

**Physikalisch-mechanische Auswirkungen ausgewählter
Schlepperfahrwerke auf das Bodengefüge im Weinbau
unter besonderer Berücksichtigung neuartiger
Vierraupenfahrwerke**

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des Grades eines
DOKTORS DER AGRARWISSENSCHAFTEN
(Dr. agr.)

Christian Fischer, M. Sc. (Oenologie)

Gau-Algesheim

Gießen, im Oktober 2014

Hochschule Geisenheim
Zentrum für Wein- und Gartenbau
Institut für Technik

Justus-Liebig-Universität Gießen
Fachbereich 09 – Agrarwissenschaft, Ökotropologie und Umweltmanagement
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung I

**Physikalisch-mechanische Auswirkungen ausgewählter
Schlepperfahrwerke auf das Bodengefüge im Weinbau
unter besonderer Berücksichtigung neuartiger
Vierraupenfahrwerke**

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des Grades eines
DOKTORS DER AGRARWISSENSCHAFTEN
(Dr. agr.)

Erster Gutachter: Professor Dr. Hans-Peter Schwarz

Zweiter Gutachter: Professor Dr. Bernd Honermeier

Dritter Gutachter: Professor Dr. Günter Leithold

Vorgelegt von: Christian Fischer, M. Sc. (Oenologie), Gau-Algesheim

Vorgelegt am: 2. Juni 2014

Tag der Disputation: 23. September 2014

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XI
Abbildungsverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
2 Stand des Wissens	7
2.1 Bodenmechanik	7
2.1.1 Bodenspannung	8
2.1.2 Spannungsausbreitung	10
2.1.3 Messung des Spannungszustands	12
2.1.4 Bodenverformung	13
2.2 Landwirtschaftliche Traktoren und Zugmaschinen	15
2.2.1 Systematik landwirtschaftlicher Traktoren	15
2.2.2 Systematik weinbaulicher Traktoren	17
2.3 Fahrwerkskonzepte	25
2.3.1 Radfahrwerke	28
2.3.2 Kettenfahrwerke	31
2.4 Fahrmechanik	35
2.4.1 Triebkraftkoeffizient	36
2.4.2 Rollwiderstandskoeffizient	38
2.4.3 Kräfte am Rad	41
2.4.4 Kräfte am Kettenfahrwerk	43
2.4.5 Weinbauspezifische Aspekte	47
2.5 Interaktion und Interdependenz Boden - Fahrzeug	51
2.5.1 Bodenbelastung	51
2.5.2 Bodenbeanspruchung	65
2.5.3 Bodenverdichtung	66
2.6 Bodenschadverdichtungen in der Landwirtschaft	70
2.6.1 Tragfähigkeit	71
2.6.2 Vorbelastungskonzept	75
2.6.3 Pflanzenphysiologie	76
2.6.4 Schadverdichtung im Weinbau	77
2.6.5 Sanierung schadverdichteter Böden im Weinbau	80
2.7 Rechtliche Rahmenbedingungen des Bodenschutzes	81
3 Material und Methoden	84
3.1 Versuchsstandort	85
3.1.1 Standortkriterien	85
3.1.2 Vorherrschende Bodenart	86
3.1.3 Versuchsrelevante Flächenparameter	89

3.2	Versuchsfahrzeuge	90
3.2.1	Schwerpunktlage der Versuchsfahrzeuge	97
3.3	Messtechnik	99
3.3.1	Mobile Datenerfassung auf dem Versuchsfahrzeug	99
3.3.2	Stationäre Bodendruckmessung	100
3.3.3	Radarsensor und Getriebesensor	100
3.3.4	Neigungssensor.....	101
3.3.5	Infrarot-Lichtschanke mit Reflektor	102
3.3.6	Kraftmessdose.....	102
3.3.7	Schlauchdrucksonde	103
3.4	Schlupfmessung.....	104
3.5	Bestimmung der Rollwiderstandskoeffizienten	106
3.6	Bestimmung der Triebkraftkoeffizienten	106
3.7	Bestimmung der Fahrwerkswirkungsgrade.....	108
3.8	Dynamische Bodendruckmessung	108
3.8.1	Versuchsaufbau.....	110
3.8.2	Variation der Verzögerungskraft.....	113
3.9	Berechnung des gewichteten mittleren Bodendrucks.....	115
3.10	Penetrometrie.....	116
3.11	Datenauswertung und statistische Verfahren	118
4	Ergebnisse	121
4.1	Standort- und Rahmenbedingungen	121
4.2	Schlupfmessung.....	122
4.3	Rollwiderstandskoeffizienten	125
4.4	Triebkraftkoeffizienten und Wirkungsgrade	126
4.4.1	Fendt 211V Vario.....	127
4.4.2	Carraro Mach 4.....	128
4.4.3	Geier 60 TLY	129
4.5	Dynamische Bodendruckmessung	130
4.5.1	Parameterabweichungen	132
4.5.2	Nomenklatur	133
4.5.3	Neigungskorrektur	135
4.5.4	Nullvarianten.....	136
4.5.5	Verzögerungsstufen	142
4.6	Gewichteter mittlerer Bodendruck.....	164
4.6.1	Nullvarianten.....	164
4.6.2	Verzögerungsstufen	165
4.7	Penetrometrie.....	167
4.7.1	Fendt 211V Vario.....	168
4.7.2	Carraro Mach 4.....	172
4.7.3	Geier 60 TLY	176
4.8	Analyse der Eindringwiderstände	180

4.8.1	Oberboden.....	180
4.8.2	Krumenbasis.....	183
4.8.3	Unterboden.....	186
5	Diskussion.....	189
5.1	Standort- und Rahmenbedingungen.....	189
5.2	Fahrwerksspezifische Kenngrößen.....	192
5.3	Dynamische Bodendruckmessungen.....	196
5.4	Gewichteter mittlerer Bodendruck (GMP).....	201
5.5	Penetrometrie und Analyse der Eindringwiderstände.....	203
5.6	Diskussion des neuartigen Vierraupenkonzpts für den Weinbau.....	207
5.7	Bewertung der Thesen.....	213
5.8	Bodenbeanspruchung und Bodenverdichtung im Weinbau.....	214
6	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	219
7	Zusammenfassung.....	223
8	Summary.....	225
9	Literaturverzeichnis.....	227
10	Anhang.....	257
11	Danksagung.....	259
12	Eidesstattliche Versicherung.....	261

Abkürzungsverzeichnis

AKh	Arbeitskraftstunde
ANOVA	Analysis of variance
ASAE	American Society of Agricultural and Biological Engineers
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
BMELF	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMVEL	Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft
BReg	Bundesregierung
COD	Ordinary legislative procedure (Rechtssetzungsverfahren der Europäischen Union)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnungsmessstreifen
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FK	Feldkapazität
GMD	Gewichteter mittlerer Durchmesser
GMP	Gewichteter mittlerer Druck
HA	Hinterachse
HU	Hintere Umlenkrolle
Imp	Impuls
KFD	Kontaktflächendruck
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft

LUFA	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt
Max	Maximum
MEMS	Mikro-elektro-mechanisches-System
Min	Minimum
NEN	Nederlandse Norm (Niederländische Norm)
RMS	Raupen-Mechanisierungssystem
S	Sand (Bodenart)
SD	Standardabweichung
SI	Internationales Einheitensystem
SMS	Steilhang-Mechanisierungssystem
SR	Stützrolle
STGT	Steillagengeräteträger
STVE	Steillagentraubenvollernter
StVO	Straßenverkehrsordnung
StVZO	Straßenverkehrszulassungsordnung
T	Ton (Bodenart)
TASC	Tyres/Tracks And Soil Compaction (Simulationssoftware)
TCP/IP	Transmission Control Protocol, Internet Protocol
TMS	Traktor-Management-System
U	Schluff (Bodenart)
VA	Vorderachse
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VK	Variationskoeffizient
VS	Verzögerungsstufe
VU	Vordere Umlenkrolle

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Anforderungsprofil an landwirtschaftliche Fahrwerke (modifiziert nach Weißbach und Winter 1996; Schreiber 2009; Geischer 2011).	26
Tab. 2: Sammlung spezifischer Triebkraftkoeffizienten landwirtschaftlicher Rad- und Kettenfahrwerke (Schilling 1960; Koolen und Kuipers 1983; Blumenthal 1985; Merhof und Hackbarth 1985; Renius 1985; Wong 2008).	38
Tab. 3: Sammlung spezifischer Rollwiderstandskoeffizienten landwirtschaftlicher Rad- und Bandfahrwerke (Schilling 1960; Koolen und Kuipers 1983; Blumenthal 1985; Merhof und Hackbarth 1985; Renius 1985; Wong 2008).	41
Tab. 4: Konzeption und Ergebnisse ausgewählter Belastungsstudien.	53
Tab. 5: Übersicht über ausgewählte Studien zur Belastungshäufigkeit.	65
Tab. 6: Kornfraktionen des Feinbodens. Die Kurzzeichen T (Ton), U (Schluff) und S (Sand) mit ihren Indizes kodieren die einzelnen Korngrößenfraktionen (modifiziert nach Schaller 2000; Scheffer und Schachtschabel 2010).	87
Tab. 7: Korngrößenzusammensetzung am Versuchsstandort. Grundlage waren Mischproben aus jeweils $n = 30$ Einzelproben. Die Kurzzeichen folgen der Systematik zu Tab. 6.	87
Tab. 8: Übersicht über die technischen Daten der Versuchsfahrzeuge und ausgewählten Fahrzeugkonfigurationen.	96
Tab. 9: Schwerpunktlage der Versuchsfahrzeuge gem. Herstellerangaben und eigenen Berechnungen.	98
Tab. 10: Experimentell ermittelte mittlere Impulsanzahl der Sensorik je Wegstreckeneinheit [m] als Kalibrierwert für die Wegstreckenberechnung.	101
Tab. 11: Experimentell ermittelte Referenzwerte des Neigungswinkelsensors in Fahrzeugquer- (X-Achse) und Fahrzeuglängsrichtung (Y-Achse) als Kalibrierwert für die Neigungskorrektur.	102
Tab. 12: Definition der Verzögerungsstufen als Zielgrößen für die Feldversuche.	114
Tab. 13: Definition der Druckklassen und Klassenmitten für die Berechnung des gewichteten mittleren Drucks (GMP).	116
Tab. 14: Berechnung der Rollwiderstandskoeffizienten auf Grundlage der Gesamtfahrzeugmasse (M_{GG}), der Gewichtskraft (F_G) und der Schleppkraft F_S . Angegeben ist die mittlere Schleppkraft F_S inkl. einfacher Standardabweichung.	125
Tab. 15: Darstellung der im Praxisversuch erreichten Verzögerungskräfte F_V in Abhängigkeit zur Gewichtskraft F_G der Versuchsfahrzeuge. Die Prozentzahl gibt an, welchem Anteil der Gewichtskraft die erreichte Verzögerungskraft entsprach.	133
Tab. 16: Theoretische und tatsächliche Rad- und Bandlasten zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung in VS-1 bis VS-3 (inkl. Fahrer Masse). Berechnet für die in Fahrtrichtung links orientierten Räder bzw. Bänder. Die Kontaktflächendrucke wurden aus den bekannten und korrigierten Fahrwerkslasten mit der Simulationssoftware TASC (Tyres/Tracks and Soil Compaction (Diserens 2010) berechnet.	135
Tab. 17: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Fendt 211V Vario, VS-0 [Nullvariante].	137
Tab. 18: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4, VS-0 [Nullvariante]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	139
Tab. 19: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4, VS-0 [Nullvariante]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	140
Tab. 20: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY, VS-0 [Nullvariante]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	141
Tab. 21: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY VS-0 [Nullvariante]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	141
Tab. 22: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Fendt 211V Vario, VS-1 [8,2 kN].	144

Tab. 23: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Fendt Vario 211V VS-2 [12,0 kN].	146
Tab. 24: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Fendt Vario 211V VS-3 [13,7 kN].	147
Tab. 25: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4 VS-1 [10,6 kN]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	150
Tab. 26: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4 VS-1 [10,6 kN]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	151
Tab. 27: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4 VS-2 [15,6 kN]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	152
Tab. 28: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4 VS-2 [15,6 kN]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	153
Tab. 29: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4 VS-3 [17,9 kN]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	155
Tab. 30: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4 VS-3 [17,9 kN]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	155
Tab. 31: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY VS-1 [7,8 kN]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	160
Tab. 32: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY VS-1 [7,8 kN]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	160
Tab. 33: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY VS-2 [9,2 kN]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	161
Tab. 34: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY VS-2 [9,2 kN]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	162
Tab. 35: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY VS-3 [11,7 kN]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	163
Tab. 36: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY VS-3 [11,7 kN]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.	164
Tab. 37: Gegenüberstellung des GMP bei nicht verzögerter (GMP_0) und verzögerter Überfahrt (GMP_{VS}) der Versuchsfahrzeuge. Dargestellt sind die GMP-Werte für die Tiefen 0,15 m und 0,25 m. GMP_0 ist als Referenzwert jeweils mit 100 % angegeben.	167

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Zieldefinition der Arbeit im Hinblick auf Untersuchungsgegenstände, Methodik und angestrebten Erkenntnisgewinn.	3
Abb. 2: Haupt- (σ) und Scherspannungskomponenten (τ) am isolierten Bodenkörper (Einheitselement) (Horn und Semmel 1994).	9
Abb. 3: Spannungsausbreitung unter punktförmigen Auflasten bei unterschiedlichen Konzentrationsfaktoren (ν) (Kézdi 1969).	11
Abb. 4: Darstellung der radlastabhängigen Tiefenwirkung nach dem von Söhne (1953) beschriebenen Druckzwiebelmodell bei jeweils gleichem Kontaktflächendruck (Renius 1985).	12
Abb. 5: Schematische Übersicht über die verschiedenen landwirtschaftlichen Traktorbauarten. Die nutzbaren Geräteanbau Räume sind orange hervorgehoben (modifiziert nach Renius 1985).	16
Abb. 6: Praktische Grenzen der Direktzugmechanisierung bei zunehmender Hangneigung für verschiedene Mechanisierungssysteme (modifiziert nach Walg 2007a).	18
Abb. 7: Holder Systemtraktor M 480 mit Standard- und Bandlaufwerk (Holder 2014).	21
Abb. 8: Schmalspurtraktor Carraro SRX mit Knicklenkung und Mach 4 mit Bandlaufwerken.	21
Abb. 9: Schmalspurtraktor M 8540 Narrow mit Standard- und Halbraupenfahrwerk (Kubota 2014). ..	22
Abb. 10: Detailaufnahme des Anbaulaufwerks beim M 8540 Narrow mit Kennzeichnung (gelbe Pfeile) der Spannvorrichtung und des Fahrwerkdrehpunkts (Kubota 2014).	22
Abb. 11: Case IH Quadtrac als Beispiel neuartiger Gummibandlaufwerke in der Landwirtschaft (Case IH 2013).	23
Abb. 12: Systeme zur Steilstlagenmechanisierung (Bergtrac 2014; Pekazett o.J.).	25
Abb. 13: Systematik der landwirtschaftlichen Fahrwerksbauarten (modifiziert nach Schilling 1960). .	27
Abb. 14: Aufbau der Radial- und Diagonalreifen (modifiziert nach Uppenkamp et al. 2009).	29
Abb. 15: Schematischer Aufbau eines Gummigurtbands (Derdack 1989).	33
Abb. 16: Bandlaufwerke mit formschlüssigem (links) und kraftschlüssigem (rechts) Antrieb (Claas 2014).	34
Abb. 17: Anbauhalbraupe für den Pflegeschlepper RS14/30 „Favorit“ (Institut für Landtechnik Potsdam-Bornim 1957).	35
Abb. 18: Abhängigkeit des Triebkraftkoeffizienten bei Radfahrwerken für verschiedene Fahrbahnbeschaffenheiten (modifiziert nach Kutzbach 1995).	37
Abb. 19: Einsinkverhalten und Kontaktflächenausbildung beim luftgefüllten Reifen unter variierenden Fülldrücken (Renius 1985).	39
Abb. 20: Die Kraftwirkungen am Reifen unter verschiedenen Praxisbedingungen: a getriebenes Rad, b angetriebenes Rad ohne Zugkraft, c ziehendes Rad mit angreifender Zugkraft. F_{Boden} : Bodenstützkraft, F_G : Radlast, F_R : Rollwiderstand, F_T : Zugkraft, M Antriebsmoment (modifiziert nach Renius 1985).	43
Abb. 21: Schema des Kraftflusses beim Kettenfahrzeug. Ausgehend von der Motorleistung P_E steht wirkungsgradabhängig eine Antriebsleistung P_T am Antriebsturas AS zur Verfügung. Hier stellt sich eine Umfangsgeschwindigkeit v_T ein. Nach Überwindung der inneren und äußeren Fahrwiderstände F_{W_i} und F_{W_A} verbleibt der nutzbare Zugkraftanteil F_Z . Die effektive Vorfahrtsgeschwindigkeit über Grund entspricht v , die Fahrzeuggewichtskraft F_G mit Angriffspunkt am Masseschwerpunkt (modifiziert nach Merhof und Hackbarth 1985).	44
Abb. 22: Verteilung der Zugkraft in Antriebskette bzw. Antriebsband. Links Laufwerk mit Frontantrieb, rechts Laufwerk mit Heckantrieb. M entspricht dem eingeleiteten Antriebsmoment. Die innere Kettenzugkraft entspricht $F_{Z_{ki}}$ und setzt sich zusammen aus der äußeren Kettenzugkraft F_Z und der Kettenvorspannung T_0 (Merhof und Hackbarth 1985).	45
Abb. 23: Kräfteverhältnisse am ziehenden Raupenfahrzeug. W entspricht der Fahrzeuggewichtskraft, P der bereitgestellten Zugkraft und R der im Winkel β wirkenden Bodenreaktionskraft. W , P und R verlaufen durch den gemeinsamen Punkt b unterhalb der Masseschwerpunkts a . Punkt c	

entspricht dem gedachten Punkt der Kraffteinleitung in den Boden. Unter Zugbelastung stellt sich ein Neigungswinkel α ein (Koolen und Kuipers 1983).	46
Abb. 24: Zusammenhang zwischen Bodenbelastung, Bodenbeanspruchung und Bodenverdichtung (modifiziert nach Sommer 1985).	51
Abb. 25: Druckverteilung unterhalb der Laufwerksrollen und der Rollenzwischenräume (Wenzlawski 1999).....	57
Abb. 26: Bahnkurven eines Punkts A bei Rotation eines starren Rades mit dem Radius r_{th} und der Abrollgeschwindigkeit w unter verschiedenen Schlupfverhältnissen auf starrer Bahn. S entspricht der effektiv zurückgelegten Wegstrecke je Umdrehung. a: schlupffreies Abrollen, b: ziehendes Rad mit positivem Schlupf, c: bremsendes Rad mit negativem Schlupf (Meyer o.J.).....	59
Abb. 27: Wirkung von Druck und Vibration auf das Porenvolumen (Kuntze 1983).....	62
Abb. 28: Einzelprozesse des Bodensetzungsverhaltens in Abhängigkeit von der Zeit (Katzenbach 2013).....	63
Abb. 29: Computer-Tomografie des Porensystem eines unverdichteten (links) und verdichteten Bodens (rechts). Die Verdichtung resultiert in einer signifikanten Verminderung des Gesamtporenvolumens sowie Unterbrechung dessen Kontinuität (Børresen 2011).	67
Abb. 30: Effekt der verminderten Wurzelanzahl mit zunehmender Trockenrohdichte. Dargestellt wird die Anzahl der Wurzeln je 25 cm^2 Fläche in verschiedenen Horizonten. Insbesondere der Oberboden (17 - 23 cm) lässt eine Degression erkennen (Rücknagel 2007).	73
Abb. 31: Versuchsstandort in Gau-Algesheim, zum Zeitpunkt der Luftaufnahme noch mit Weinreben bestockt. Der rote Linienverlauf bezeichnet den Begehungsverlauf für die Bodenbeprobung zur Klassifizierung des Versuchsstandorts (Luftbild modifiziert nach Geo Portal RLP 2013).	86
Abb. 32: Bodenartendreieck gemäß Kartieranleitung KA5 (AG Boden 2005).	88
Abb. 33: Darstellung des vor Versuchsbeginn gemessenen Bodeneindringwiderstands am Versuchsstandort.	90
Abb. 34: Versuchsfahrzeug 211V Vario TMS (Weinbauschmalspurschlepper, Standardbauweise, unechter Allradantrieb), Hersteller Fendt, Bereifung Vorderachse (VA) Michelin 11 LR 16, Hinterachse (HA) Michelin 380/70 R 24, Stollenprofil XM 27.....	91
Abb. 35: Versuchsfahrzeug Mach 4 (Weinbauschmalspurschlepper, Knickschlepper, Bandantrieb), Hersteller Carraro, Bandgröße $0,35 \text{ m} \times 1,14 \text{ m}$	93
Abb. 36: Detailaufnahme eines Bandlaufwerks des Versuchsfahrzeugs Carraro Mach 4. Der Drehpunkt der Lagerungsschwinge ist mit einem gelben Punkt gekennzeichnet.	93
Abb. 37: Versuchsfahrzeug Geier 60 TLY (Schmalspurraupentraktor leichter Bauart; hydrostatischer zweisträngiger Raupenantrieb), Hersteller Geier, Bandgröße $0,25 \text{ m} \times 1,20 \text{ m}$	95
Abb. 38: Versuchsaufbau zur Verwiegung des Zweiraupentraktors Geier 60 TLY.	97
Abb. 39: Schematischer Aufbau der Schlauchdrucksonde (modifiziert nach Weißbach 1994).	104
Abb. 40: Aufbau zur Abbremsung der Versuchsfahrzeuge im Rahmen der Fahrversuche und der dynamischen Bodendruckmessungen. Die kalibrierte Kraftmessdose I diente der Datenerfassung; Kraftmessdose II visualisierte die anliegende Verzögerungskraft für den Fahrer des Bremsfahrzeugs. Zur Bestimmung der Rollwiderstandskoeffizienten wurde das Versuchsfahrzeug geschleppt (modifiziert nach Böttinger et al. 2011).	107
Abb. 41: Anlage des Feldversuchs und der jeweiligen Versuchspartellen am Standort in Gau-Algesheim (Luftbild modifiziert nach GeoPortal RLP 2013).	110
Abb. 42: Versuchsaufbau zur dynamischen Bodendruckmessung mittels Schlauchdrucksonden. ...	111
Abb. 43: Ansicht einer vorbereiteten Messpartelle für die Bodendruckmessung vor und nach Überfahrt des Versuchsfahrzeugs.	112
Abb. 44: Versuchsaufbau zur Variation der Verzögerungskraft während der dynamischen Bodendruckmessungen. Der kraftschlüssig an das Versuchsfahrzeug gekoppelte Bremschlepper erlaubte eine definierte Abbremsung während der Messüberfahrt.	114
Abb. 45: Vertikal-Konus-Penetrometer, Typ: Eijkelkamp Penetrologger (Eijkelkamp 2011).	118
Abb. 46: Volumetrische Bodenwassergehalte nach DIN 18221 zum Zeitpunkt der Messungen mit der Schlauchdrucksonde und dem Konus-Penetrometer, differenziert nach den Messhorizonten $0,15 \text{ m}$ und $0,25 \text{ m}$	121

