58 – 61.
149. **TIJINK, F. G. J. und SPOOR, G. (2004):** Technische Leitlinien zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtung. Zuckerindustrie 129/9. S. 647 – 652.
150. **TIJINK, F. G. J. DÖLL, H. Und VERMEULEN, G., D. (1993):** Towards management of soil compaction; technical and economical feasibility of low ground pressure. Proc. Of the 2th Int. Conf. “Protection of Soil Enviroment by Adoiance of Compaction & Proper Soil Tillage”, August, Melitopol, Ukraine.
151. **TIJINK, F. G. J. and van der LINDEN, J. P. (2000):** Engineering approaches to prevent subsoil compaction in cropping systems with sugar beet. Advances in Geoecology 32: S. 442 - 452.
152. **USDA National Soil Dynamics Laboratory (2007):** Persönliche Mitteilung und Überlassung durch die Forschungseinrichtung der USDA in Auburn Alabama.
153. **VDI – VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE Hrsg (2007):** Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden. VDI-Richtlinie 6101. VDI-Verlag Düsseldorf. S. 32 - 39.
154. **VERVAET BV (2007):** Persönliche Mitteilung und Überlassung durch die Fa. Vervaet NL.

-
155. **VOORHEES, W. B. (2000):** Long-term effect of subsoil compaction on yield of maize. In HORN, R., van AKKER, J. J. H. and ARVIDSSON, J. (eds.): Subsoil compaction: Distribution, processes and consequences. *Advances in Geocology* 32.
 156. **VOORHEES, W. B. (2001):** „What, How and So What?“ of soil compaction. In Proceedings of 21st Annual Crop Pest Management Conference. Short Course Proceedings. S. 1 – 5.
 157. **WEAVER, H. A. and JAMISON, V. C. (1951):** Effects of moisture on tractor tire compaction of soil. *Soil Sci.* 71: S. 15 – 23.
 158. **WEISSBACH, M. (1994):** Wirkung von Fahrwerken auf den Boden, insbesondere im Grenzbereich Boden/Pflanze. Forschungsbericht Agrartechnik, MEG-Schrift 259, Dissertation, Kiel, S. 227.
 159. **WEISSBACH, M. und WINTER, K. (1996):** Großtraktoren und Raupe im Vergleich. *Landtechnik Heft 2:* S. 78 – 79.
 160. **WEISSBACH, M. und WINTER, K. (1996):** Bodenbelastung und Zugkraftübertragung von Großschleppern mit unterschiedlichen Fahrwerken. Hrsg. Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft (RKL), Kapitel 2.1.2.1: S. 245 – 276.
 161. **WEISSBACH, M. (2001):** Ergebnisse von Bodendruckmessungen unter den Fahrwerken von Mähdreschern. Unveröffentlichte Ergebnisse des Institutes für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik. Universität Kiel.
 162. **WEISSBACH, M. (2001):** Bodenschonende Reifen für Großmaschinen und Schlepper. Hrsg. Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft (RKL), Kapitel 2.1.2.1: S. 343 – 351.
 163. **WEISSBACH, M. (2002):** Einsatz bodenschonender Fahrwerke in der Rübenernte. VDI-Berichte 1716. Tagung Landtechnik 2002 Halle/Saale. VDI-Verlag Düsseldorf: S. 273 – 278.
 164. **WEISSBACH, M. (2003):** Landtechnische Untersuchungen zur Wirkung bodenschonender Fahrwerke an Schleppern und Arbeitsmaschinen mit verschiedenen Radlasten. Habilitation, Kiel, S. 197.
 165. **WERNER, D. und PAUL, R. (1999):** Kennzeichnung der Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. *Wasser und Boden* 51 (12): S. 10 – 14.
 166. **WESTTRAC (2007):** Persönliche Mitteilung und Überlassung durch die Fa. Westtrac NL.
 167. **WILDE, T. (2000):** Regeneration von Ackerböden nach starker landtechnischer Belastung. Dissertation, Kiel, S. 170.
 168. **ZELENIN, A. N. (1950):** Basic Physics of the Theory of Soil Cutting. Illus. Moscow: S. 353 pp.