Abb. 47: Antriebsschlupf beim Fendt 211V Vario unter Berücksichtigung der Faktoren Fahrgeschwindigkeit, Fahrbahnbeschaffenheit und Antriebsart (links Fahrtrieb; rechts Schlepp).....	123
Abb. 48: Antriebsschlupf beim Carraro Mach 4 unter Berücksichtigung der Faktoren Fahrgeschwindigkeit, Fahrbahnbeschaffenheit und Antriebsart (links Fahrtrieb; rechts Schlepp).....	123
Abb. 49: Antriebsschlupf beim selbstfahrenden Raupenfahrzeug Geier 60 TLY unter Berücksichtigung der Faktoren Fahrgeschwindigkeit und Fahrbahnbeschaffenheit.	124
Abb. 50: Darstellung der Originaldaten eines Verzögerungsversuchs. Die progressive Abstufung sowie die Intervalle eines homogenen Verlaufs der induzierten Verzögerungskraft sind rot hervorgehoben.	126
Abb. 51: Zugkraft-Schlupf-Beziehung am Beispiel des Versuchsfahrzeugs Fendt 211V Vario.	127
Abb. 52: Beziehung von Zugkraft, Triebkraftkoeffizient und Wirkungsgrad zum Antriebsschlupf beim Fendt 211V Vario (Sandfahrbahn). Die Anzahl der Messpunkte ist dem linken Diagramm zu entnehmen.....	128
Abb. 53: Beziehung von Zugkraft, Triebkraftkoeffizient und Wirkungsgrad zum Antriebsschlupf beim Carraro Mach 4 (Sandfahrbahn). Die Anzahl der Messpunkte ist dem linken Diagramm zu entnehmen.....	129
Abb. 54: Beziehung von Zugkraft, Triebkraftkoeffizient und Wirkungsgrad zum Antriebsschlupf beim Versuchsfahrzeug Geier 60 TLY (Sandfahrbahn). Die Anzahl der Messpunkte ist dem linken Diagramm zu entnehmen.	130
Abb. 55: Exemplarische Darstellung der normierten Originaldaten vier ausgewählter Bodendrucksonden für die dreimalige Überfahrt des Versuchsfahrzeugs Carraro Mach 4 über eine Bodendruckmessstelle.....	131
Abb. 56: Nomenklatur der Laufwerksrollen beim Vierraupentraktor Carraro Mach 4.	134
Abb. 57: Nomenklatur der Laufwerksrollen beim Zweiraupentraktor Geier 60 TLY.	134
Abb. 58: Bodendruckprofil Fendt 211V Vario, VS-0 [Nullvariante]. Die Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.....	137
Abb. 59: Bodendruckprofil Carraro Mach 4, VS-0 [Nullvariante]. Die Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.....	139
Abb. 60: Bodendruckprofil Geier 60 TLY, VS-0 [Nullvariante]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.....	141
Abb. 61: Schlupf und Zugkraftverhältnisse in den jeweils dreimalig wiederholten Verzögerungsversuchen in VS-1 bis VS-3 für den Radtraktor Vario 211V.	143
Abb. 62: Bodendruckprofil Fendt 211V Vario, VS-1 [8,2 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.....	144
Abb. 63: Bodendruckprofil Fendt 211V Vario, VS-2 [12,0 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.....	145
Abb. 64: Bodendruckprofil Fendt 211V Vario, VS-3 [13,7 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.....	147
Abb. 65: Schlupf und Zugkraftverhältnisse in den jeweils dreimalig wiederholten Verzögerungsversuchen in VS-1 bis VS-3 beim Vierraupentraktor Carraro Mach 4.	148
Abb. 66: Bodendruckprofil Carraro Mach 4, VS-1 [10,6 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.....	150
Abb. 67: Bodendruckprofil Carraro Mach 4, VS-2 [15,6 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.....	152
Abb. 68: Bodendruckprofil Carraro Mach 4, VS-3 [17,9 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe. Gegenüber den vorherigen Diagrammen ist die abweichende Skalierung der Ordinate zu beachten.	154
Abb. 69: Druckimpulse der Stützrollen am Hinterachslaufwerk des Carraro Mach 4 als Funktion der Verzögerungskraft. Messtiefe 0,15 m.....	156
Abb. 70: Korrelation aus Abb. 69 in halblogarithmischer Darstellung.	156

Abb. 71: Druckimpulse der Stützrollen am Hinterachslaufwerk des Carraro Mach 4 als Funktion der Verzögerungskraft. Messtiefe 0,25 m.....	156
Abb. 72: Korrelation aus Abb. 71 in halblogarithmischer Darstellung.	156
Abb. 73: Gegenüberstellung der mittleren Bodendruckimpulse des heckseitig links angebrachten Bandlaufwerks des Versuchsfahrzeugs Carraro Mach 4. Die Darstellung erfolgt für die verschiedenen Verzögerungsstufen jeweils einzelrollenspezifisch differenziert. Die Daten sind den entsprechenden Wertetabellen in Kapitel 4.5 entnommen. Die Nomenklatur folgt der dort vorgenommenen Definition.....	157
Abb. 74: Schlupf und Zugkraftverhältnisse in den jeweils dreimalig wiederholten Verzögerungsversuchen in VS-1 bis VS-3 beim Zweiraupentruktor 60 TLY.	158
Abb. 75: Bodendruckprofil Geier 60 TLY, VS-1 [7,8 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.....	159
Abb. 76: Bodendruckprofil Geier 60 TLY, VS 2 [9,2 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.....	161
Abb. 77: Bodendruckprofil Geier 60 TLY, VS-3 [11,7 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.....	163
Abb. 78: Mittlerer fahrzeuginduzierter Bodendruck unter Berücksichtigung der Einwirkdauer für die Messtiefen 0,15 m und 0,25 m (Nullvarianten ohne Verzögerung).....	165
Abb. 79: Mittlere fahrzeuginduzierte Bodenspannung unter Berücksichtigung der Einwirkdauer für die Messtiefen 0,15 m und 0,25 m (Verzögerungsvarianten).	166
Abb. 80: Darstellung der mittleren überfahrtsinduzierten Fahrspursetzung der Versuchsfahrzeuge.	168
Abb. 81: Penetrogramm zur Versuchseinheit Fendt 211V Vario.....	169
Abb. 82: Auswertung der belastungsabhängigen Eindringwiderstände in den Bodenhorizonten für das Fahrzeug Fendt 211V Vario.	171
Abb. 83: Entwicklung des Bodeneindringwiderstands vor und nach Überfahrt des Versuchsfahrzeugs Fendt 211V Vario.....	172
Abb. 84: Penetrogramm zur Versuchseinheit Carraro Mach 4.....	173
Abb. 85: Auswertung der belastungsabhängigen Eindringwiderstände in den Bodenhorizonten für das Fahrzeug Carraro Mach 4.....	175
Abb. 86: Entwicklung des Bodeneindringwiderstands vor und nach Überfahrt des Versuchsfahrzeugs Carraro Mach 4.....	176
Abb. 87: Penetrogramm zur Versuchseinheit Geier 60 TLY.	177
Abb. 88: Auswertung der belastungsabhängigen Eindringwiderstände in den Bodenhorizonten für das Fahrzeug Geier 60 TLY.	179
Abb. 89: Entwicklung des Bodeneindringwiderstands vor und nach Überfahrt des Versuchsfahrzeugs Geier 60 TLY.	180
Abb. 90: Vergleich der nachgewiesenen Eindringwiderstände im Oberboden.	182
Abb. 91: Entwicklung des mittleren Bodeneindringwiderstands im Oberboden vor und nach Überfahrt der Versuchsfahrzeuge.	183
Abb. 92: Vergleich der nachgewiesenen Eindringwiderstände in der Krumbasis.	185
Abb. 93: Entwicklung des mittleren Bodeneindringwiderstands in der Krumbasis vor und nach Überfahrt der Versuchsfahrzeuge.	186
Abb. 94: Vergleich der nachgewiesenen Eindringwiderstände im Unterboden.	187
Abb. 95: Saugspannungskurven eines Sandbodens (S), eines Lehm Bodens (L) und eines Tonbodens (T) mit Darstellung des permanenten Welkepunkts (PWP) und der spezifischen Feldkapazität (FK). Der optimale Wassergehalt für vergleichende Untersuchungen am Standort ist rot hervorgehoben (modifiziert nach Schroeder 1992).	191
Abb. 96: Prototyp des Case-IH Vierraupentruktors aus der Experimentalstudie von Turner (1995).	207
Abb. 97: Druckverlauf in 0,4 m Messtiefe unter dem Vorder- und Hinterachslaufwerk eines Vierraupentruktors. Die grau gefärbte Messkurve zeigt den Druckverlauf unter dem Laufwerkszentrum, die schwarz gefärbte den Verlauf im Laufwerksrandbereich (Arvidsson et al. 2011).....	208

Abb. 98: Druckverlauf in 0,2 m und 0,4 m Messtiefe unter dem Vorder- und Hinterachslaufwerk mit nachfolgendem Schwergrubber und Packer. eines Vierraupentraktors (Stahl et al. 2005).	208
Abb. 99: Zugkraft in Antriebskette, beziehungsweise Antriebsband eines Deltalaufwerks (Liebherr 1991).....	210
Abb. 100: Konstruktive Veränderungen am Bandlaufwerk des Carraro Mach 4. Der eingefügte Hartgummipuffer begrenzt den Pendelweg des Laufwerks und begrenzt somit die einseitig-ungleichmäßige Druckverteilung in der Kontaktfläche.	211
Abb. 101: Schäden am Gummigurtband nach rd. zweijährigem Einsatz in skelettreichen Weinbausteillagen (Baldauf 2012).	212
Abb. 102: Penetrometerwiderstand des Bodens im Bereich der Fahrspuren (links) und in der Gassenmitte (rechts) für verschiedene Standorte in den Jahren 2009 bis 2011 (modifiziert nach Burg et al. 2012).	216
Abb. 103: Plastische Bodenverformung im Bereich der Schlepperfahrspur (links) und des Traubenvollernters (rechts). Im Randbereich ist eine Aufwölbung infolge seitlich verlagerten Bodenmaterials angedeutet (Redl et al. 2009; Walg 2007c).....	217
Abb. 104: Systematik der Datenablage beigefügter Anhänge auf der beiliegenden CD-ROM.....	257

1 Einleitung

Parallel zu den Entwicklungen in der Landwirtschaft, ist auch im Weinbau eine zunehmende Substitution des Produktionsfaktors Arbeit durch den Faktor Kapital zu erkennen. Damit geht im weinbaulichen Außenbetrieb eine maschinell-technische Arbeitserledigung einher, welche die vormals stark manuell-händisch geprägten Wirtschaftsweisen ersetzt. Anschaulich wird dieser Prozess anhand der rapide fortschreitenden Arbeitszeiteinsparung im deutschen Weinbau: Während 1970 für die Bewirtschaftung direktzugfähiger Weinbaulagen noch ein jährlicher Arbeitsaufwand von 870 AKh je Hektar notwendig war, wurde bis zum Jahr 2000 eine nahezu lineare Degression auf 270 AKh verzeichnet (WALG 2007a). Aktuell liegt der Arbeitsaufwand in vollmechanisierten Weinbergslagen bei 180 - 200 AKh je Hektar und Jahr. Die in der Vergangenheit erreichten Erleichterungen bei der körperlichen Arbeit sowie Einsparungen an Kosten und Arbeitszeit sind im Wesentlichen dem technologischen Fortschritt in der Landtechnik geschuldet. Gleichzeitig unterliegt die gesellschaftliche Erwartungshaltung an eine moderne Landwirtschaft grundlegenden Veränderungen. In Verbindung mit der jüngeren europäischen und nationalen Gesetzgebung rücken zunehmend die Aspekte Umwelt- und Landschaftsschutz sowie die Nachhaltigkeit der Bodenbewirtschaftung in das Zentrum der Betrachtung. Vor diesem Hintergrund ergeben sich zukünftig neue Ansprüche an eine zweckmäßige, schlagkräftige und zugleich umweltschonende Landtechnik.

Viele Autoren haben den Themenkomplex der Bodenbelastung, -beanspruchung und -verdichtung durch den landwirtschaftlich geprägten Technikeinsatz eingehend im Rahmen theoretischer Betrachtungen und Feldstudien untersucht (z. B. SÖHNE 1951, 1952, 1953; GILL und VANDENBERG 1967; LARSON et al. 1989; SOANE und VAN OUWERKERK 1994; LEBERT und SPRINGOB 1994; SCHREIBER 2009; GEISCHEDER 2011; ARVIDSSON und HÅKANSSON 2014; DUTTMANN et al. 2014). Dies gilt insbesondere für die mehrheitlich verbreiteten Radfahrwerke. Für Raupen- und Bandfahrwerke ist die Datenlage hingegen nicht sehr umfassend. Die verfügbaren Veröffentlichungen beschränken sich auf theoretische Abhandlungen zur Konstruktion und den Einsatzbereichen. Darüber hinaus bezieht sich die Grundlagenliteratur häufig auf außerlandwirtschaftliche Anwendungsbereiche. Erst in jüngerer Zeit werden landwirtschaftliche Raupen- und Bandfahrwerke in der agrarwissenschaftlichen Fachliteratur wieder zunehmend beachtet. Zurückzuführen ist dies im Wesentlichen auf die wachsende

Verbreitung landwirtschaftlicher Großtraktoren mit mehr als 150 kW Motorleistung. Auf diese entfielen nach KUTSCHENREUTER im Jahr 2009 14 % der jährlichen Neuzulassungen in Deutschland. Im Jahr 2012 lag dieser Anteil bei 16 % (VDMA 2013). Trotz tendenziell sinkender Leistungsgewichte [kg/kW] resultiert hieraus die Notwendigkeit, stetig größer werdende Fahrzeugmassen und Radlasten gegenüber der Fahrbahn abzustützen (RENIUS 1985; WEIßBACH 2001). Diese Entwicklung steht prinzipiell im Widerspruch zu den Anforderungen an eine bodenschonende Wirtschaftsweise (GEISCHEDER 2011).

Die weinbauliche Fachliteratur beschränkt sich vornehmlich auf eine sinngemäße Wiedergabe der Erkenntnisse der fahrwerksspezifischen Grundlagen und Forschungsergebnisse aus dem landwirtschaftlichen Bereich. Eine Ausnahme bildet die Mechanisierung des Steillagenweinbaus. In diesem Zusammenhang sei auf die umfangreichen Arbeiten am Institut für Weinbautechnik der ehemaligen Forschungsanstalt Geisenheim von STEINMETZ (1985); STEINMETZ und RÜHLING (1985) sowie RÜHLING (1988, 1991, 1999) verwiesen. Aktuell wird die Eignung neuartiger Walzenfahrwerke für die Steillagenmechanisierung geprüft (BRUNNER et al. 2011; SCHWARZ et al. 2012). Im Weinbau führt die Art und Weise der Kulturführung zu einer stetig andauernden Bodenbelastung im Bereich der permanenten Fahrspuren. In Verbindung mit einer regelmäßig hohen Mechanisierungsintensität erfordert dies die Anwendung geeigneter Bodenschutzstrategien. Der standardisierte Produktionsprozess bietet nur wenige Möglichkeiten, die Anzahl an Gesamtüberfahrten während der regelmäßigen Nutzungsdauer einer Rebanlage zu vermindern. Im Gegensatz dazu bieten die landtechnischen Entwicklungen der vergangenen Jahre durchaus Ansätze zur Etablierung bodenschonender Verfahrenstechniken. Dies betrifft insbesondere die Weiterentwicklung konventioneller Fahrwerks- und Reifentechnik bzw. die grundlegende Neueinführung von Bandlaufwerken aus dem Bereich der Flächenlandwirtschaft. Beispielhaft sei hier die Entwicklung des Herstellers Carraro aufgeführt, welcher mit dem Modell Mach 4 erstmalig einen Vierraupentruktor in Schmalspurbauweise zur Serienreife entwickelte und diesen im Jahr 2009 der Praxis vorstellte. Für eine präzise Beschreibung und Quantifizierung der Bodenbeanspruchung durch die Fahrwerke der Weinbautraktoren fehlt jedoch bislang eine ausreichende Datengrundlage.

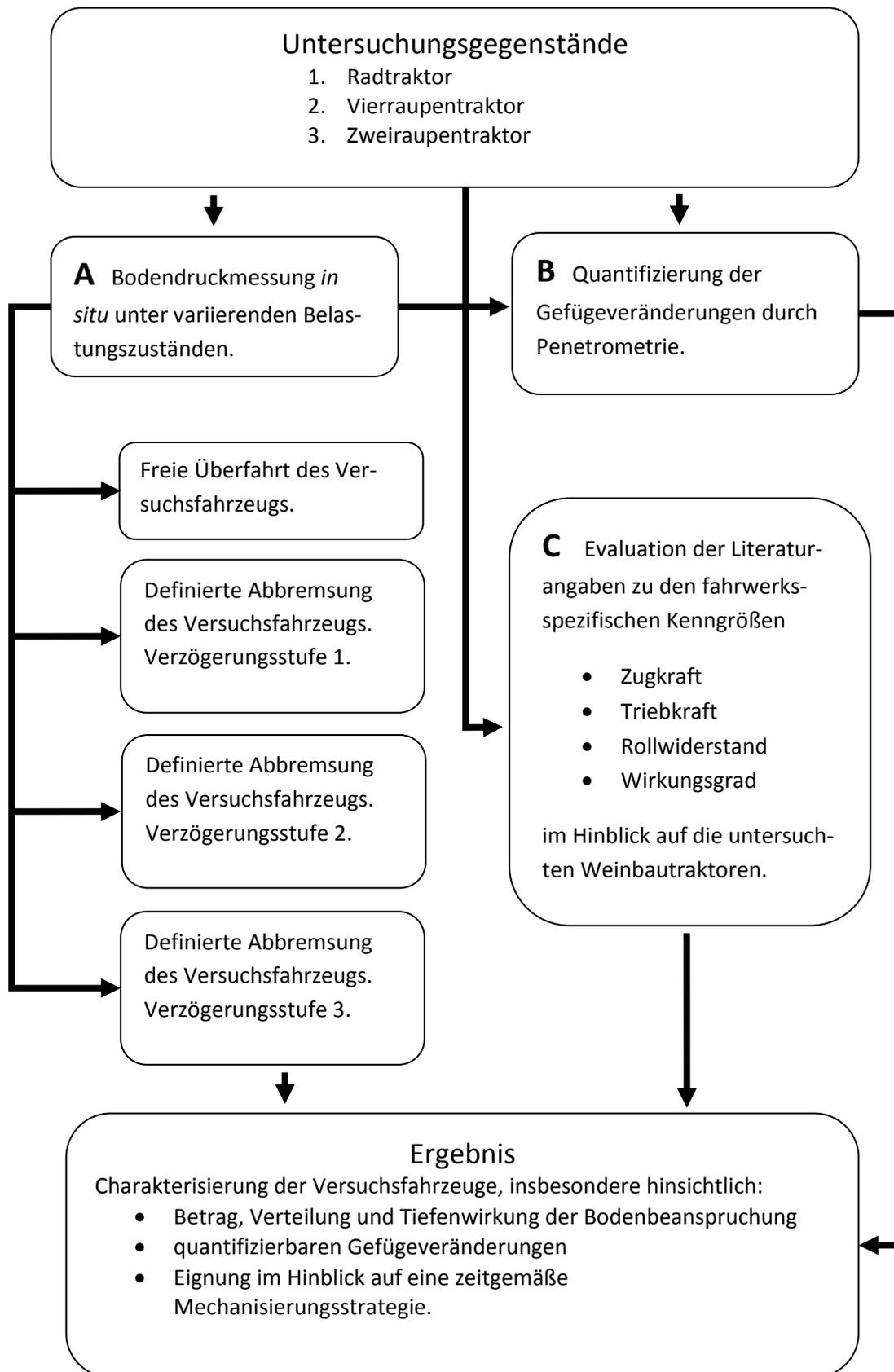


Abb. 1: Zieldefinition der Arbeit im Hinblick auf Untersuchungsgegenstände, Methodik und angestrebten Erkenntnisgewinn.