Anhang

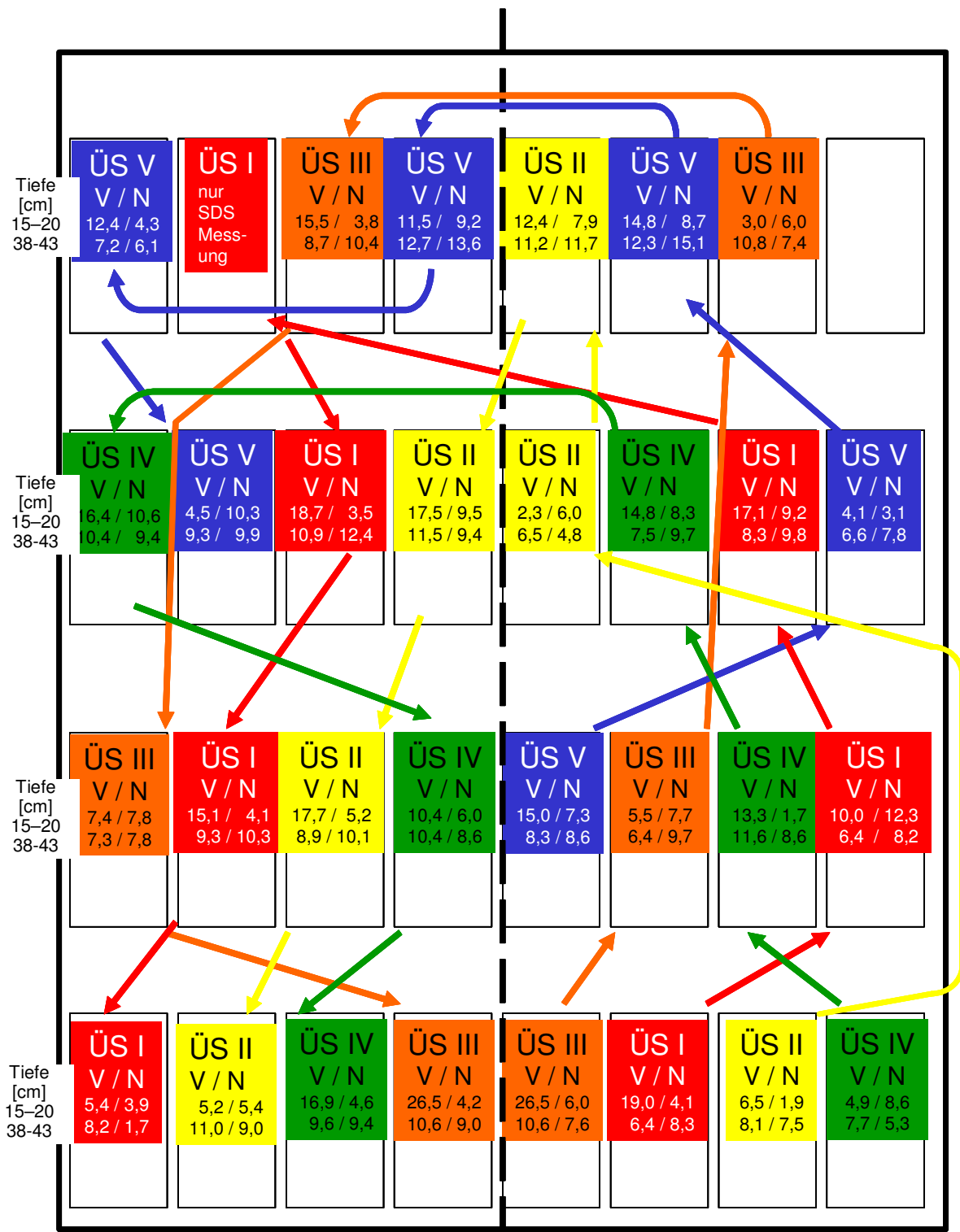


Abb. 97: Übersicht der Beprobungspartellen und dem Befahrungsmuster mit den unterschiedlichen Fahrwerken. ÜS I – V stehen für die fünf Überrollungssituationen mit: I = Band 112 kN; II = Rad 51,5 kN; III = 2 x Rad 51,5 kN; IV = 1 x Rad 23,5 kN und V = 4 x Rad 23,5 kN. Als Leitparameter wurden die Luftkapazitätswerte für die beiden Probenahmetiefen sowie der unbefahrenen und befahrenen Bereiche angegeben

Tab. 35: Gemessene Bodendrücke mit den Schlauchdrucksonden. Die Einzelwerte stellen die Maximaldrücke jeder Messung dar

Anzahl der Räder / Rollen		1		2	
Bodentiefe	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI
20 cm	120 57 76 130 71 93	132 97 94 125 90 96			
30 cm	97 105 47 40 74 33	102 110 81 47 69 35			
40 cm	65 82 42 50 63 34	68 93 54 58 73 35			
50 cm	29 37 31 34 32 32	29 46 31 34 32 32			
Reifengröße: 1050/50 R32 Radlast: 1 x 51,5 kN, Innendruck: 70 kPa, Aufstandsfläche: 7.400 cm ² ; Kontaktflächendruck: 0,69 kg/cm ²					
Reifengröße: 1050/50 R32 Radlast: 2 x 51,5 kN, Innendruck: 70 kPa, Aufstandsfläche: 7.400 cm ² ; Kontaktflächendruck: 0,69 kg/cm ²					

Anzahl der Räder / Rollen		1		2		3		4	
Bodentiefe	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI
20 cm	34 111 81 48 72 81	38 107 97 77 77 86	45 104 102 87 80 91	53 120 107 104 98 100					
30 cm	29 43 69 36 37 36	29 60 70 39 62 41	29 67 67 40 76 52	29 70 67 44 88 67					
40 cm	29 31 35 31 48 52	29 31 37 33 61 55	29 31 36 33 66 57	29 30 36 34 73 59					
50 cm	30 30 30 32 31 29	30 30 30 32 31 29	30 30 30 32 31 29	30 30 30 32 31 29					
Reifengröße: 540/65 R28, Radlast: 1 x 23,5 kN; Innendruck: 60 kPa; Aufstandsfläche: 3.100 cm ² ; Kontaktflächendruck: 0,74 kg/cm ²									
Reifengröße: 540/65 R28, Radlast: 4 x 23,5 kN; Innendruck: 60 kPa; Aufstandsfläche: 3.100 cm ² ; Kontaktflächendruck: 0,74 kg/cm ²									

Anzahl der Fahrten		1		2		3		4	
Bodentiefe	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI	WH I WH II WH III WH IV WH V WH VI
20 cm	27 31 94 26 28 86	30 58 97 28 48 95	32 53 118 31 50 99	44 80 132 38 59 100					
30 cm	22 29 28 30 25 25	22 35 29 32 25 28	22 36 29 31 25 29	24 50 35 31 26 31					
40 cm	24 24 25 25 27 37	24 24 25 25 26 41	24 24 25 25 27 41	24 24 25 25 27 41					
50 cm	23 22 24 24 26 24	23 22 24 24 26 24	23 22 24 24 26 24	23 22 24 24 26 24					
Bandgröße: 2000 mm x 890 mm; 1 x 113 kN; Aufstandsfläche: 18.300 cm ² ; Kontaktflächendruck: 0,62 kg/cm ²									
Bandgröße: 2000 mm x 890 mm; 1 x 113 kN; Aufstandsfläche: 18.300 cm ² ; Kontaktflächendruck: 0,62 kg/cm ²									

Tab. 36: Fehleranalyse durch Verrechnung verschiedener Vordrücke bei der Überrollungssituation mit dem Gummibandlaufwerk