Dieses Informationsdefizit greift die vorliegende Arbeit auf und nimmt erstmalig eine Beurteilung der physikalisch-mechanischen Effekte sowohl der etablierten als auch der neuartigen Fahrwerksvarianten auf den Boden vor. Die grundlegende Ziel- und Methodenkonzeption ist in Abb. 1 dargestellt.

Insbesondere erfolgt eine Quantifizierung der dynamischen Bodenbeanspruchung und überfahrtsinduzierten Gefügeveränderung. Weiterhin werden einschlägige Literaturangaben zu Kenngrößen und Koeffizienten der Fahrwerke im Hinblick auf deren Validität im weinbaulichen Bereich überprüft. Der Erkenntnisgewinn sollte im Rahmen einer Feldstudie erreicht werden. Hierfür wurde ein Versuchsstandort ausgewählt, welcher aufgrund einer nachgewiesenen Homogenität des Bodengefüges die Durchführung systematischer Versuche mit reproduzierbarem Charakter ermöglichte. Der Standort wurde dabei als Quasi-Bodenrinne genutzt. Standardisierte Versuchsbedingungen wurden jeweils vor Versuchsdurchführung durch definierte anthropogene Bewirtschaftungsmaßnahmen gewährleistet.

Unter Einbeziehung des aktuellen weinbauspezifischen Wissensstands und Adaption allgemeiner landtechnischer Zusammenhänge werden nachfolgend fünf zentrale Thesen formuliert, die in der vorliegenden Arbeit überprüft und validiert wurden.

- I. Die aus der landtechnischen Grundlagenliteratur bzw. verwandten Disziplinen bekannten Zusammenhänge und Kennzahlen verschiedener Fahrwerksbauarten können analog auf die im Weinbau üblicherweise verwendeten Fahrwerke übertragen werden.
- II. Die untersuchten Raupenfahrzeuge zeigen im Feldversuch ein grundsätzlich günstigeres Trieb- und Zugkraftverhalten sowie höhere Fahrwerkswirkungsgrade als die Radtraktoren. Die Überfahrten der Raupenfahrzeuge über die Bodendruckmessstellen resultieren aufgrund der deutlich größeren Kontaktfläche in einer geringeren Druckbeanspruchung des Bodengefüges. Dies gilt auch unter Berücksichtigung des Faktors Belastungsdauer und der bekannten Heterogenität der Druckverteilung unter Raupenfahrwerken.

- III. Vierraupentraktoren erlauben bauartbedingt eine gegenüber den Zweiraupentraktoren optimierte Anpassung der Einzelraupenelemente an Bodenkontur und Geländetopografie. Als Folge ist eine gleichmäßigere Abstützung der Fahrzeugmasse und somit eine deutlich homogenere Druckbeanspruchung des Bodengefüges zu erwarten.
- IV. Die Erweiterung der klassischen Druckspannungsmessung um den Parameter einer abgestuften, extern induzierten Zugkraftbelastung des Versuchsfahrzeugs führt aufgrund einer dynamischen Achslastumlagerung sowie des lastabhängigen Schlüpfens der Antriebsräder oder -bänder zu eindeutigen Druckprofilen. Die variabel gewählte Zugkraftbelastung und die daraus folgende Druckbeanspruchung des Bodengefüges zeigen messtechnisch differenzierbare Gefügeveränderungen am Versuchsstandort. Eine Zunahme der Zugkraftintensität lässt eine Steigerung der spezifischen Bodenbeanspruchung erwarten.
- V. Im Hinblick auf die Anforderungen einer angemessenen und nachhaltigen Bodenschutzstrategie besitzen Raupenfahrzeuge im Allgemeinen und neuartige Vierraupenfahrzeuge im Speziellen das Potenzial für eine zukünftig zunehmende Verbreitung im Weinbau. Dabei ist über den klassischen Einsatz in Grenz- und Steillagen hinaus, auch eine zunehmende Bedeutung in direktzugfähigen Lagen zu erwarten.

2 Stand des Wissens

Die landwirtschaftliche Bodennutzung und Pflanzenerzeugung bewegt sich in einem Spannungsfeld zwischen den Eigenschaften des Bodeninventars, den Anforderungen der Umwelt- und Agrargesetzgebung, einer sich wandelnden gesamtgesellschaftlichen Erwartungshaltung sowie den ökonomischen Zielsetzungen des einzelnen Landwirts. Die stattgefundenene und weiterhin fortschreitende Mechanisierung der landwirtschaftlichen Produktionsprozesse verursacht einerseits nutzbringende Fortschritte hinsichtlich Bewirtschaftungseffizienz und Ertragspotenzial. Andererseits geht damit eine weitgehende Beeinflussung des natürlichen Bodengefüges einher.

Dieses Kapitel fasst die im Hinblick auf die Fragestellung der vorliegenden Arbeit bedeutsamen bodenmechanischen Grundlagen zusammen. Zusätzlich wird ein Überblick über den derzeitigen Kenntnisstand zur landwirtschaftlichen Fahrwerkstechnik sowie den Wechselwirkungen zwischen Fahrwerk und Fahrbahn gegeben.

2.1 Bodenmechanik

Die Bodenmechanik beschreibt die Lehre von den physikalischen Eigenschaften des Bodens sowie seines technischen Verhaltens, insbesondere unter wechselnden Belastungszuständen. Von besonderer Bedeutung sind die Kausalitäten zwischen auf den Boden einwirkenden Kräften und Impulsen sowie den daraus resultierenden Spannungsverhältnissen im Boden als Funktionen von Raum und Zeit (HAMMEL 1993; KÖNIG 1995). Als Fachdisziplin ging die landtechnische Bodenmechanik aus der allgemeinen Bodenmechanik hervor. Diese untersucht insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Ackerboden und den landwirtschaftlichen Maschinen und Werkzeugen (SÖHNE 1956) bzw. die Spannungsverhältnisse des Ackerbodens unter Einwirkung äußerer Kräfte (VORNKAHL 1966).

Die landtechnische Bodenmechanik greift auf die Modelle der Kontinuumsmechanik zurück, welche das Verformungsverhalten von Körpern beschreibt. Die Kontinuumsmechanik stützt sich dabei auf Gesetzmäßigkeiten und Erkenntnisse der Elastizitäts- und Plastizitätstheorie sowie der Hydromechanik und Gastheorie. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Grundlagen zur Entstehung und Ausbreitung von

Spannungen im Ackerboden sowie die Kausalkette der Entstehung von Bodenverformungen und -verdichtungen dargestellt.

2.1.1 Bodenspannung

Einwirkende Kräfte führen im Bodenkörper zur Entstehung von Spannungen als resultierende Bodenreaktionskraft. Die Auflast kann bodenexogener Natur sein oder bodenendogen auf die Gewichtskraft der darüber gelagerten Bodensubstanz zurückzuführen sein. Dabei wirken die Kräfte im Bodengefüge über Korn – Korn - Kontakte zwischen der festen, flüssigen und gasförmigen Bodenphase. Die Summe der am Einzelbodenteilchen angreifenden Spannungen bildet sich aus den bodenexo- und bodenendogenen Auflasten, den von der flüssigen Bodenphase ausgehenden Kräften sowie lokalen Ko- und Adhäsionskräften an den Kontaktstellen. Die auf den Boden einwirkenden Kräfte werden aufgrund ihres Flächenbezugs in der Regel als Drücke bezeichnet und in Pascal (Pa) als SI-Einheit des Drucks quantifiziert (HARTGE und HORN 1999).

Die Darstellung der Einzelkräfte erfolgt im Modell entlang einer virtuellen Schnittfläche. Bei der Betrachtung eines isolierten Bodenteilchens lassen sich sechs senkrecht zueinander angeordnete Flächen differenzieren, auf welche jeweils äußere Kräfte einwirken. Aufgrund der nicht senkrecht zur Betrachtungsfläche ausgerichteten Wirkrichtungen sind diese in Normal- und Tangentialspannungskomponenten zu zerlegen. In der Bodenkunde werden diese als Normal- und Scherspannung definiert (HORN und SEMMEL 1994; HARTGE und HORN 1999). Die Normalspannungskomponente kann als Druck- oder Zugspannung auftreten (KUNTSCHKE 2000).

Abb. 2 zeigt schematisch die Aufspaltung der angreifenden Kräfte in Normal- (σ) und Scherspannungskomponenten (τ). Für jede der betrachteten Flächen existiert ein definierter Spannungsvektor, welcher für die drei Koordinatenachsen X, Y und Z in drei Einzelkomponenten zerlegt werden kann. In Richtung der Koordinatenachsen wirken ausschließlich Hauptspannungen, die einer weiteren Aufspaltung in Normal- und Scherspannung nicht zugänglich sind. Im Gleichgewichtszustand greifen am idealisierten Raumelement drei Normal- und sechs Scherspannungen an, wobei sich drei der Scherspannungen von gegenüberliegenden Flächen nur um Differentiale

unterscheiden und somit nicht als unabhängig angesehen werden können. Die Beschreibung des Spannungszustands, an einem definierten Punkt im Inneren eines Körpers, wird folglich durch die Einbeziehung der verbleibenden sechs unabhängigen Spannungskomponenten (Spannungstensor) möglich (KÉZDI 1969; HORN und SEMMEL 1994; KOLYMBAS 1998; HARTE und HORN 1999).

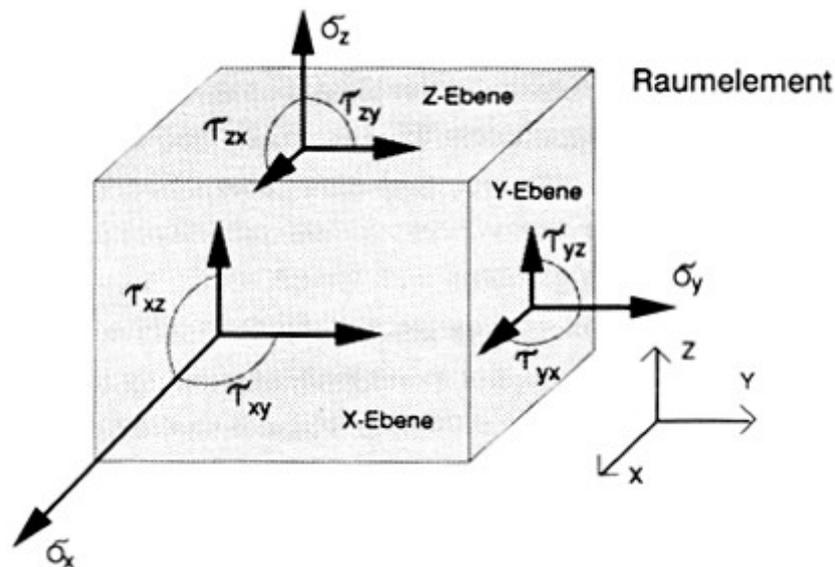


Abb. 2: Haupt- (σ) und Scherspannungskomponenten (τ) am isolierten Bodenkörper (Einheitselement) (HORN und SEMMEL 1994).

Durch Rotation des Koordinatensystems können für jeden Spannungszustand drei zueinander orthogonal ausgerichtete Flächen identifiziert werden, in denen keine Scherspannungen, sondern ausschließlich Normalspannungen angreifen. Die in den ermittelten Hauptspannungsebenen angreifenden Normalspannungen werden analog als Hauptnormalspannungen bezeichnet und über Indizes unterschieden. Die Transformation des kartesischen Spannungstensors zum Hauptspannungstensor gestattet die Überführung in andere Koordinatensysteme (HAMMEL 1993; SCHMIDT 2001; SCHREIBER 2009).

Spannungen im Boden können in effektive und neutrale Spannungen unterschieden werden. Effektive Spannungen wirken von außen auf das Korngerüst ein und lösen Bodenverformungen bzw. Volumen- und Gestaltsänderungen aus. Im Gegensatz dazu werden neutrale Spannungen über Porenwasser und Porenluft abgetragen.

Saugspannungen erhöhen die effektive Spannung, wohingegen Druckspannungen der effektiven Spannung entgegen gerichtet sind (HAMMEL 1993). In wassergesättigten Böden mit begrenzter Wasserleitfähigkeit kann ein durch äußere Belastung induzierter Porenwasserüberdruck somit kurzfristig zur Steigerung der Gesamtgefügestabilität beitragen. Dies gilt umso mehr für kurze Belastungsimpulse, während derer eine Entwässerung des Porenvolumens im Hinblick auf den Zeitfaktor nicht möglich ist (LANG et al. 2007). Analog ist der Einfluss der Bodenluft in wasserungesättigten Böden zu berücksichtigen. Aufgrund eines gegenüber dem Porenwasser wesentlich beschleunigten Potenzialausgleichs durch Entweichen der Porenluft, gilt der Einfluss der Porenluft auf die Spannungsverhältnisse allerdings allgemein als vernachlässigbar (HAMMEL 1993).

2.1.2 Spannungsausbreitung

Die Spannungsausbreitung im Boden wird im landwirtschaftlichen Kontext unter der Annahme des Bodengefüges als idealisierter, linear elastisch-isotroper Halbraum in Anlehnung an die lineare Elastizitätstheorie beschrieben. Der Zustand der natürlichen Spannungsverteilung im Boden, welcher ausschließlich auf die mechanische Belastung durch das darüber gelagerte Bodenmaterial zurückzuführen ist, wird in diesem Zusammenhang als geostatisch bezeichnet. Horizontal homogen gelagerte Böden lassen keine Scherspannungen erwarten, folglich können diese als richtungsunabhängig und gleich groß angenommen werden. Der Quotient aus horizontaler und vertikaler Spannung ist als Ruhedruckkoeffizient des Bodens definiert (HAMMEL 1993; KOLYMBAS 1998; LANG et al. 2007).

Die Spannungsverteilung im Boden lässt sich durch halbempirische Modelle berechnen. Die Modelle differenzieren zwischen der Spannungsausbreitung unter vertikalen und horizontalen Einzel- (BOUSSINESQ 1885; CERRUTI 1888) und Flächenlasten (SÖHNE 1951; SCHMIDT 2003). Einzellastmodelle reduzieren die Belastungsfläche auf einen statischen Punkt der Kraffteinleitung, wohingegen die Flächenlastmodelle die reale Kraffteinleitung über seitlich begrenzte Flächen berücksichtigen (HARTGE und HORN 1999).

Aufbauend auf den Arbeiten von BOUSSINESQ (1885) modifizierte FRÖHLICH (1934) dessen Gleichung durch Integration von Konzentrationsfaktoren (ν) zur Berücksichti-

gung unterschiedlicher Gefügestabilitäten und des elastoplastischen Bodenverhaltens. Dabei erfolgt die Spannungsausbreitung mit wachsendem Konzentrationsfaktor (instabileres Bodengefüge) in zunehmend tiefere Bodenschichten, während die horizontale Ausbreitung abnimmt (Abb. 3). Empirische Studien von BURGER et al. (1988) ermittelten Konzentrationsfaktoren von $v = 3$ (hart) bis $v = 9$ (sehr weich) für landwirtschaftlich genutzte Böden. Die Druckfortpflanzung im Boden und folglich der bodenspezifische Konzentrationsfaktor können aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität des Bodengefüges nicht als konstant angenommen werden (HORN 1991; HARTGE und HORN 1999; BECHER 2004).

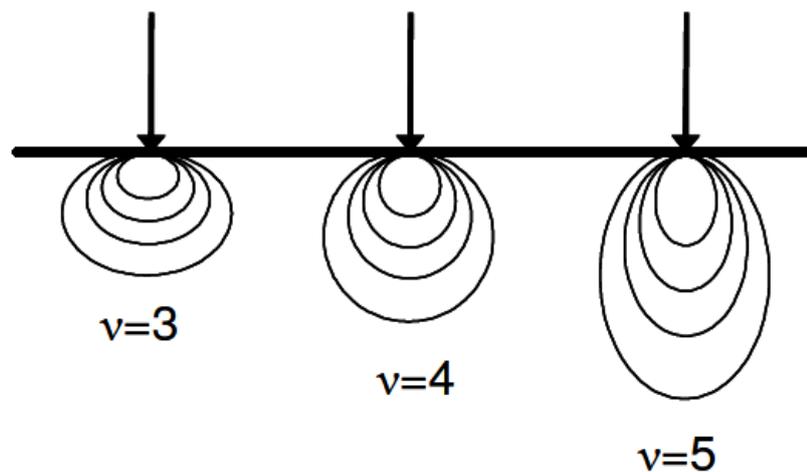


Abb. 3: Spannungsausbreitung unter punktförmigen Auflasten bei unterschiedlichen Konzentrationsfaktoren (v) (KÉZDI 1969).

SÖHNE (1953) visualisierte das Spannungsfeld unterhalb der Auflast durch Linien gleicher Hauptdruckspannungen (Isobaren) und entwarf das bekannte Druckzwiebelmodell der landtechnischen Bodenmechanik (Abb. 4). Zur Berechnung der Spannungen außerhalb der Lastachse und zur Berücksichtigung der ungleichmäßigen Druckverteilung in der Kontaktfläche zerlegte er die gleichmäßige Flächenlast in verschiedene, als Punktlasten betrachtete Einzellasten.

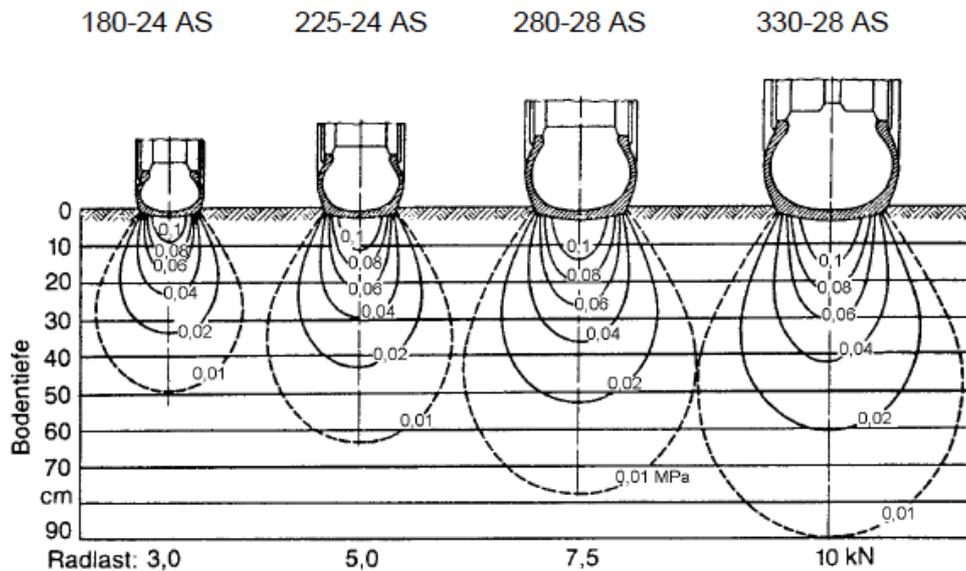


Abb. 4: Darstellung der radlastabhängigen Tiefenwirkung nach dem von SÖHNE (1953) beschriebenen Druckzwiebelmodell bei jeweils gleichem Kontaktflächendruck (RENIUS 1985).

2.1.3 Messung des Spannungszustands

Die Messung des Spannungszustands ist ein wesentliches Instrument zur Validierung einer mathematisch prognostizierten Spannungsausbreitung im Boden und erlaubt eine Quantifizierung der im Boden hervorgerufenen Beanspruchung. Insbesondere dienen geeignete Messsysteme einer Erfassung der räumlichen und dynamischen Druckausbreitung im Boden, hervorgerufen durch flächenspezifisch einwirkende Gewichtskräfte (SÖHNE 1953). Im landwirtschaftlichen Kontext werden zur Messung überwiegend hydraulische oder elektronische Sensorsysteme verwendet (BOLLING 1986; SEMMEL 1993). Nach BOLLING (1986) zeichnet sich ein geeignetes Messsystem durch ein vergleichbar plastisch-kompressibles Materialverhalten von Sensor und dem umgebenden Bodenmaterial aus.

Bei der von BOLLING und SÖHNE (1982) sowie BOLLING (1984) beschriebenen Schlauchdrucksonde handelt es sich um ein hydraulisches Messsystem, dessen drucksensitiver Bereich rein plastisch ohne Ausbildung einer dauerhaften Verformung der Bewegung des Bodenmaterials folgt. Die Schlauchdrucksonde ist als geschlossenes hydraulisches System konzipiert. Ein mit Flüssigkeit befülltes Rohr wird endständig einerseits mit einem Sensorelement aus verformbarem Material (z. B.

Silikonschlauch), andererseits mit einem Manometer bzw. elektronischen Druckaufnehmer ausgerüstet. Nach der Installation im weitestgehend ungestörten Bodengefüge wird der drucksensitive Bereich der Sonde analog zum umgebenden Bodenmaterial durch angreifende Drücke komprimiert und der resultierende Druckanstieg quantifiziert. Die Schlauchdrucksonde erfasst die mittlere vorherrschende Druckspannung am Ort der Installation. Eine Unterscheidung der angreifenden Einzelspannungen oder Aussagen zur spezifischen Wirkrichtung der Beanspruchung sind nicht möglich.

Bei den elektronischen Sensoren ist der Einsatz von Dehnungsmessstreifen (DMS) als Standard anzusehen. Deren Verwendung zur Messung von Bodenspannungen wurde erstmals von COOPER et al. (1957) beschrieben. Auf entsprechende Trägermaterialien aufgebrachte Sensorfolien registrieren dehnende und stauchende Verformungen und machen deren Betrag in Form einer elektrischen Widerstandsänderung quantifizierbar. Die ursprünglich eindimensional konzipierte Sensorik wurde u. a. durch NICHOLS et al. (1984), LEBERT und HORN (1991) sowie HORN und SEMMEL (1994) weiterentwickelt. Die modifizierten Varianten enthalten mehrere DMS-Einzelsensoren und ermöglichen somit eine wirkrichtungsabhängige Erfassung der Bodenspannungen. Die Installation der DMS-Sensoren setzt einen Eingriff in das gewachsene Bodengefüge am Versuchsstandort voraus, was tendenziell durch Auflockerungseffekte einen Anstieg der gemessenen Druckwerte hervorruft (SEMMEL 1993). Das gleiche Sensorverhalten wurde auch von HESSE (1983) und BOLLING (1986) beschrieben. Sie begründeten den Effekt mit der im relativen Vergleich zum Bodengefüge geringen Elastizität des Sensormaterials. Im Randbereich des Sensors konzentrieren sich die Spannungen und täuschen somit zu hohe Drücke vor. Als vorteilhaft ist die eindeutig wirkrichtungsbezogene Sensitivität der starren Sensoren anzuführen.

2.1.4 Bodenverformung

Ein deformierbares Material nimmt durch die Einwirkung äußerer Kräfte einen bestimmten Spannungs- und Verformungszustand ein. Infolge dessen bewegt und verformt sich ein Material dahingehend, dass jeder gedachte innere Punkt um einen definierten Positionsvektor verschoben wird und somit eine neue Lage im Raum ein-

nimmt. Die grundsätzliche Verformbarkeit eines Materials setzt voraus, dass sich dessen elementare Bestandteile selbst verformen, brechen oder gegeneinander verschieben können. Innerhalb des Bodengefüges sind diese Prozesse in der Regel eng verknüpft und folgen komplexen Abläufen (HAMMEL 1993). Die bodenmechanische Analyse von Spannungs-Verformungs-Interdependenzen ist weitestgehend auf makroskopische Betrachtungen und empirische Beschreibungen begrenzt.

Die Verformung kann theoretisch auf die Änderung von Volumen (isotrope Beanspruchung) oder Gestalt (ausschließliche Scherbeanspruchung) beschränkt sein. In der Praxis sind eintretende Deformationen jedoch stets Folge einer Mischbeanspruchung (KUNTSCHKE 2000; KATZENBACH 2013). Wechseln während einer Beanspruchungsphase die Wirkrichtungen der Hauptspannungen wiederholt, resultiert hieraus eine Homogenisierung und Verknüpfung des Bodengefüges mit gravierender Beeinträchtigung dessen strukturellen Aufbaus (HAMMEL 1993).

Die Bodenbeanspruchung induziert reversible und irreversible Verformungen. SÖHNE (1952) und BETTEN (1986) unterschieden die bei Entlastung vollständig reversible elastische Verformung vom irreversiblen Effekt der plastischen Verformung. Die elastische Verformung ist primär auf eine Kompression von Humusbestandteilen und eingeschlossener Bodenluft zurückzuführen. Die Sackungsverdichtung hingegen ist Folge einer Überschreitung der standortspezifischen Gefügestabilität und resultiert in einer plastischen Verformung. Der Verformungsprozess löst morphologisch eine dauerhafte Veränderung der Lagerungsstruktur der Bodenpartikel aus, wobei diese als Fließbewegung (Volumenkonstanz) oder als Verdichtung (Volumenminderung) erfolgen kann. Die plastische Verformung entspricht einer Zunahme der Kontaktpunkte zwischen den einzelnen Bodenpartikeln und damit einer Steigerung der mobilisierbaren Reibungsspannung als Bodenreaktionskraft. Die Verformung schreitet fort, bis sich ein neues Gleichgewicht zwischen Beanspruchung und Eigenstabilität des Bodens einstellt, wobei die Konsolidierung mit einer Reduzierung der luft- und wassergefüllten Grobporen einhergeht (SEMMELE und HORN 1995; HARTGE und HORN 1999; NISSEN 1999). Kurzfristige Belastungen betreffen nach GRUBER (1993) generell die luftgefüllten Grobporen, wohingegen statische und längerfristige Belastungen auch ein Auspressen des wassergefüllten Porenraums zur Folge haben. Aus pflanzenphysiologischer Sicht sind neben der Verringerung des Porenvolumens auch die Unterbrechung der Porenkontinuität und die damit verbundene Schmälerung der

Gas- und Wasseraustauschkapazität zu berücksichtigen. Der als Bodenspannung quantifizierte Übergang von elastischer zu plastischer Verformung (entsprechend der Eigenstabilität des Bodens) wurde von HORN et al. (1991) sowie HARTGE und HORN (1999) als Vorbelastung definiert.

2.2 Landwirtschaftliche Traktoren und Zugmaschinen

Aus der hochgradigen Mechanisierung der landwirtschaftlichen Produktionsprozesse resultieren spezifische Anforderungen an die zum Einsatz kommende Landtechnik. In diesem Zusammenhang fällt den Traktoren als selbstfahrende Zug- oder Arbeitsmaschinen eine besondere Bedeutung bei der Umwandlung von Motorleistung in Zugkraft zu. HEYDE (1973) definierte den Traktor als „selbstfahrendes Landfahrzeug [...], das zur Eigenfortbewegung, zum Ziehen oder zum Schieben von Arbeitsmaschinen und Anhängern sowie zum unmittelbaren Zapfwellenantrieb von Arbeitsmaschinen dient“. RENIUS (1985) stellte die herausragende Bedeutung des Traktors als landwirtschaftliche Basismaschine für die Erledigung vielfältiger Feld-, Transport- und Hofarbeiten fest. BLUMENTHAL (1985) beurteilte den Einsatz von Traktoren zusammenfassend als energetische Grundlage einer jeden industriellen Pflanzenproduktion.

2.2.1 Systematik landwirtschaftlicher Traktoren

Landwirtschaftliche Traktoren können anhand ihrer Bauart gegliedert werden. Unterschieden werden vielfach Standard-, Frontsitz- und Mittelsitztraktoren sowie Geräteträger und Schmalspurtraktoren für Weinbau- oder Plantagenkulturen (RENIUS 1985; EICHHORN 1999). Abb. 5 stellt die verschiedenen Bauarten einschließlich ihrer charakteristischen Anbauräume schematisch dar.

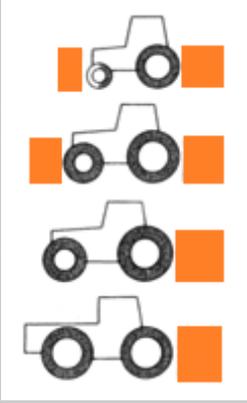
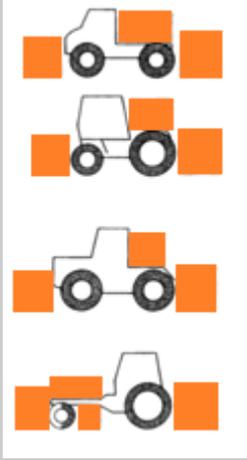
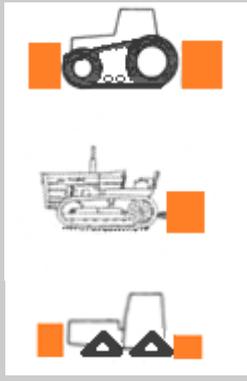
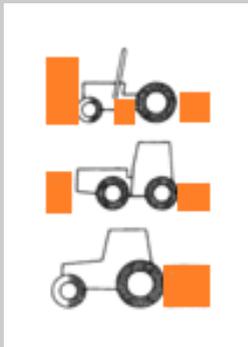
			
<p>Standardtraktoren</p>	<p>Sondertraktoren/Geräteträger</p>	<p>Kettentraktoren</p>	<p>Schmalspurtraktoren</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Universaltraktoren in Blockbauweise • meist mit Allradantrieb • Bedeutung reiner Zugtraktoren sinkend. 	<ul style="list-style-type: none"> • Spezialtraktoren in Rahmenbauweise • zusätzliche Lade- und Anbauräume • meist mit Allradantrieb • hohe Transportgeschwindigkeiten • hoher Fahrkomfort • geringe Stückzahlen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Block- und Rahmenbauweise • Zweiraupen mit Hinterradantrieb • Vierraupen mit Permanentantrieb aller Laufwerke • Verwendung auf wenig tragfähigen Böden oder beim Bewirtschaften von hängigem Gelände. 	<ul style="list-style-type: none"> • Block- und Rahmenbauweise • kompakte und schmale Bauweise • hohe Motorleistung im Verhältnis zu Bau- und Bereifungsgröße • Antrieb der Anbaugeräte über die Zapfwelle dominiert.

Abb. 5: Schematische Übersicht über die verschiedenen landwirtschaftlichen Traktorbauarten. Die nutzbaren Geräteanbauräume sind orange hervorgehoben (modifiziert nach RENIUS 1985).

Den Standardtraktoren, in der Ausführung des Universaltraktors, kommt in der deutschen Landwirtschaft die wirtschaftlich größte Bedeutung zu. Die Verbreitung von Systemtraktoren in Front- und Mittelsitzbauweise sowie von Geräteträgern geht zu Gunsten der Universaltraktoren zunehmend zurück. Gleichwohl weisen diese Bauarten Vorteile hinsichtlich des Fahrkomforts, der Anbauräume und der technischen Ausstattung auf.

2.2.2 Systematik weinbaulicher Traktoren

Im Weinbau weicht die Klassifizierung und Bezeichnung der Traktoren von der üblichen landwirtschaftlichen Terminologie ab. STEINMETZ (1985), DIETRICH (1995), VOGT und SCHRUF (2000) sowie WALG (2007a) unterscheiden in:

- Standardtraktoren
- Schmalspurtraktoren mit Achsschenkellenkung
- Schmalspurtraktoren mit Knicklenkung
- Schmalspur-Kettentraktoren
- Spezialtraktoren für den Steilhang
- Überzeilentraktoren (Hochschlepper).

In ebenen und direktzugfähigen Weinbergen ist der Schmalspurtraktor mit Achsschenkellenkung die am häufigsten verbreitete Bauart. In geringerem Umfang werden die übrigen Varianten zur Berücksichtigung betriebs- und standortspezifischer Besonderheiten eingesetzt, insbesondere zur Anpassung der Mechanisierung an Hang- und Steillagen (VOGT und SCHRUF 2000; BÖHME 2003). Die Grenze der Direktzugmechanisierung wird durch die gegebene Bewirtschaftungstechnik bei etwa 60 - 70 % Hangneigung definiert (vgl. Abb. 6; RÜHLING 1980; STEINMETZ 1985; DIETRICH 1995; WALG 2007a). Die regelmäßig im Weinbau verwendeten Traktoren werden nachfolgend hinsichtlich ihrer konstruktiven Merkmale und der spezifischen Einsatzspektren dargestellt.

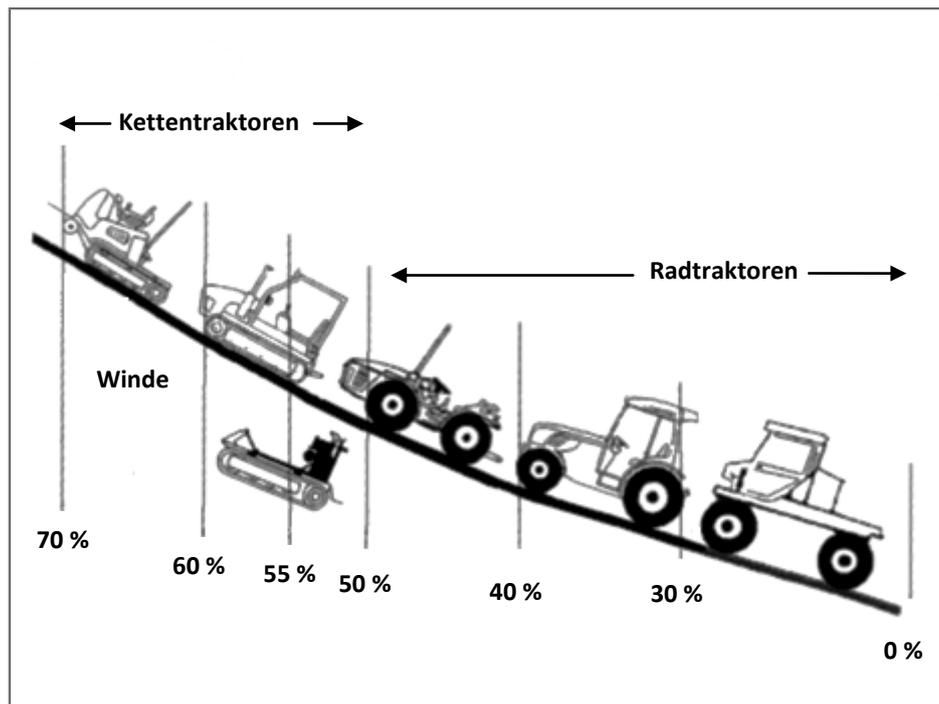


Abb. 6: Praktische Grenzen der Direktzugmechanisierung bei zunehmender Hangneigung für verschiedene Mechanisierungssysteme (modifiziert nach WALG 2007a).

2.2.2.1 Standardtraktoren

Landwirtschaftliche Standardtraktoren finden im Weinbau überwiegend als Zugmaschine für Transportarbeiten Anwendung oder für die Durchführung periodisch notwendiger Rigol-, Bodenbearbeitungs- und Pflanztätigkeiten mit hohem Leistungsbedarf (WALG 2007a). Darüber hinaus sind diese Transport-, Zug- und gegebenenfalls Antriebseinheit für die verschiedenen Mechanisierungskonzepte des Steillagenweinbaus (Sitzpflug, Steilhang-Mechanisierungssystem (SMS), Raupen-Mechanisierungssystem (RMS), Steillagen-Traubenvollernter (STVE), Steillagen-Geräteträger (STGT)) (RÜHLING 1979; DIETRICH 1995; BÖHME 2003; WALG 2007a; FISCHER 2010).

2.2.2.2 Schmalspurtraktoren mit Achsschenkelenkung

Schmalspurtraktoren mit Achsschenkelenkung bilden das klassische Mechanisierungssystem des Wein-, Obst- und Plantagenbaus. Im deutschen Weinbau stellen diese das am weitesten verbreitete Schmalspurmechanisierungssystem dar (DIET-

RICH 1995). Vorder- und Hinterachse sind mit ungleich großen Reifen bei einer Masseverteilung von etwa 1 : 2 (Vorderachse : Hinterachse) ausgestattet (VOGT und SCHRUF 2000). Schmalspurtraktoren sind überwiegend allradgetrieben, wobei aus technischer Sicht und unter Berücksichtigung der divergierenden Reifengrößen die Bezeichnung Hinterradantrieb mit zusätzlichem Frontantrieb opportun wäre (unechter Allradantrieb; WALG 2007a). Schmalspurtraktoren sind oftmals aus Standardtraktoren abgeleitet. Sie zeichnen sich durch eine schmale und kompakte Bauweise aus (ab 1,0 m Außenbreite). Im Verhältnis zur bauartbedingt begrenzten Reifengröße verfügen Schmalspurschlepper über hohe Motorleistungen, doch überwiegt im Hinblick auf die verwendeten Anbaugeräte die Leistungsabgabe über die Zapfwelle (RENIUS 1985). Eine Vielzahl weinbauspezifischer Anbaugeräte wird zusätzlich oder ausschließlich hydraulisch über vom Fahrzeugantrieb bereitgestelltes Drucköl angetrieben. Ökonomisch vorteilhaft ist die Möglichkeit der Montage von Anbaugeräten im Zwischenachsbereich (DIETRICH 1995). Die Einsatzgrenze allradgetriebener Schmalspurtraktoren wird bei etwa 30 % Hangneigung angenommen. Bei Verwendung von Terra- und Niederquerschnittsbereifung sind unter ansonsten günstigen Einsatzbedingungen auch Steigungen von bis zu 40 % befahrbar.

2.2.2.3 Schmalspurtraktoren mit Knicklenkung

STEINMETZ (1985) stellte die besondere Eignung knickgelenkter Schmalspurtraktoren für die Steilhangbewirtschaftung fest. Als ausschlaggebende Faktoren hierfür führt dieser insbesondere die vier gleichgroßen Antriebsräder mit Permanentantrieb (echter Allradantrieb) sowie die günstige Verteilung der Fahrzeugmasse in einem Verhältnis von 2 : 1 mit Schwerpunkt auf der Vorderachse an. Die konstruktive Frontlastigkeit gewährleistet auch bei angebauten Arbeitsgeräten im Heck eine ausreichende Lenk- und Steigfähigkeit des Schleppers und wirkt einem Hintenüberkippen bei der Bergfahrt entgegen. Die zugrundeliegenden mechanischen Prinzipien zur Stabilität des Schleppers im statischen wie dynamischen Zustand haben u. a. SCHILLING (1960) und BLUMENTHAL (1985) ausführlich dargestellt. Von besonderer Bedeutung für die Längsstabilität ist in diesem Zusammenhang die stetige Gewährleistung einer positiven Auflagerkraft an den einzelnen Rädern. Insbesondere ist eine vollständige Achsentlastung durch die Summe der angreifenden Kräfte und Momente (z. B. Hangabtriebs-, Zug- und Fliehkraft, Fahrwiderstände sowie Trägheitskräfte bei der

Translation und Rotation) in sämtlichen Betriebszuständen auszuschließen. Die Beurteilung der Stabilität von Gerätekombinationen aus Schlepper und Anbaugeräten erfordert eine Berücksichtigung des resultierenden gemeinsamen Schwerpunkts. Dabei wirken sich während bergseitiger Fahrt Anbaugeräte im Heckanbaubereich durch die resultierende Vorderachsentslastung negativ auf den kritischen Kippwinkel und die Schlepperlängsstabilität aus; bei talseitiger Fahrt gilt dies für Anbaugeräte im Front- und Zwischenachsbereich (SCHILLING 1960). Schmalspurtraktoren mit Knicklenkung ermöglichen bei entsprechender Bereifung und Ballastierung ein Befahren von Gelände mit bis zu 50 % Hangneigung (WALG 2007a), wobei oberhalb von 35 - 40 % Hangneigung nur noch Geräte mit Zapfwellen- oder Hydraulikantrieb eingesetzt werden können (DIETRICH 1995).