Fehler = tatsächlich 22 - 27 kPa		1 durch Umlenkrolle vorne				2 durch 1ste Tragrolle				3 durch 2te Tragrolle				4 durch Antriebsrolle hinten				MW							
Anzahl der Fahrten		1				2				3				4											
Bodentiefe [cm]		WH I	WH II	WH III	WH IV	WHV	WHVI	WH I	WH II	WH III	WH IV	WHV	WHVI	WH I	WH II	WH III	WH IV	WHV	WHVI						
20	27	31	94	26	28	86	30	58	97	28	48	95	32	53	118	31	50	99	44	80	132	38	59	100	62
30	22	29	28	30	25	25	22	35	29	32	25	28	22	36	29	31	25	29	24	50	35	31	26	31	29
40	24	24	25	25	27	37	24	24	25	25	26	41	24	24	25	25	27	41	24	24	25	25	27	42	28
50	23	22	24	24	26	24	23	22	24	24	26	24	23	22	24	24	26	24	23	22	24	24	26	24	24
Fehler = 0 kPa		1				2				3				4											
Anzahl der Fahrten		1				2				3				4											
Bodentiefe [cm]		WH I	WH II	WH III	WH IV	WHV	WHVI	WH I	WH II	WH III	WH IV	WHV	WHVI	WH I	WH II	WH III	WH IV	WHV	WHVI						
20	27	31	94	26	28	86	30	58	97	28	48	95	32	53	118	31	50	99	44	80	132	38	59	100	62
30	0	29	28	30	0	25	0	35	29	32	25	28	0	36	29	31	25	29	24	50	35	31	26	31	25
40	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0	26	41	0	0	0	0	27	41	0	0	0	0	27	42	10
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fehler = 12 kPa		1				2				3				4											
Anzahl der Fahrten		1				2				3				4											
Bodentiefe [cm]		WH I	WH II	WH III	WH IV	WHV	WHVI	WH I	WH II	WH III	WH IV	WHV	WHVI	WH I	WH II	WH III	WH IV	WHV	WHVI						
20	27	31	94	26	28	86	30	58	97	28	48	95	32	53	118	31	50	99	44	80	132	38	59	100	62
30	12	29	28	30	12	25	12	35	29	32	25	28	12	36	29	31	25	29	24	50	35	31	26	31	27
40	12	12	12	12	12	37	12	12	12	12	26	41	12	12	12	12	27	41	12	12	12	12	27	42	19
50	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Fehler terminieren		1				2				3				4											
Anzahl der Fahrten		1				2				3				4											
Bodentiefe [cm]		WH I	WH II	WH III	WH IV	WHV	WHVI	WH I	WH II	WH III	WH IV	WHV	WHVI	WH I	WH II	WH III	WH IV	WHV	WHVI						
20	27	31	94	26	28	86	30	58	97	28	48	95	32	53	118	31	50	99	44	80	132	38	59	100	62
30	29	28	30	25	25	37	35	29	32	25	28	26	41	36	29	31	25	29	24	50	35	31	26	31	30
40	29	28	30	25	25	37	35	29	32	25	28	26	41	36	29	31	25	29	24	50	35	31	26	31	30
50	37	29	28	30	25	37	35	29	32	25	28	26	41	36	29	31	25	29	24	50	35	31	26	31	34

Tab. 37: Zusammenfassung der Bodendruckveränderungen unter den verschiedenen Überrollungssituationen

Überrollungssituation	Bodendruck in 20 cm Tiefe [kPa]	Druckabbau bis in 50 cm Tiefe auf Vordruck Niveau	Unterschied Druckerhöhung zu Druckabbau
1 x Rad 51 kN	91,2	- 66,2	
2 x Rad 51 kN	105,7	- 80,7	
Veränderung [%]	+16	+22	- 6
1 x Rad 23 kN	71,2	- 46,2	
2 x Rad 23 kN	80,3	- 55,3	
Veränderung [%]	+13	+ 20	- 7
2 x Rad 23 kN	80,3	- 55,3	
3 x Rad 23 kN	84,8	- 59,8	
Veränderung [%]	+ 5,6	+ 8,1	- 2,5
3 x Rad 23 kN	84,8	- 59,8	
4 x Rad 23 kN	97	- 72	
Veränderung [%]	+ 14,4	+ 20,4	- 6
1 x Rad 23 kN	71,2	- 46,2	
4 x Rad 23 kN	97	- 72	
Veränderung [%]	+ 36	+ 56	- 20
1. Rolle Bandlaufwerk 113 kN	48,7	- 26,7	
4. Rolle Bandlaufwerk 113 kN	75,5	- 53,5	
Veränderung [%]	+ 55	+ 101	- 46