2.2.2.4 Schmalspur-Kettentraktoren

Schmalspur-Kettentraktoren erschließen weitergehende Mechanisierungsmöglichkeiten im Steillagen-Weinbau bis zu einer Grenzhangneigung von etwa 70 % (bei Windenunterstützung). Die Steigfähigkeit wird dabei durch den niedrigen Fahrzeugschwerpunkt, die frontlastige Masseverteilung und die große Kontaktfläche zwischen Antriebskette und Fahrbahn positiv beeinflusst. Bei gleicher Fahrzeugmasse resultiert hieraus eine gegenüber dem Radschlepper erhöhte Zugleistung (STEINMETZ 1985; RÜHLING 1988; WALG 2007a). Schmalspur-Kettentraktoren sind hinsichtlich ihrer allgemeinen Ausstattungsmerkmale und Geräteanbauräume mit konventionellen Radtraktoren vergleichbar. Allgemein ist dem Kettenschlepper eine besondere Vorzüglichkeit beim Befahren strukturschwacher und wenig tragfähiger Böden zu bestätigen (BLUMENTHAL 1985). Die Verbreitung der Schmalspur-Kettenschlepper ist im Weinbau in der Regel auf Hanglagen beschränkt, insbesondere auf Bereiche, welche eine Bewirtschaftung mit Radtraktoren aufgrund der Bodenbeschaffenheit, des Skelettanteils oder des Bodenpflegesystems nicht mehr zulassen (DIETRICH 1995). Als nachteilig sind die abrasive Schädigung befestigter Wirtschaftswege sowie das Abscheren von Begrünpflanzen innerhalb der Kulturfläche zu bezeichnen. Beschädigungen können durch die Verwendung von Gummigurtbändern bzw. Kombinationen aus Stahlgliederketten und Gummistollen vermindert werden, wobei die Zug- und Steigfähigkeit des Fahrzeugs jedoch um bis zu 25 % absinkt (RÜHLING und STRUCK 1988). Während in der Vergangenheit wiederholt höhere Unterhaltungskosten

ten für die Schmalspur-Kettentraktoren ausgewiesen wurden, erreichen diese inzwischen ein mit Radtraktoren vergleichbar günstiges Niveau (KTBL 2013). Handgeführte Kleinraupen werden als Sonderbauform systematisch den Kettentraktoren zugeordnet (VOGT und SCHRUF 2000). Auf eine differenzierte Darstellung wird daher verzichtet.

In jüngerer Zeit offerieren diverse Hersteller neuartige Kettentraktoren, welche in der Regel technologische Weiterentwicklungen bestehender Fahrzeugplattformen darstellen. Exemplarisch sei an dieser Stelle auf Entwicklungen der Hersteller Carraro, Holder und Kubota verwiesen. Die Fahrzeuge sind als Vier- bzw. Halbraupenfahrzeuge konzipiert. Die Lenkung erfolgt über Knick- bzw. Achsschenkelenkung (Abb. 7 - 10). Die zumeist pendelnd oder federnd ausgeführten Bandlaufwerke ermöglichen Fahrgeschwindigkeiten bis zu $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.



Abb. 7: Holder Systemtraktor M 480 mit Standard- und Bandlaufwerk (HOLDER 2014).



Abb. 8: Schmalspurtraktor Carraro SRX mit Knicklenkung und Mach 4 mit Bandlaufwerken.



Abb. 9: Schmalspurtraktor M 8540 Narrow mit Standard- und Halbraupenfahrwerk (KUBOTA 2014).



Abb. 10: Detailaufnahme des Anbaulaufwerks beim M 8540 Narrow mit Kennzeichnung (gelbe Pfeile) der Spannvorrichtung und des Fahrwerkdrehpunkts (KUBOTA 2014).

Die neuartigen Schmalspur-Kettentraktoren sind an Entwicklungen aus der allgemeinen Landwirtschaft angelehnt. Ähnliche Fahrzeugkonzepte (z. B. Case IH Quadtrac, vgl. Abb. 11) werden dort zur Grundbodenbearbeitung bereits erfolgreich eingesetzt, insbesondere bei hohem Zugkraftbedarf oder auf Standorten mit geringer Bodentrag-

fähigkeit. Ebenso finden diese Verwendung bei der Konstruktion selbstfahrender Erntemaschinen.



Abb. 11: Case IH Quadtrac als Beispiel neuartiger Gummibandlaufwerke in der Landwirtschaft (CASE IH 2013).

Verschiedene Hersteller haben Raupenfahrwerke zur Umrüstung vorhandener Fahrzeuge entwickelt. Diese ermöglichen einen bedarfsabhängigen Wechsel zwischen Rad- und Raupenfahrwerk, sowohl für den Einsatz in Sonder- als auch in Flächenkulturen. Die Montage der Laufwerke erfolgt an der Achsnabe. Konstruktiv bedingt weisen die Antriebstrasse der Anbaulaufwerke einen geringeren Durchmesser auf als die ursprüngliche Bereifung. Bei unverändertem Gesamtübersetzungsverhältnis des Antriebsstrangs resultiert hieraus eine Verminderung der Fahrzeugendgeschwindigkeit.

Im weinbaulichen Kontext werden die neuartigen Bandlaufwerke als Universalfahrwerke bezeichnet, welche die jeweiligen Vorteile aus Rad- und Raupenfahrwerken

vereinen. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf das Zugkraft- und Bodendruckverhalten. Belastbare Angaben zum tatsächlichen Verhalten im Praxiseinsatz sind der einschlägigen Fachliteratur jedoch bislang nicht zu entnehmen. Auch liegen nur wenige dezidierte Veröffentlichungen zu Vierraupenlaufwerken in der allgemeinen Landwirtschaft vor. Die vorliegende Arbeit greift diese Informationslücke auf und nimmt eine Bewertung der neuartigen Bandlaufwerke vor.

2.2.2.5 Spezialtraktoren und Überzeilenschlepper

Über die genannten Schmalspurtraktoren hinaus werden auch Spezialfahrzeuge für die Bewirtschaftung von Weinbausteillagen eingesetzt. Diese Fahrzeugkonzepte sind häufig Sonderanfertigungen in kleiner Stückzahl und oftmals aus der Gebirgs- und Almbewirtschaftung abgeleitet (z. B. Trak-Systeme). Gemein ist den Fahrzeugen ein niedriger Masseschwerpunkt in Verbindung mit einer Konstruktion in Leichtbauweise. Aus Stabilitätsgründen weisen derartige Konstruktionen Außenbreiten bis 1,6 m auf. Für die Verwendung in Rebanlagen sind folglich Zeilenbreiten über 2,0 m erforderlich, was den Einsatz unter traditionellen Anbaubedingungen im Steillagenweinbau unwirtschaftlich erscheinen lässt (STEINMETZ 1985; DIETRICH 1995; WALG 2007a). Die fortschreitende Etablierung drahtrahmenunterstützter Erziehungssysteme für Weinreben in Steillagen und die damit einhergehende Vergrößerung der Zeilenbreiten lässt zukünftig eine wachsende Verbreitung erwarten. Weiterhin kann in vielen deutschen Anbaugebieten derzeit ein Angebotsüberhang für Rebgelände im Steillagengebiet festgestellt werden. Die verminderte Flächenkonkurrenz reduziert somit die Notwendigkeit einer möglichst hohen Flächennutzungsintensität und erlaubt somit größere Zeilenabstände mit der Möglichkeit des Einsatzes alternativer Mechanisierungskonzepte. Neuentwicklungen im Bereich der Steillagenmechanisierung zielen auf weitestgehend autonom agierende Spezialfahrzeuge ab (BRUNNER et al. 2011; SCHWARZ et al. 2012).

JENISCH (1967) beschrieb Hangschlepper mit verstellbaren Parallelogramm-Gelenkrahmen zur Anpassung der Fahrwerke an die Hangsichtlinie (Abb. 12). Das Konstruktionsprinzip erlaubt eine stufenlose, stets senkrechte Ausrichtung der Räder an die Hangneigung, wobei eine gleichmäßige Treibradbelastung sichergestellt und eine günstige Schwerpunktlage erzielt werden kann. Die Verbreitung derartiger Kon-

struktionen im Weinbau ist sehr gering. Im forstwirtschaftlichen Bereich findet die Möglichkeit der aktiven Niveauregulierung hingegen Anwendung, insbesondere bei leistungsfähigen Erntefahrzeugen (RAAB und WAUER 2002).

Für den Weinbau haben Hochschlepper als Baustein zur Etablierung mehr- und überzeitlicher Arbeitsverfahren eine gewisse Bedeutung, insbesondere in den süd- und südwesteuropäischen weinbautreibenden EU-Mitgliedsstaaten. Im deutschen Weinbau werden vereinzelt die Fahrgestelle selbstfahrender Traubenvollernter als Hochschlepper verwendet. Im Gegensatz zum konventionellen Traktor steht Anbaugeräten in der Regel ausschließlich hydraulische Antriebsleistung zur Verfügung. Das hydraulische Antriebskonzept ermöglicht eine stufenlose Regulierung der Antriebsleistung unter Inkaufnahme verminderter Wirkungsgrade (MARBÉ-SANS 2006; WALG 2007a).



Abb. 12: Systeme zur Steilstlagenmechanisierung (BERGTRAC 2014; PEKAZETT o.J.).

2.3 Fahrwerkskonzepte

Aus den unterschiedlichen Einsatzbedingungen bei der Durchführung von Feld- oder Transportarbeiten resultieren differenzierte Anforderungen an die einzelnen technischen Baugruppen des Traktors. Dabei fällt dem Fahrwerk in seiner Aufgabe als Bindeglied zwischen Fahrzeug und Fahrbahn eine zentrale Bedeutung zu. Als Bestandteile des Fahrwerks können vor diesem Hintergrund alle kraftleitenden Bauteile des Traktors mit Ausnahme des Getriebes angesehen werden (SCHILLING 1960;

WENNER et al. 1986; BLUMENTHAL 1985; RENIUS 1985; SCHREIBER 2009; GEISCHEDER 2011).

Zusammenfassend können nachfolgende Anforderungen an die verwendeten Fahrwerke festgehalten werden (Tab. 1):

Tab. 1: Anforderungsprofil an landwirtschaftliche Fahrwerke (modifiziert nach WEIßBACH und WINTER 1996; SCHREIBER 2009; GEISCHEDER 2011).

Feldfahrt	Straßenfahrt
hohe Haltbarkeit und Grenznutzungsdauer (geringer Verschleiß)	hohe Haltbarkeit und Grenznutzungsdauer (geringer Verschleiß)
hoher Wirkungsgrad, geringer Treibstoffverbrauch	hoher Wirkungsgrad, geringer Treibstoffverbrauch
geringe Fahrwiderstände	geringe Fahrwiderstände
hohe Tragfähigkeit (Zuladung), hohe Zugkraft	hohe Tragfähigkeit (Zuladung), hohe Zugkraft
optimale Fahrsicherheit	optimale Fahrsicherheit
geringe Bodenpressung, Bodenschonung (Kontaktflächendruck)	
guter Selbstreinigungseffekt (optimierte Profilierung)	
hoher Fahrkomfort (ergonomische Ausgestaltung des Fahrer- Arbeitsplatzes durch Dämpfung, Federung etc.)	hoher Fahrkomfort (ergonomische Ausgestaltung des Fahrer- Arbeitsplatzes durch Dämpfung, Federung etc.)
wirksame Übertragung von Antriebs- und Bremskräften auf die Fahrbahn	wirksame Übertragung von Antriebs- und Bremskräften auf die Fahrbahn
Konformität hinsichtlich gesetzlicher und normativer Regularien (StVO, StVZO etc.)	Konformität hinsichtlich gesetzlicher und normativer Regularien (StVO, StVZO etc.)

Die Fahrwerke der Traktoren sind unter Berücksichtigung des Anforderungsprofils stets als Resultat eines technisch-konstruktiven Kompromisses anzusehen, der aus den teils konkurrierenden Anforderungen des Feld- und Straßeneinsatzes resultiert.

Im landwirtschaftlichen Nutzbereich werden Traktoren mit Rad- und Kettenfahrwerken eingesetzt, wobei die Verwendung von Radfahrwerken weit überwiegt (WENNER et al. 1986). Hiervon sind seltener gebräuchliche Sonderbauformen wie Stufen-, Rollschreit- oder Schreitschlepper zu unterscheiden (SCHILLING 1960; HEYDE 1973; BLUMENTHAL 1985; WENNER et al. 1986; EICHHORN 1999). Der Einsatzbereich der Sonderschlepper ist auf die Bewirtschaftung von Grenzlagen oder den forstwirtschaftlichen Einsatz beschränkt. Diese Fahrzeuge besitzen aufgrund flexibler Fahrwerkstechnologien eine hohe Mobilität und Adaptionfähigkeit an verschiedene Fahrbahnen und Untergründe (PRÖLL 2004). Ungeachtet der Bauart dienen die Fahrwerke im Wesentlichen der Abstützung des Fahrzeugs gegenüber der Fahrbahn sowie der Übertragung von Triebkraft auf selbige und damit zur Überwindung der am Fahrzeug angreifenden Fahr- und Zugwiderstände (WENNER et al. 1986).

Rad- wie auch Kettentraktoren unterscheiden sich in Art und Anzahl der Fahrwerkstützpunkte gegenüber der Fahrbahn, der Schwerpunktlage sowie der Ausgestaltung von Anbau- und Kuppelmöglichkeiten. Abb. 13 gibt einen Überblick über die Systematik der einzelnen Fahrwerksvarianten.

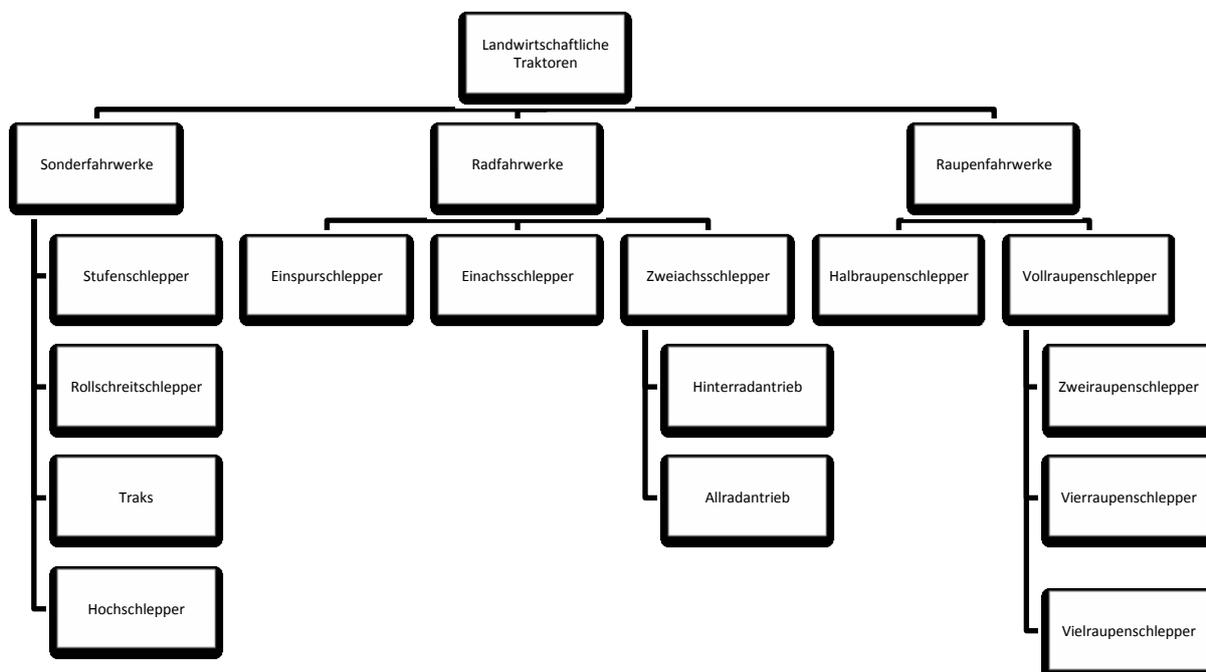


Abb. 13: Systematik der landwirtschaftlichen Fahrwerksbauarten (modifiziert nach SCHILLING 1960).

Nachfolgend werden die zur Beantwortung der Fragestellung dieser Arbeit wesentlichen Fahrwerkskonzepte hinsichtlich Konstruktion, Einsatzspektrum sowie ihrer Relevanz im landwirtschaftlichen und insbesondere weinbaulichen Produktionsbereich dargestellt.

2.3.1 Radfahrwerke

Historisch wird die Entwicklung des Rades auf den Zeitraum um das Jahr 3500 v. Chr. bestimmt. Als erstmalig dokumentierter Einsatz eines Rades in Form eines antreibenden Bauteils (Spornrad) gilt nach FISCHER (1910) ein im Jahr 1636 präsentierte Söpflug. Während der Frühphase der Traktorenkonstruktion beschränkte sich die Ausstattung der Traktoren primär auf ungefederte Eisenräder. Nach 1930 verbreitete sich zunehmend die heute übliche Standardbereifung mit Niederdruckluftreifen (RENIUS 1985) parallel zur Substitution der tierischen Zugkraft durch die fortschreitende Mechanisierung.

Das Radfahrwerk der Traktoren umfasst im Allgemeinen eine starr angeordnete Hinterachse, eine pendelnd gelagerte starre oder gefederte Vorderachse sowie Antriebswellen und die Räder nebst Radaufhängung. Überwiegend sind die Räder mit einer luftgefüllten Bereifung ausgestattet und bilden zusammen mit dieser den Reifen (SCHILLING 1960; BLUMENTHAL 1985; SCHREIBER 2009). Charakteristisch für Niederdruckluftreifen ist deren Aufbau aus Lauffläche mit Stollenprofil, Reifenflanke, Reifenkarkasse und dem Reifenwulst (Abb. 14). Lauffläche und Stollenprofil bestehen aus Vollgummi und werden durch die Karkasse als Reifenunterbau gestützt. Die Art des Profils ist abhängig vom jeweiligen Einsatzzweck des Reifens; im Bereich der Landwirtschaft überwiegt ein schräg angeordnetes Rillenprofil. Die Anordnung der Einzelstollen sowie das Flächenverhältnis zwischen Stollen und Stollenzwischenraum beeinflussen u. a. die Zugkraftübertragung, Selbstreinigung, Laufruhe und den Reifenverschleiß (BLUMENTHAL 1985).

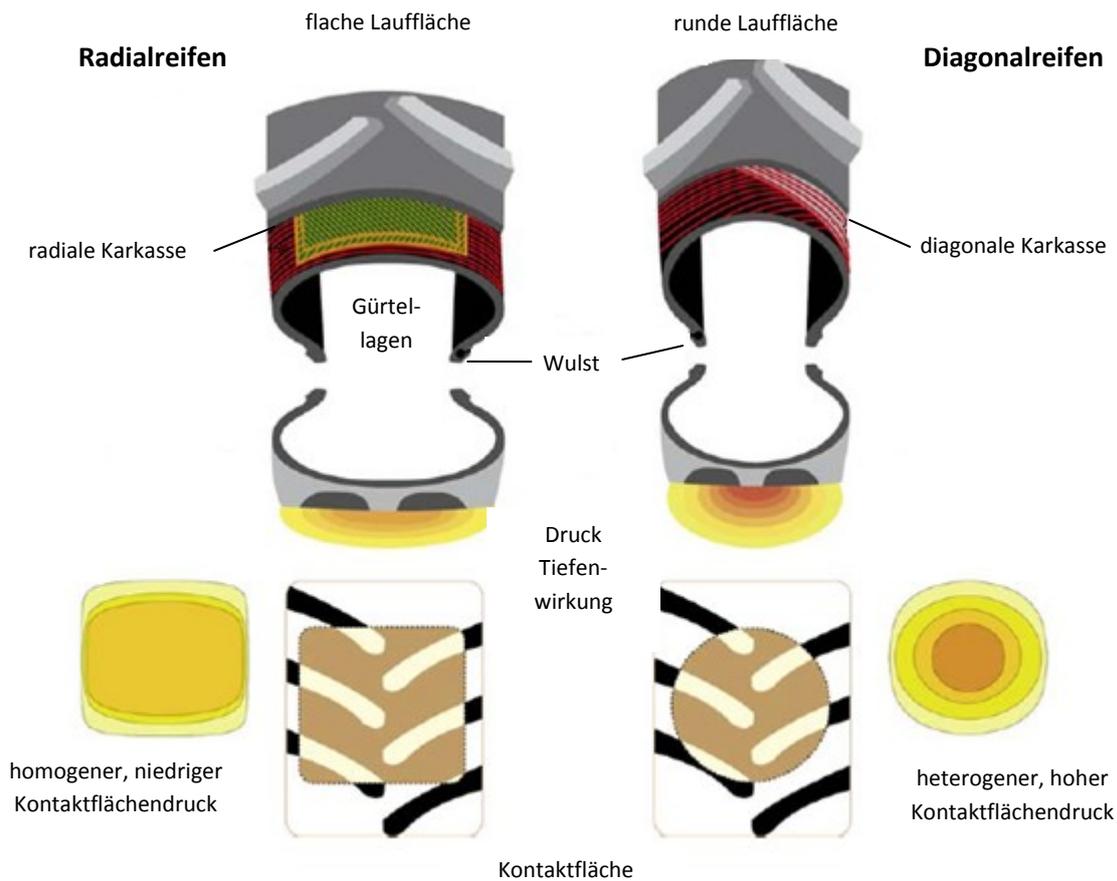


Abb. 14: Aufbau der Radial- und Diagonalreifen (modifiziert nach UPPENKAMP et al. 2009).

Zum Schutz vor Beschädigungen ist die Reifenkarkasse im Bereich der Reifenflanken durch eine zusätzliche Deckschicht aus Vollgummi versehen. Der mit Stahleinlagen verstärkte Reifenwulst dient der Fixierung des Reifens auf der Felge. Bauartbedingt werden Luftreifen in Diagonalreifen und Radialreifen unterschieden, wobei heute die Verbreitung der Radialreifen in der Landwirtschaft überwiegt. Diese weisen insbesondere bezüglich der Kontaktfläche, des Druckverteilungsprofils, des Rollwiderstands, der Zugkraftübertragung sowie der Gesamtlebensdauer Vorteile gegenüber den Diagonalreifen weicheren Reifenflanke zu berücksichtigen (BLUMENTHAL 1985; RENIUS 1985, UPPENKAMP et al. 2009; GEISCHER 2011).

Der Radialreifen zeichnet sich durch eine radial um 90 ° zur Fahrriichtung versetzte Orientierung der Cordeinlage in der Reifenkarkasse aus. Im Vergleich zur Karkasse

des Diagonalreifens hat dieser weniger Gewebereinlagen. Eine zusätzliche Verstärkung der Lauffläche wird durch Gürtellagen aus verschiedenen Materialien (Textil-, Stahl-, Synthetikfäden) erreicht. Der Verlauf der Gewebereinlage innerhalb der Gürtellagen weicht dabei von der radialen Ausrichtung des Karkassengewebes ab. Die einzelnen Gewebefäden überkreuzen sich und verleihen der Lauffläche eine hohe Stabilität und Festigkeit. Spitzer Kreuzungswinkel ($< 90^\circ$) der Gewebelagen zueinander wirken sich zusätzlich versteifend aus. Die Walkzone des Reifens als Zone der Reifeneinfederung ist auf den weicheren Flankenbereich begrenzt. Die Reifenflanken unterliegen durch die kontinuierliche Walkarbeit einer gesteigerten mechanischen Beanspruchung.

Diagonalreifen unterscheiden sich in ihrem Aufbau deutlich vom Radialreifen, insbesondere verlaufen die Gewebereinlagen in der Reifenkarkasse diagonal und überkreuzend. Hieraus resultiert analog zur Gürtellage der Radialreifen eine hohe Stabilität, welche sich auch auf die Reifenflanken erstreckt. In Abhängigkeit vom jeweiligen Einsatzbereich bzw. der angestrebten Reifentragfähigkeit variiert die Anzahl der Gewebereinlagen (Ply-Rating). Mit zunehmender Stärke der Gewebereinlage erhöht sich analog die Steifheit der Karkasse und somit deren Tragfähigkeit (HEYDE 1973; BLUMENTHAL 1985; WALG 2007a; UPPENKAMP et al. 2009; GEYRHOFER 2010).

Im forstwirtschaftlichen Bereich ist der Einsatz von Diagonalreifen aufgrund ihrer hohen mechanischen Belastbarkeit aktuell als Standard anzusehen. Weiterhin verfügen Diagonalreifen über eine gewisse Verbreitung in Einsatzbereichen, die eine hohe Seitenstabilität und Geländegängigkeit erfordern bzw. dort wo eine besondere Widerstandskraft der Reifenflanken verlangt wird (HÄNGGLI 1995; EBEL 2006). Auch im Weinbau werden Diagonalreifen in nicht unerheblichem Umfang eingesetzt. GEYRHOFER (2010) schätzt den Marktanteil der Diagonalreifen auf etwa 30 %. Ihre Vorzüge sind im Wesentlichen die günstigeren Anschaffungskosten und der Selbstreinigungseffekt des Reifenprofils. UPPENKAMP et al. (2009) führten in diesem Zusammenhang auch die positiven Eigenschaften bzgl. der Spurstabilität im Hangbereich, insbesondere bei der Befahrung von Schräghanglagen an. WEIßBACH (2003) dokumentierte eine gesteigerte Zugkraftbelastbarkeit. WEISE (2008) stellte hingegen fest, dass auch im forstwirtschaftlichen Bereich Tendenzen zu einer zukünftig verstärkten Verwendung von Radialreifen bzw. alternativen Reifenbauarten erkennbar sind. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund bodenschonender Aspekte.

Eine analoge Entwicklung zeigte REBHOLZ (2003) für die Bereifung der Weinbautraktoren auf.

2.3.2 Kettenfahrwerke

Das erste Patent zur Nutzung einer angetriebenen Kette zur Fortbewegung von Fahrzeugen datiert nach KUNZE et al. (2011) auf das Jahr 1837. Darauf aufbauend standen serienreife Konstruktionen zum Ende des 19. Jahrhunderts zur Verfügung. Systematisch werden Gleiskettenfahrwerke, Halbraupen und Gummibandlaufwerke zu den Kettenfahrwerken gezählt (OLF 1993).

Kettenfahrwerke werden regelmäßig in Anwendungsbereichen eingesetzt, die besondere Anforderungen an Standsicherheit, Gelände- und Traktionsfähigkeit stellen bzw. höchste Zugleistung erfordern und eine niedrige spezifische Bodenbelastung voraussetzen. Weiterhin kommen Kettenfahrwerke dort zur Anwendung, wo aufgrund hoher Maschinenmassen die bauartbedingte Tragfähigkeit von Radfahrwerken überschritten oder eine durch Radfahrwerke zu hohe Bodenpressung zu erwarten wäre (BLUMENTHAL 1985; KUNZE et al. 2011). Kettenfahrzeuge für den landwirtschaftlichen Einsatz werden dem aktuellen Stand der Technik entsprechend mit Gleisketten- oder Gummibandlaufwerken ausgerüstet. Unabhängig von der verwendeten Ketten- oder Bandtechnologie sind die Laufwerke in der Regel aus Trag-, Lauf- oder Stützrollen, dem Antriebsturas, dem Umlenk- oder Leitrad sowie aus Spannvorrichtungen und Laufwerkstragrahmen zusammengesetzt (KUNZE et al. 2011). Gemein ist den Kettenfahrwerken die Art der Fortbewegung im Gelände durch Abrollen über und entlang eines selbständig verlegten endlosen Gleisbettes, welches der Abstützung der Kräfte aus Traktion und Fahrzeugmasse gegenüber dem Boden dient (BLUMENTHAL 1985; HOFFMANN et al. 1994; KUNZE et al. 2011).

Die im Vergleich zu Radschleppern größere Kontaktfläche resultiert im theoretischen Modell in einem verminderten Kontaktflächendruck im Grenzbereich Fahrwerk - Boden (EICHHORN 1999). Ungleichgewichte in der Belastung der Kettenlaufwerke führen jedoch zu einer heterogenen Druckverteilung. Die konstruktive Lage des Schlepperschwerpunkts vor dem Zentrum des Fahrwerks wirkt dynamischen Lastverlagerungen und den damit einhergehenden Veränderungen der Druckverteilung entgegen (KOOLEN und KUIPERS 1983; WONG 2008).

2.3.2.1 Gleiskettenlaufwerke

Die klassische Gleiskette oder Gliederkette ist aus stählernen Einzelgliedern zusammengesetzt, welche unmittelbar oder über Verbinderelemente miteinander gekoppelt sind. Dabei können die Kettenglieder entweder Trag- und Zugelement für aufgesetzte Bodenplatten aus Stahl oder Kunststoff sein oder diese Funktion bauartbedingt unmittelbar ausüben (SCHILLING 1960; WENZLAWSKI 1999).

Konstruktiv unterschied BLUMENTHAL (1985) Reihen-, Schachtel- und Staffellaufwerke. Dabei stellt das Reihenlaufwerk das im landwirtschaftlichen Bereich übliche Konzept dar. Im niedrigen Geschwindigkeitsbereich bis zu $8,0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ kann grundsätzlich auf eine Federung der Laufwerksrollen verzichtet werden, darüber hinaus ist diese aus konstruktiven und ergonomischen Gründen jedoch unabdingbar. Mit zunehmendem Tragrollendurchmesser geht eine Verbesserung der Selbstreinigung sowie eine signifikante Verringerung der Fahrwiderstände und Verschleißerscheinungen durch die herabgesetzte Umdrehungszahl einher.

In Landwirtschaft und Weinbau unterliegen Gleiskettenfahrwerke einem zunehmenden Bedeutungsverlust. Ursachen hierfür liegen insbesondere im technischen und ergonomischen Bereich. Weiterhin ist die Beschädigung des landwirtschaftlichen Wegenetzes sowie ein erhöhter Verschleiß als nachteilig zu werten. Der Transport der Gleiskettenfahrzeuge über weitere Wegstrecken erfordert ferner ein zusätzliches Transportfahrzeug (HEYDE 1973; BLUMENTHAL 1985; BÖHME 2003; WALG 2007a).

2.3.2.2 Gummibandlaufwerke

Gummibandlaufwerke stellen konstruktive Weiterentwicklungen der Gleiskettenlaufwerke dar und bilden den derzeitigen Entwicklungsstand der Kettenfahrwerke in der Landtechnik ab. Die Substitution stählerner Gleis- und Gliederketten durch endlos gefertigte Gummigurtbänder hat im landwirtschaftlichen Bereich verschiedene Vorteile. Die Laufwerke erreichen nahezu das Triebkraftverhalten der Gleisketten sowie eine vergleichbare Kontaktflächengröße. Gleichzeitig erlaubt der Aufbau eine Gewichtsreduktion und Minderung der auf das Bodengefüge übertragenen Schwingungen (OLF 1993). Wartungsintensität und Standzeit sind als günstig zu beurteilen. Die

Flexibilität der Gummigurtbänder ermöglicht einen hohen Anpassungsgrad der Bandgeometrie an die Bodenkontur.

Die verwendeten Bänder müssen eine hohe Widerstandskraft gegenüber bodenbürtigen Beschädigungen aufweisen und in der Lage sein, hohe Antriebs- und Bremsmomente aufzunehmen. Die erforderliche Stabilität wird durch einen mehrlagigen Aufbau erreicht (Abb. 15). Eine profilierte Deckschicht mit ausgeprägten Profil- und Führungsstollen umschließt dabei eine zugfeste Armierung aus Stahlkord, Stahlseilen oder Polyamidgewebe (DERDACK 1989).

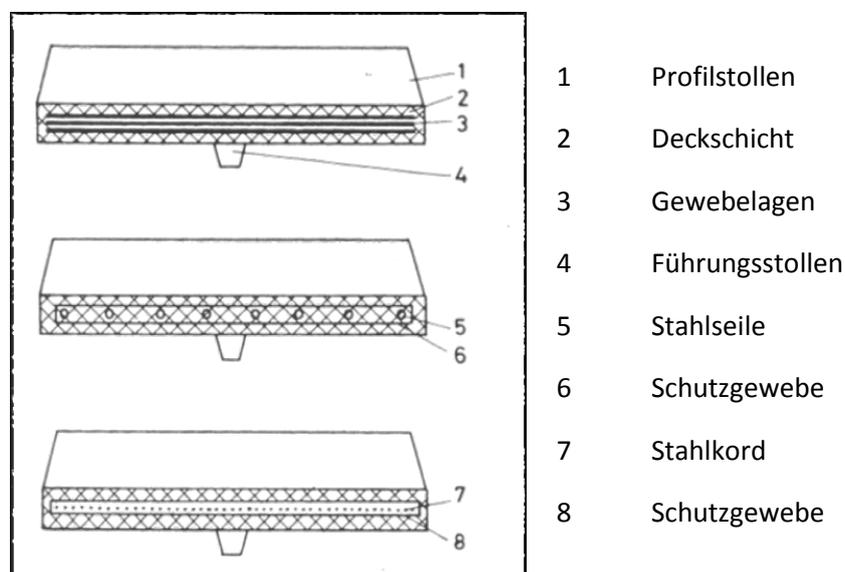


Abb. 15: Schematischer Aufbau eines Gummigurtbands (DERDACK 1989).

Für Gummibandlaufwerke sind zwei unterschiedliche Arten der Kraftübertragung zwischen Antriebselement und Gurtband von Bedeutung. Der formschlüssige Antrieb überträgt Kräfte und Momente durch formschlüssigen Einriff eines segmentierten Antriebstruras in entsprechende Stollen oder Aussparungen des Gurtbands. Eine definierte Vorspannung dient der Stabilisierung der Bandführung, der Minderung von Abnutzungsprozessen und verhindert ein Überspringen der kraftleitenden Bauteile beim Übertragen hoher Kräfte. Beim kraftschlüssigen Antrieb hingegen erfolgt die Kraftübertragung ausschließlich durch die Haftreibung zwischen Gurtband und Antriebsrolle. Die Führungsstollen des Bands dienen nur der Bandführung auf den

Laufwerksrollen. Die übertragbare Antriebskraft wird demzufolge durch die konstruktiv bedingte Haftreibungskraft begrenzt. Eine ausreichende Kraftübertragung setzt eine hohe fertigungsbedingte innere Vorspannung des Gurtbands sowie zusätzliche Spannvorrichtungen am Laufwerk voraus. Abb. 16 stellt beide Konstruktionsvarianten am Beispiel eines Fahrwerks für landwirtschaftliche Erntemaschinen gegenüber.



Abb. 16: Bandlaufwerke mit formschlüssigem (links) und kraftschlüssigem (rechts) Antrieb (CLAAS 2014).

Die spezifische Profilierung der Gurtbänder zeigt nach OLF (1993) deutliche Auswirkungen auf das Zugkraftverhalten und die allgemeinen Fahreigenschaften. Eine Vergrößerung der Stollen resultiert einerseits in einer Erhöhung des Triebkraftkoeffizienten, andererseits in einer Verminderung der Laufruhe durch Zunahme der Fahrwerksvibrationen. Bandlaufwerke zeigen eine allgemein gute Spurstabilität bei gleichzeitig gegenüber Radfahrwerken ungünstigerem Lenkverhalten. Eine exponierte Anordnung der Laufwerksstützrollen unterhalb des Niveaus der Umlenkrollen verbessert das Lenk- und Kurvenverhalten, verkleinert jedoch die Kontaktfläche zur Lastabstützung bzw. bewirkt in selbiger eine ungleichmäßige Druckverteilung. Die Minderung von Pflanzen-, Boden- und Laufwerksschäden durch auftretende Schervorgänge steht somit im Widerspruch zu einer homogenen Lastabstützung. Systeme zur kontrollierten Verteilung der Einzelrollenstützlasten gewährleisten eine gleichmäßige Bodenbelastung. Weiterhin können Einzelrollen zur Erleichterung der Kurvenfahrt von der Fahrbahn abgehoben werden (GESCHEIDER und RAINER 2008). Eine federnd gelagerte Aufhängung von Antriebs- und Stützrollen erlaubt Fahrgeschwindigkeiten bis zu $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (CARRARO 2012); wohingegen Spezialfahrzeuge zur Me-

chanisierung von Weinbausteillagen oftmals noch für einen niedrigeren Geschwindigkeitsbereich bis $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ausgelegt sind.

Diverse Landtechnikhersteller bieten Kettenlaufwerke zur Um- und Nachrüstung konventioneller Radtraktoren und Arbeitsmaschinen an. Es handelt sich hierbei um bauartbedingt kompakte Laufwerke mit formschlüssigen Bandantrieben (u. a. Soucy, Zuidberg, Harain, Combitrac, Tidue). Konstruktiv erfolgt die Lastabstützung hauptsächlich über pendelnd oder starr angeordnete Stützrollen des Laufwerks. Für den Weinbau stehen inzwischen verschiedene Varianten als Erst- und Nachrüstlösung zur Verfügung. Die aktuell angebotenen Nachrüstsätze für Radschlepper sind auf formschlüssig-kraftübertragende Gummibandlaufwerke begrenzt. Kraftschlüssige Laufwerke haben im Weinbau derzeit keine Bedeutung.

Die Grundüberlegung zur Ertüchtigung vorhandener Radtraktoren durch die Montage von Anbauhraupen kann bis in die Anfangsjahre der landwirtschaftlichen Mechanisierung zurückverfolgt werden. Exemplarisch zeigt Abb. 17 technische Entwicklungen, die das damalige landtechnische Institut Potsdam-Bornim auf ihre Praxiseignung hin prüfte.

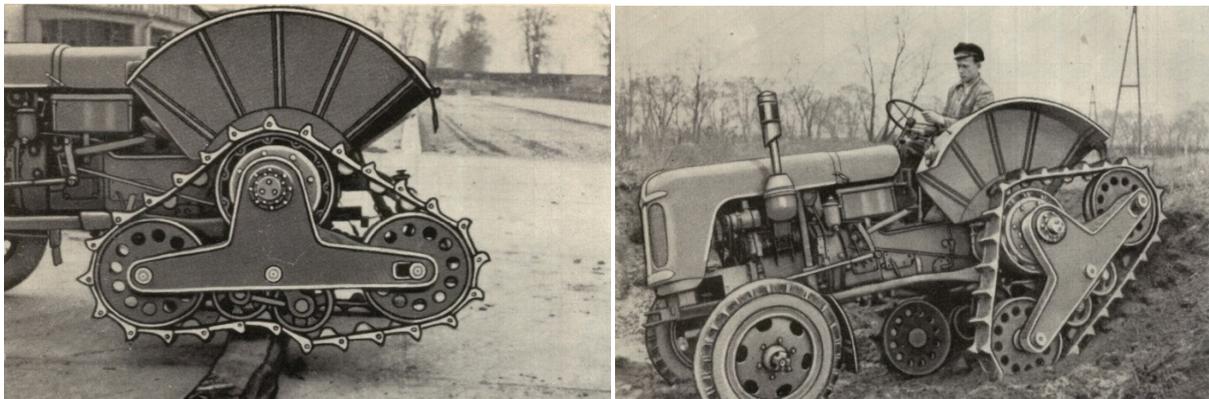


Abb. 17: Anbauhalbraupe für den Pflegeschlepper RS14/30 „Favorit“ (INSTITUT FÜR LANDTECHNIK POTSDAM-BORNIM 1957).

2.4 Fahrmechanik

Die Fahrmechanik beschreibt die Zusammenhänge der auftretenden Kräfte und Bewegungen an einem Fahrzeug sowie deren räumliche und zeitliche Beziehung zuei-

inander. Die Fahrmechanik berücksichtigt somit gleichermaßen die Belange der Dynamik und Kinematik als Teilgebiete der klassischen Mechanik (BREUER und KOPP 2012). Das folgende Kapitel fasst die Erkenntnisse zum Verhalten der Rad- und Bandlaufwerke zusammen.

2.4.1 Triebkraftkoeffizient

Die am Reifen bzw. an der Antriebskette erreichbare Triebkraft ist auf die Kräfteverhältnisse am Fahrwerk zurückzuführen. Die Größe der auf den Boden übertragbaren Triebkraft kann anhand des Triebkraftkoeffizienten abgeschätzt werden. Dieser drückt als dimensionsloser Proportionalitätsfaktor das Verhältnis von maximaler Triebkraft [kN] zu spezifischer Fahrwerkslast [kN] aus (SCHILLING 1960; WENNER et al. 1986; KUTZBACH 1995). WEISE (2007) unterschied einen Brutto- und Nettotriebkraftkoeffizienten. Während der Nettowert die für Vortrieb, als Zugkraft und zur Überwindung von äußeren Kräften zur Verfügung stehende Triebkraft definiert, schließt der Bruttowert auch die Kraftanteile zur Überwindung fahrzeugimmanenter Widerstände mit ein.

Der Triebkraftkoeffizient ist als Kenngröße in der landwirtschaftlichen Fahrzeugkonstruktion weit verbreitet; häufig wird auch der Terminus Kraftschlusskoeffizient verwendet. Die Bestimmung des Koeffizienten erfolgt in der Regel experimentell. Das Triebkraftverhalten wird maßgeblich durch die Beschaffenheit der Fahrbahn beeinflusst, wobei befestigte und tragfähige Untergründe höhere Triebkraftkoeffizienten zur Folge haben (Abb. 18). Im Gegensatz zur überwiegend haftreibungsabhängigen Zugkraftübertragung der Straßenfahrzeuge wird beim landwirtschaftlichen Fahrzeug die ideelle tangentielle Radumfangskraft im Wesentlichen durch Schubspannungen des Bodens aufgenommen. Die durch Kohäsions- und innere Reibungskräfte bestimmte Belastbarkeit des Bodengefüges bis zum Erreichen der Abschergrenze ist somit maßgeblich an der Triebkraftentwicklung beteiligt (SCHILLING 1960).

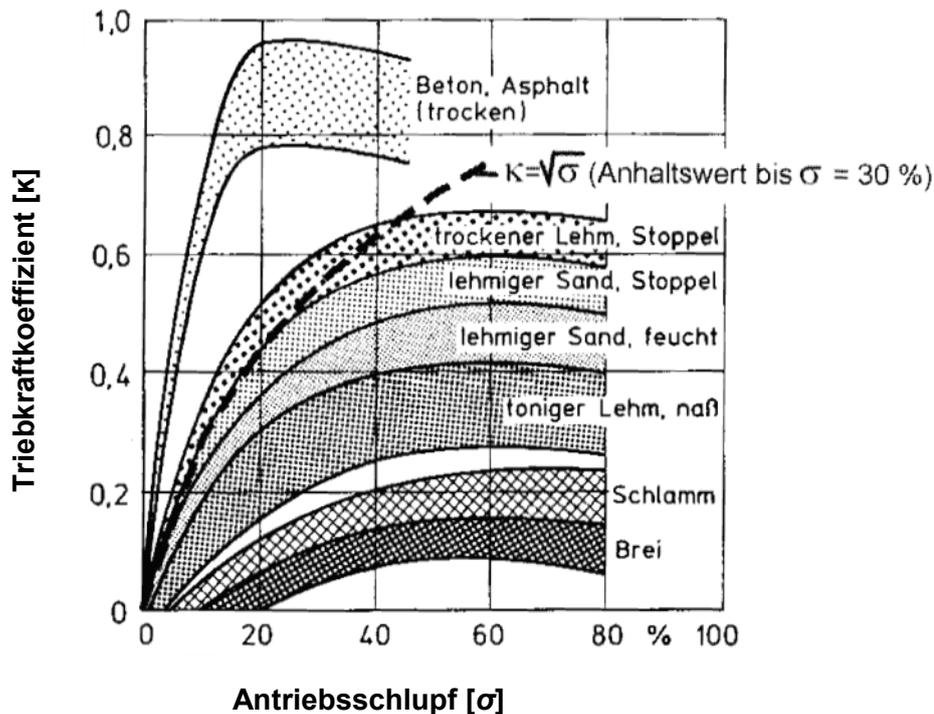


Abb. 18: Abhängigkeit des Triebkraftkoeffizienten bei Radfahrwerken für verschiedene Fahrbahnbeschaffenheiten (modifiziert nach KUTZBACH 1995).

Mit zunehmendem Antriebsschlupf nimmt der Triebkraftkoeffizient (κ) zunächst zu, um mit wachsender Gleitbewegung (σ) wieder abzufallen. Für den Bereich bis 30 % Antriebsschlupf kann der Triebkraftkoeffizient über den Zusammenhang $\kappa = \sqrt{\sigma}$ abgeschätzt werden. Ketten- und Bandfahrwerke erreichen höhere Triebkraftkoeffizienten. Diese liegen auf weichen Böden um 0,5 und bei festen griffigen Böden um 1,0 (KUTZBACH 1995). Unter Berücksichtigung des Kausalzusammenhangs zwischen Triebkraftkoeffizient und Antriebsschlupf kann die erreichbare Triebkraft a) durch die Erhöhung der Fahrwerkslast und b) durch die Modifikation der Fahrwerkstechnik gesteigert werden (WENNER et al. 1986).

Allradgetriebene Radschlepper zeigen eine Steigerung der maximalen Triebkraft gegenüber hinterradgetriebenen Fahrzeugen. Dabei ist die Triebkraftsteigerung weniger auf die zusätzliche Ausnutzung der Vorderachslast als auf den verbesserten Wirkungsgrad der Kraftübertragung zurückzuführen. Insbesondere auf ungünstigen Fahrbahnen resultiert das spurtreue Fahren der Hinterachse in der vorverdichteten Fahrspur der Vorderachse in einem verminderten Rollwiderstand und einem höheren Triebkraftkoeffizienten. Dieser Effekt wird in der Literatur als Multipass-Effekt bezeichnet.

Nachfolgende Tabelle (Tab. 2) fasst veröffentlichte Werte für fahrwerksspezifische Triebkraftkoeffizienten zusammen.

Tab. 2: Sammlung spezifischer Triebkraftkoeffizienten landwirtschaftlicher Rad- und Kettenfahrwerke (SCHILLING 1960; KOOLEN und KUIPERS 1983; BLUMENTHAL 1985; MERHOF und HACKBARTH 1985; RENIUS 1985; WONG 2008).

Fahrbahnbeschaffenheit	Rad	Kette/Band
Sandweg		0,6 - 0,7
trockener Grasboden		1,0 - 1,1
gepflügter Ackerboden		0,6 - 0,8
Beton/Asphalt	0,6	0,6 - 1,0
trockener Ackerboden	0,45 - 0,6	0,8
nasser Ackerboden	0,2	

2.4.2 Rollwiderstandskoeffizient

Der Rollwiderstand entspricht der beim Abrollen eines Rades oder sonstigen Wälzkörpers entstehenden Kraft. Ihre Wirkrichtung ist der ursprünglichen Bewegung entgegengerichtet und hinsichtlich ihres Betrags annähernd proportional zur Normalkraft des rollenden Körpers. Der Rollwiderstandskoeffizient ermöglicht eine dimensionslose Quantifizierung der fahrzeugspezifischen Rollwiderstände. Er ist definiert als Quotient aus Rollwiderstandskraft [kN] und Normalkraft [kN] des Fahrzeugs.

Der Rollwiderstand ist im Wesentlichen auf Energieverluste durch die kontinuierliche Verformung des rollenden Körpers und Umwandlung von mechanischer in thermische Energie zurückzuführen (LEISTER 2008). Darüber hinaus beeinflussen Lagerwiderstände, Materialeigenschaften sowie Form und Radius des rollenden Körpers den spezifischen Rollwiderstand. Auf fester Fahrbahn wird der Rollwiderstandskoeffizient maßgeblich durch den Reifeninnendruck und die Reifenbauart determiniert (KRUTIKOV et al. 1955; EICHHORN 1999). Ein hoher Druck resultiert in einer Verminderung der Walkarbeit des Reifens und damit der Reibungsverluste in der Kontaktfläche. Aus Gründen des Bodenschutzes ist das Befahren nachgiebiger Ackerböden mit hohen Reifeninnendrücken zu vermeiden. Auf diesen Standorten führt ein abge-

senkter Reifendruck zu einer optimierten Anpassung des Reifenlatsches an die Bodengeometrie und einer generellen Vergrößerung der Kontaktfläche. Die Radpassage verursacht eine verminderte Bodendeformation und geringere Ausbildung von Fahrspursetzungen. Die damit einhergehende Verringerung der Einsinktiefe des Rades bzw. Antriebsbands führt weiterhin zu einer Reduktion des Rollwiderstands.

Der Rollwiderstand ist die bedeutendste Größe der am Fahrzeug auftretenden Fahrwiderstände (SCHILLING 1960; BLUMENTHAL 1985). Der Gesamrollwiderstand kann nach REMPFER und SCHWANGHART (1995) im Hinblick auf dessen Entstehung in Einzelkomponenten zerlegt werden. Insbesondere können die auf Bodenverdichtungsarbeit, Reifenhysterese und Bulldozing-Effekt (Aufschieben eines Erdkeils vor dem Reifen in Fahrtrichtung) entfallenden Anteile voneinander abgegrenzt werden. Die Verwendung von Reifen großen Durchmessers (insbesondere bei starren Rädern) wirkt sich günstig auf die auftretenden Rollwiderstände aus. Luftgefüllte Reifen mit niedrigem Innendruck weisen durch eine lastbedingte Abplattung in der Kontaktfläche lokal größere Durchmesser auf. Diese können somit grundsätzlich kleiner bemessen werden (Abb. 19). Der Rollwiderstandskoeffizient unterliegt darüber hinaus einem direkten Bezug zur jeweiligen Fahrbahnbeschaffenheit. Grundsätzlich bedingen unebene und wenig tragfähige Untergründe höhere Rollwiderstände.

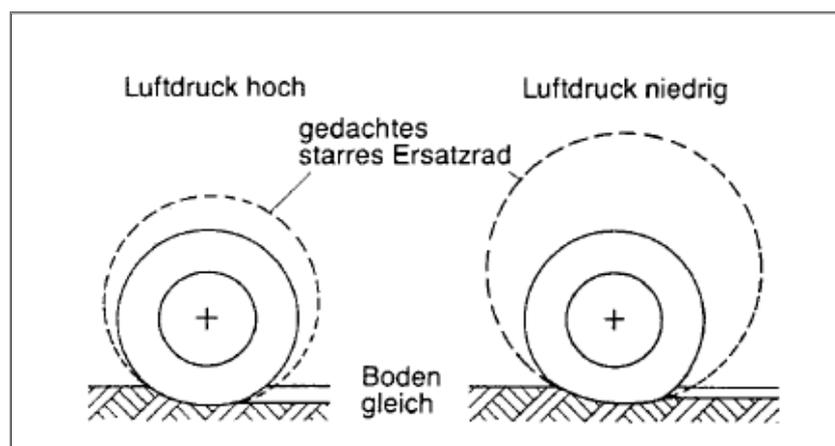


Abb. 19: Einsinkverhalten und Kontaktflächenausbildung beim luftgefüllten Reifen unter variierenden Fülldrücken (RENIUS 1985).

Als Gesamttrollwiderstand eines Kettenfahrzeugs wird analog zum Radfahrzeug die Summe der in der Ebene angreifenden Fahrwiderstände innerer und äußerer Art bezeichnet. Beide haben ihren Ursprung im Laufwerk und in den Ketten und sind auf Reibung und/oder Verformung zurückzuführen.

Im Einzelnen werden nach SCHLÖR (1959) sowie MERHOF und HACKBARTH (1985) die folgenden inneren Widerstände unterschieden:

- Triebradreibung zwischen Band/Kette und Verzahnung des Antriebstrags
- Spurradreibung zwischen den Bandführungsteilen und den Stütz-, Umlenk- und Antriebsrollen
- innerer Rollwiderstand beim Überrollen des abgelegten Bands mit Stütz-, Umlenk- und Antriebsrollen (Summe aus Lagerreibung und bewegungsabhängigen Widerständen)
- Gelenkreibung zwischen einzelnen Kettengliedern (nur bei Gleisketten)
- Stoßwiderstand beim Überrollen der Kettengelenke durch Stütz-, Umlenk- und Antriebsrollen (nur bei Gleisketten).

Die äußeren Fahrwiderstände wirken ebenfalls der Vortriebskraft entgegen und erfordern zu ihrer Überwindung eine spezifische Kettengriffigkeit. Zu den äußeren Fahrwiderständen zählen:

- der Bugwiderstand durch Einsinken des Fahrzeugs beim Befahren plastischer Fahrbahnen
- der Steigungswiderstand
- der Luftwiderstand (bei Geschwindigkeiten $\leq 30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ zu vernachlässigen)
- der Anhängewiderstand (extern bereitgestellte Zugkraft)
- der Beschleunigungswiderstand.

KOOLEN und KUIPERS (1983) stellten fest, dass Raupenfahrwerke auf fester Fahrbahn Rollwiderstandskoeffizienten um 0,02 erreichen. Damit weisen diese ein mit Radfahrzeugen vergleichbares Niveau auf. Der Rollwiderstand der Raupenfahrzeuge vermindert sich mit zunehmender Länge der Raupenaufstandsfläche. Demgegenüber wächst er mit steigender Fahrzeugmasse, verstärkter Oszillation in der Kontakt-

fläche und mit zunehmender Entfernung des Wirkungspunkts der Bodenkraft vom Zentrum der Kontaktfläche. Hingegen wiesen OKELLO et al. (1994) für Traktoren mit nachgerüsteten Bandlaufwerken höhere Rollwiderstände gegenüber Radtraktoren vergleichbarer Größe nach. Sie begründeten dies mit erhöhten fahrwerksimmanenten Widerständen.

Voraussetzung für eine Einordnung der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Weinbautraktoren war eine Recherche gängiger Angaben zum Rollwiderstandsverhalten landwirtschaftlicher Fahrwerke auf verschiedenen Untergründen. Nachfolgend sind die Ergebnisse in tabellarischer Form zusammenfassend dargestellt (Tab. 3).

Tab. 3: Sammlung spezifischer Rollwiderstandskoeffizienten landwirtschaftlicher Rad- und Bandfahrwerke (SCHILLING 1960; KOOLEN und KUIPERS 1983; BLUMENTHAL 1985; MERHOF und HACKBARTH 1985; RENUIS 1985; WONG 2008).

Fahrbahnbeschaffenheit	Rad	Kette/Band
Sandweg	0,04 - 0,24	0,1 - 0,2
Grasnarbe	0,06 - 0,16	-
gefrorener Acker (gepflügt)	0,04 - 0,12	0,05 - 0,08
Beton/Asphalt	0,02 - 0,06	0,02 - 0,08
Sandboden	0,08 - 0,4	0,1 - 0,15
Lehmboden	0,05 - 0,12	0,07 - 0,1
Tonboden	0,03 - 0,08	0,05 - 0,07
Stoppelacker	0,06 - 0,10	

2.4.3 Kräfte am Rad

Abhängig von der Art der verrichteten Arbeit werden die Räder der Zug- und Landmaschinen in Triebräder und getriebene (gezogene) Räder unterschieden. Dabei gilt definitionsgemäß, dass Triebräder aufgrund der Einwirkung eines inneren, durch Motor und Getriebe bereitgestellten Drehmoments rollen. Die Übertragung der Antriebskraft erfolgt über die Triebachse und den starren Radteil in die Kontaktfläche zwischen Rad und Boden. Hingegen werden getriebene Räder von äußeren Kräften angetrieben, welche als Zug-, Druck- und Schubkräfte auftreten. Leerlaufräder sind da-

bei ausschließlich zum Rollen bestimmt, wohingegen Arbeitsräder zusätzlich ein Drehmoment zum Antrieb von Maschinen bereitstellen (BLUMENTHAL 1985; KRUTIKOV et al. 1955).

Das gezogene, leerlaufende Rad dient in der Regel ausschließlich der Lastabstützung. Zusätzlich sind jedoch Rollwiderstand und auftretende Lagerwiderstände durch eine von außen angreifende Zugkraft zu überwinden. Dabei stehen Gewichtskraft F_G und erforderliche Zugkraft F_R im Gleichgewicht mit der Bodenreaktionskraft F_{Boden} , deren Wirkrichtung zum Achsmittelpunkt ausgerichtet ist (Abb. 20 a).

Im Gegensatz zu den getriebenen Rädern erfolgt beim angetriebenen Rad die Einleitung eines Drehmoments M , welches am Rad eine entsprechende Triebkraft erzeugt. Die effektiv nutzbare Triebkraft vermindert sich um den Betrag der für die Überwindung der Fahrwiderstände benötigten Zugkraft. Für ein angetriebenes Rad, welches in gleichmäßiger und freier Überfahrt ohne Beeinflussung äußerer Kräfte rollt, stellt sich analog zum gezogenen Rad ein Gleichgewicht zwischen Antriebsmoment und Bodenreaktionskraft ein (Abb. 20 b). Aufgrund der zu überwindenden Rollwiderstände ist die Bodenreaktionskraft um den Betrag des Rollwiderstands (Hebelarm der Rollreibung) verschoben. Für das ziehende Rad weicht die korrespondierende Bodenreaktionskraft hinsichtlich ihrer Wirkrichtung deutlich von den zuvor beschriebenen Fahrzuständen ab. Die neue Wirkrichtung ist Folge eines sich einstellenden Gleichgewichts zwischen Zugkraft F_T und Gewichtskraft F_G (Abb. 20 c). Der Zustand des stillstehenden Rades wird als statisch bezeichnet. Dabei wird ausschließlich die Radlast auf den Boden abgestützt. Der Gewichtskraft wirkt die im Gleichgewicht stehende Reaktionskraft des Bodens entgegen (o. Abb.; BOLLING 1984; RENIUS 1985; STEINKAMPF und SOMMER 1989; WONG 2008).

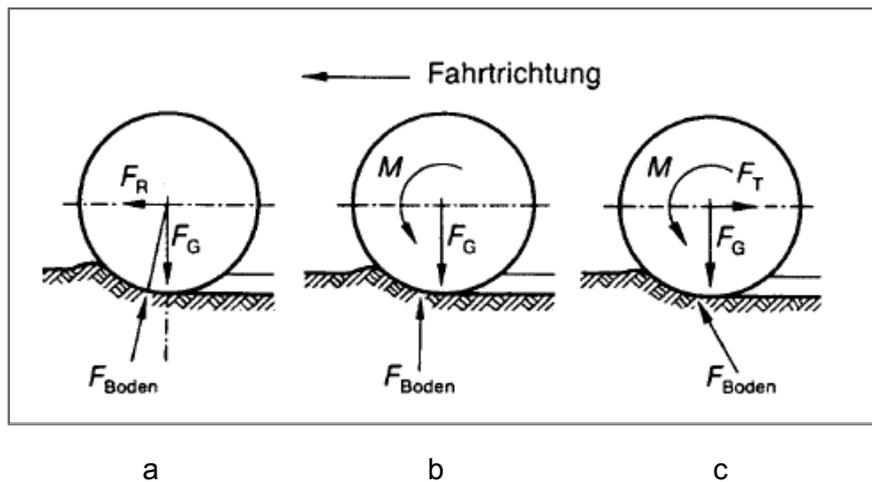


Abb. 20: Die Kraftwirkungen am Reifen unter verschiedenen Praxisbedingungen: a) getriebenes Rad, b) angetriebenes Rad ohne Zugkraft, c) ziehendes Rad mit angreifender Zugkraft. F_{Boden} : Bodenstützkraft, F_G : Radlast, F_R : Rollwiderstand, F_T : Zugkraft, M Antriebsmoment (modifiziert nach RENIUS 1985).

Der u. a. von KRUTIKOV et al. (1955), SCHILLING (1960) und RENIUS (1985) beschriebene Fahrzustand eines getriebenen Arbeitsrades, dem ein Drehmoment zum Antrieb von Maschinen abgenommen wird, ist dem Zustand eines abgebremsten Rades gleichzusetzen. Das abgenommene Drehmoment wirkt zusammen mit der benötigten Zugkraft zur Rollwiderstandsüberwindung verzögernd auf das getriebene Rad. Die Wirklinie der Bodenreaktionskraft verläuft steiler als beim leerlaufenden Rad, die Wirkrichtung weicht vom Achsmittelpunkt ab.

2.4.4 Kräfte am Kettenfahrwerk

Grundsätzlich wirken bei den Kettenlaufwerken vergleichbare Kräfte wie bei den Radfahrwerken. Der Kraftfluss zwischen Verbrennungsmotor und Kettenantrieb ist in Abb. 21 schematisch dargestellt.

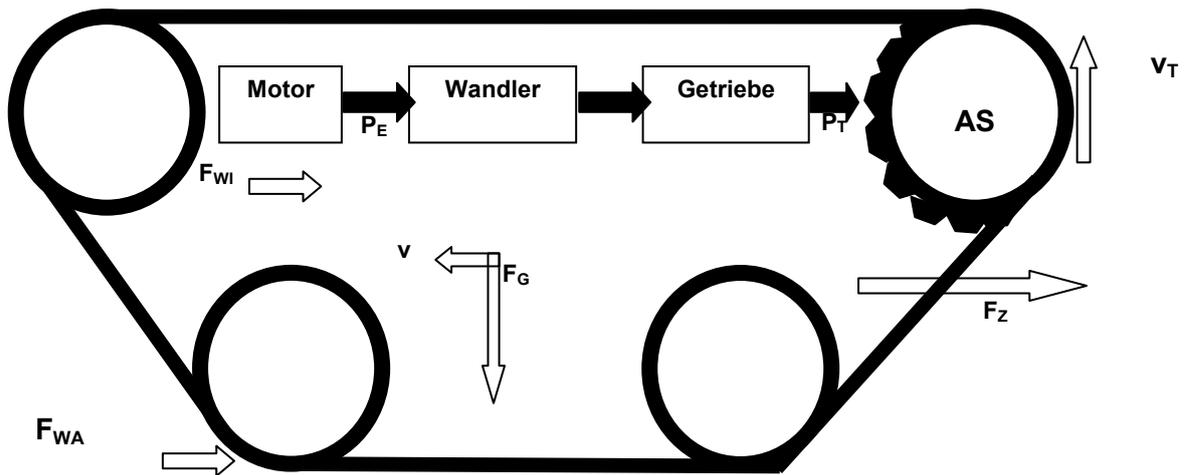


Abb. 21: Schema des Kraftflusses beim Kettenfahrzeug. Ausgehend von der Motorleistung P_E steht wirkungsgradabhängig eine Antriebsleistung P_T am Antriebssturas AS zur Verfügung. Hier stellt sich eine Umfangsgeschwindigkeit v_T ein. Nach Überwindung der inneren und äußeren Fahrwiderstände F_{WI} und F_{WA} verbleibt der nutzbare Zugkraftanteil F_Z . Die effektive Vorfahrtgeschwindigkeit über Grund entspricht v , die Fahrzeuggewichtskraft F_G mit Angriffspunkt am Masseschwerpunkt (modifiziert nach MERHOF und HACKBARTH 1985).

Dabei gilt, dass ausgehend von der Motorleistung P_E unter Berücksichtigung des Triebwerkswirkungsgrades η_T die Antriebsleistung P_T am Antriebssturas AS zur Verfügung steht. Die Antriebsleistung resultiert dabei aus Triebbradzugkraft F_{ZT} und Triebbradumfangsgeschwindigkeit v_T . Für die Überwindung der äußeren Fahrwiderstände F_{WA} steht die verbleibende Zugkraft F_Z zur Verfügung, wobei deren Übertragung auf den Boden eine ausreichende Griffigkeit der Kette erfordert. Die Kettengriffigkeit ist in diesem Zusammenhang als technischer Terminus dem Triebkraftkoeffizienten der Radfahrzeuge gleichzusetzen (MERHOF und HACKBARTH 1985).

Die Einleitung eines Antriebsmoments M in die Antriebskette bzw. das Antriebsband führt dort zur Entstehung einer Zugkraft F_Z , welche in eine innere und äußere Kettenzugkraft zerlegt werden kann (SCHLÖR 1959; KOOLEN und KUIPERS 1983). Die innere Kettenzugkraft F_{Zki} umfasst alle in der Kette wirkenden Kräfte, wohingegen der äußeren Kettenzugkraft ausschließlich die Kräfte zur Überwindung externer Fahrwiderstände zugerechnet werden. Unter Berücksichtigung der Kettenzugkraftverteilung sind heckgetriebene Kettenfahrzeuge den frontgetriebenen häufig fahrtechnisch überlegen. Während beim Frontantrieb große Kettenanteile einer permanenten Zugkraft ausgesetzt sind, beschränkt sich der zugbeanspruchte Kettenanteil bei heckgetriebenen Fahrzeugen auf den Bereich unterhalb der Laufrollen bis zum Einlauf in

den Antriebstrans. Die übrigen Kettenbereiche sind bis auf die kettenimmanente Vorspannung und angreifende Gewichtskräfte unbelastet (T_0) (Abb. 22).

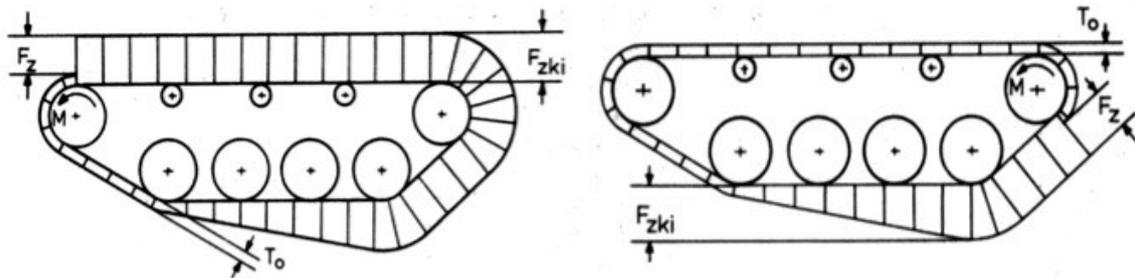


Abb. 22: Verteilung der Zugkraft in Antriebskette bzw. Antriebsband. Links Laufwerk mit Frontantrieb, rechts Laufwerk mit Heckantrieb. M entspricht dem eingeleiteten Antriebsmoment. Die innere Kettenzugkraft entspricht F_{zki} und setzt sich zusammen aus der äußeren Kettenzugkraft F_Z und der Kettenvorspannung T_0 (MERHOF und HACKBARTH 1985).

Für eine sichere Kraftübertragung auf den Boden sind bei der Auslegung des Kettenlaufwerks die Tragfähigkeit des Bodens sowie dessen Potenzial zur Abstützung auftretender Horizontalkräfte zu berücksichtigen. Beide Faktoren resultieren in spezifischen Anforderungen an Aufstandsfläche und Griffigkeit. Die Griffigkeit leitet sich aus einer Reibungs- und Scherkomponente ab und wird insbesondere durch die Materialeigenschaften der Fahrbahn, dem Verhältnis von Kettenlänge und Kettenbreite, der Kettenbauart sowie von Fahrgeschwindigkeit und Antriebsschlupf beeinflusst. Die aus der Einleitung von Horizontalkräften in den Boden resultierende Gleitbewegung unter der Kettensohle beschrieb RANKINE (1956) in dem von ihm entwickelten Modell.

Unterschiede zum Radfahrwerk bestehen hinsichtlich Größe und Gestalt der Kontaktfläche als Ort der Kraftübertragung auf den Boden. Diese kann nicht als gleichförmig angesehen werden, insbesondere kommt es zur Ausbildung eines wellenförmigen Kontaktbereichs. Dabei sind die Laufwerksrollen in den Wellentälern lokalisiert; mit zunehmendem Rollenabstand, abnehmendem Rollendurchmesser und verringerter Ketten-/Bandspannung intensiviert sich der wellenförmige Verlauf des Antriebsbands. Im dynamischen Fahrzustand sind neben den vertikal gerichteten Gewichtskräften zusätzlich horizontal angreifende Kräfte aus internen und äußeren Fahrwiderständen einzubeziehen. Weiterhin führen Lageänderungen des Fahrzeugs

zu einer nicht länger rechtwinkligen Wirkrichtung der Gewichtskräfte zur Kettenaufstandsfläche. Bei Annahme der Raupenkette als starres System folgt die Spannungsverteilung beim heckgetriebenen Raupenfahrzeug einer trapezoiden Verteilung mit Maximum unter dem Fahrzeugheck (MERHOF und HACKBARTH 1985; DÖRFLER 1995).

Die Kraftübertragung bedingt analog zu den Radfahrwerken ein Schlüpfen des Bands und führt in Verbindung mit einer Bodensetzung zur Einstellung eines spezifischen Neigungswinkels α des Fahrzeugs um dessen Querachse (Nicken). Die Wirklinien der Fahrzeuggewichtskraft W , Zugkraft P und Bodenreaktionskraft R verlaufen durch den gemeinsamen Punkt b , welcher unterhalb des Masseschwerpunkts a liegt. Punkt c entspricht dem Punkt der Kräfteinleitung in den Boden und ist hinsichtlich der räumlichen Anordnung abhängig von Angriffspunkt und Betrag der äußeren Zugkraft sowie der Lage des Masseschwerpunkts (Abb. 23).

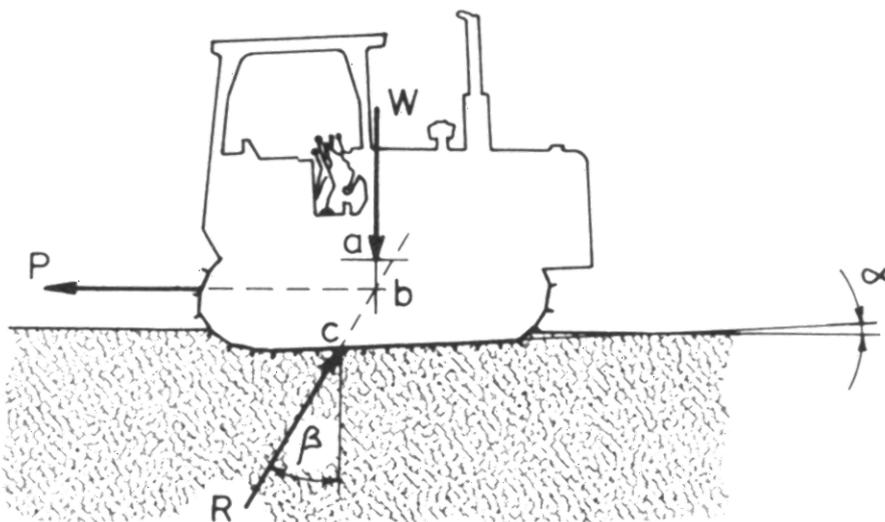


Abb. 23: Kräfteverhältnisse am ziehenden Raupenfahrzeug. W entspricht der Fahrzeuggewichtskraft, P der bereitgestellten Zugkraft und R der im Winkel β wirkenden Bodenreaktionskraft. W , P und R verlaufen durch den gemeinsamen Punkt b unterhalb der Masseschwerpunkts a . Punkt c entspricht dem gedachten Punkt der Kräfteinleitung in den Boden. Unter Zugbelastung stellt sich ein Neigungswinkel α ein (KOOLEN und KUIPERS 1983).

Im Unterschied zu den Radfahrwerken existiert kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Antriebsmoment und Bodenreaktionskraft. Bezüglich der Kräfteverhältnisse

ist festzustellen, dass die vertikale Komponente von R im Gleichgewicht mit W steht sowie die horizontale Komponente von R im Gleichgewicht mit P (KOOLEN und KUIPERS 1983).

Zur Definition des Kräftegleichgewichts am stehenden Raupenfahrzeug sowie der resultierenden Bodenpressung kann der aus den Bauwissenschaften entlehnte fundamentstatische Ansatz herangezogen werden. Für Raupenfahrwerke hat DÖRF-
LER (1995) die Bodenpressung und Spannungsverteilung in Abhängigkeit zur Fahrwerkslast und Lastexzentrizität ausführlich dargestellt.

2.4.5 Weinbauspezifische Aspekte

Die für die allgemeine Landtechnik formulierten Zusammenhänge bezüglich Fahrwerkskonzeption und Fahrmechanik gelten sinngemäß auch für den Weinbau. Darüber hinaus werden nachfolgend im Einzelfall abweichende Betrachtungsweisen oder differenzierte Anforderungen zusammengefasst.

2.4.5.1 Bereifung

Die Grundanforderungen einer zweckentsprechenden Bereifung der Weinbautrakto-
ren definieren sich weitestgehend analog zur Flächenlandwirtschaft. Im Wesentlichen werden eine hohe Tragfähigkeit, eine große Kontaktfläche, eine geringe Druckbean-
spruchung des Bodens sowie eine hohe und effiziente Zugkraftübertragung gefordert (WALG 2007a; UPPENKAMP et al. 2009).

Der spezifischen Kontaktfläche zwischen Rad und Fahrbahn kommt hierbei eine be-
sondere Bedeutung zu. Im Weinbau wird diese technisch durch den Einsatz breiter
Reifen bzw. Zwillings- oder Doppelreifen in Verbindung mit niedrigen Reifenfülldrü-
cken erreicht (BLUMENTHAL 1985; STEINMETZ 1985; DIETRICH 1995; BÖHME 2003).
REBHOLZ (2003) wies auf eine im Weinbau tendenziell gegebene Unterdimensionie-
rung der praxisüblichen Hinterachsberiefung von Schmalspurtraktoren hin. Im Rah-
men einer Praxisbefragung kam er zu dem Ergebnis, dass ein Drittel der Traktoren
mit einer im Hinblick auf die Minimierung der Bodendruckbelastung zu schmal di-
mensionierten Bereifung ausgestattet sind. Lediglich weniger als 10 % der Traktoren
verfügten über eine im besonderen Maße bodenschonende Bereifung mit einer Brei-
te von mehr als 16 Zoll [406 mm]. Grundlage der Erhebung war eine Befragung von

252 Weinbaubetrieben in den Jahren 2000 und 2001 im rheinland-pfälzischen Anbauggebiet Pfalz.

Als begrenzender Faktor im Hinblick auf die größtmögliche Reifendimensionierung im Weinbau zeichnet sich die Breite der Fahrgasse zwischen den einzelnen linear angeordneten Rebzeilen ab. Die derzeit verbreitete Kulturführung mit Fahrgassenbreiten von 2,0 - 2,3 m erlaubt unter Berücksichtigung ausreichender Sicherheitsabstände zur Rebzeile den Einsatz von Traktoren mit einer Außenbreite von 1,4 - 1,6 m. Eine Breite der Hinterachsbereifung von 13,6 Zoll ist zurzeit als gängiger Standard anzusehen. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Kippstabilität ist der maximale Reifendurchmesser auf 24 - 28 Zoll [610 - 711 mm] begrenzt (MÜLLER et al. 2000; VOGT und SCHRUF 2000; WALG 2007a).

Wie in der Flächenlandwirtschaft werden auch im Weinbau zunehmend Niederquerschnittsreifen eingesetzt. Die Verringerung der Verhältniszahl von Reifenhöhe zu Reifenbreite erlaubt die Konstruktion breiterer Reifen bei gleichbleibenden Außendurchmessern. Fortschritte hinsichtlich der spezifischen Reifentragfähigkeit ermöglichen weiterhin das Fahren mit verminderten Reifeninnendrücken (STRAUSS 2007). Vereinzelt wird in der Literatur auf die Verwendung von Superbreitreifen bzw. Terrareifen verwiesen. Deren Verhältnis von Reifenhöhe zu Reifenbreite ist in einem Bereich unter 0,6 : 1 angesiedelt. Die große Kontaktfläche in Verbindung mit niedrigen Reifeninnendrücken gewährleistet ein bodenschonendes Befahren auch wenig tragfähiger Böden. Der Praxiseinsatz erfordert jedoch ausreichend große Fahrgassenbreiten (WALG 2007a; GEYRHOFER 2010).

2.4.5.2 Reifenfülldruck

Das bodenschonende Befahren der Kulturfleichen - im Sinne eines reduzierten Radschlupfes und Rollwiderstands bei gleichzeitig erhöhter Zugkraft und vergrößerter Kontaktfläche - setzt einen möglichst geringen Reifenfülldruck voraus. Weiterhin sind als Nebeneffekte eines abgesenkten Reifenfülldrucks die reduzierte Schwingungsbelastung sowie die verbesserten Selbstreinigungseigenschaften des Reifens anzuführen. Im Gegensatz hierzu sind für die Straßenfahrt deutlich höhere Fülldrücke zur Gewährleistung einer ausreichenden Reifentragfähigkeit und Fahrstabilität erforderlich. Gleichzeitig resultiert der höhere Fülldruck in einer Herabsetzung des

Rollwiderstands auf der befestigten Fahrbahn und somit in einer Minderung von Kraftstoffverbrauch und Verschleiß (SCHILLING 1960; RENIUS 1985; DÖLL 1998; SCHLOTTER und KUTZBACH 2001; DISERENS 2002; STRAUSS 2007).

Eine zu starke Absenkung des Reifeninnendrucks führt jedoch zu einer ungleichmäßigen Druckverteilung in der Kontaktfläche, wobei die Zone der Lastabstützung im Flankenbereich des Reifens konzentriert ist (JACKE und EBEL 2006). Die stark wolkende Reifenmitte ist in der Folge einem verstärkten Verschleiß unterworfen.

Einen Lösungsansatz stellen Reifendruckregelanlagen dar, welche ein automatisches Verstellen des Fülldrucks unter Berücksichtigung der Einsatzbedingungen während der Fahrt gestatten. Grundsätzlich sind die Voraussetzungen für eine Adaption dieser Anlagen aus der Flächenlandwirtschaft gegeben. WALG (2007a) dokumentierte eine praxistaugliche Systemlösung des Herstellers Holder für Weinbausmalspurschlepper. Für die weinbauliche Praxis wird aus Gründen der Bodenschonung eine zukünftige Nutzung zunehmend gefordert. Der Einsatz ist bislang jedoch auf Einzelfälle begrenzt (VOGT und SCHRUFFT 2000; STRAUSS 2007). An dieser Stelle sei auf die ausführlichen Abhandlungen zu den Grundanforderungen der automatischen Reifenluftdruckverstellung bei Traktoren von REMPFER (2003) verwiesen.

2.4.5.3 Multipass-Effekt

In der Fachliteratur existieren abweichende Definitionen des Begriffs Multipass-Effekt. Im weinbaulich orientierten Kontext bezeichneten u. a. MÜLLER et al. (2000), STRAUSS (2007), HERNDL-LANZ (2010) und ZIEGLER (2012) die aus wiederholten Überfahrten innerhalb des gleichen Spurbereichs resultierende Fahrspurverdichtung als Multipass-Effekt. In der Konsequenz kommt es zu einer Manifestation von Verdichtungszonen in tieferen Bodenschichten, welche keiner regelmäßigen Bodenlockerung mehr zugänglich sind. Die Verdichtungszonen sind in der Regel unmittelbar an die Rebzeile angrenzenden Fahrgassenbereich lokalisiert. Für die mittlere Standzeit einer Rebanlage von 25 Jahren wird unter Berücksichtigung der Mechanisierungsintensität eine kumulierte Anzahl von 300 - 400 Überfahrten ein und derselben Fahrspur angegeben.

Die landtechnische Grundlagenliteratur hingegen definiert als Multipass-Effekt das Prinzip einer Veränderung der Rollwiderstands- und Traktionseigenschaften eines Bodens im Zuge einer mehrmaligen Überrollung. Dabei kommt es zu einer Verbesserung des Fahrwerkwirkungsgrades und Verminderung von Reibungsverlusten. Im Rahmen entsprechender Feldversuche konnte eine Erhöhung des Triebkraftkoeffizienten bei gleichzeitiger Verminderung des Rollwiderstandskoeffizienten gezeigt werden (HOLM 1972; RENIUS 1985). Die Wirkungsgradsteigerung beruht in erster Linie auf einer durch Radpassage induzierten Vorverdichtung des Ober- und Unterbodens. Hierdurch unterliegen die Fahrbahnbedingungen für die jeweils nachfolgenden Räder einer positiven Beeinflussung. SCHREIBER (2006) quantifizierte diesen Effekt im Rahmen einer empirischen Gleichung.

Unabhängig von der grundsätzlich verschiedenen Betrachtungsweise weisen die Autoren jedoch auf ein erhebliches Verdichtungspotenzial innerhalb der wiederholt überrollten Areale hin. Die Tiefenwirkung der Bodenspannung ist positiv mit der Anzahl an Überfahren korreliert (BOLLING 1987; WILDE 1998). Aus pflanzenphysiologischer Sicht wird das Bodengefüge dadurch nachteilig beeinflusst.

2.4.5.4 Flüssigkeitsfüllung von Reifen

Vereinzelt werden die Antriebsreifen der Traktoren mit Flüssigkeiten, in der Regel Wasser unter Zusatz von Frostschutzmitteln, befüllt. Die zusätzliche Ballastierung vergrößert den Kontaktflächendruck und ermöglicht die Übertragung größerer Zugkräfte bei vermindertem Antriebsschlupf. Im Weinbau ist auch die damit verbundene Absenkung des Schlepperschwerpunkts mit dem Ziel einer Verbesserung der Standsicherheit insbesondere beim Befahren von Hanglagen positiv zu bewerten. Die Flüssigkeitsfüllung setzt die Installation besonderer Füllventile voraus. Nachteilig ist die Verminderung der Federwirkung der Bereifung, die durch das Herabsetzen des komprimierbaren Gasvolumens durch die Flüssigkeitsfüllung ausgelöst wird. Das Schwingungsverhalten der Gesamtmaschine kann insgesamt negativ beeinflusst werden (GERDSEN 1997; WEISE 2002). Darüber hinaus erhöht sich die insgesamt abzustützende Fahrzeugmasse.

2.5 Interaktion und Interdependenz Boden - Fahrzeug

Die anthropogen durch das Befahren unbefestigter Böden induzierten Bodenverdichtungen können analog zur klassischen Mechanik anhand der Wirkungskette Belastung - Beanspruchung - Verformung erklärt werden. Grundlagenarbeiten zum mechanischen Verhalten des Ackerbodens unter Belastung, zur Druckverteilung in der Kontaktfläche und im Boden sowie zu den Verformungseigenschaften des Bodens gehen auf SÖHNE zurück (1951, 1952, 1953). SOMMER (1985) visualisierte den Zusammenhang zwischen Belastung, resultierender Beanspruchung und Verformung in Folge des einwirkenden Bodendrucks modellhaft (Abb. 24).

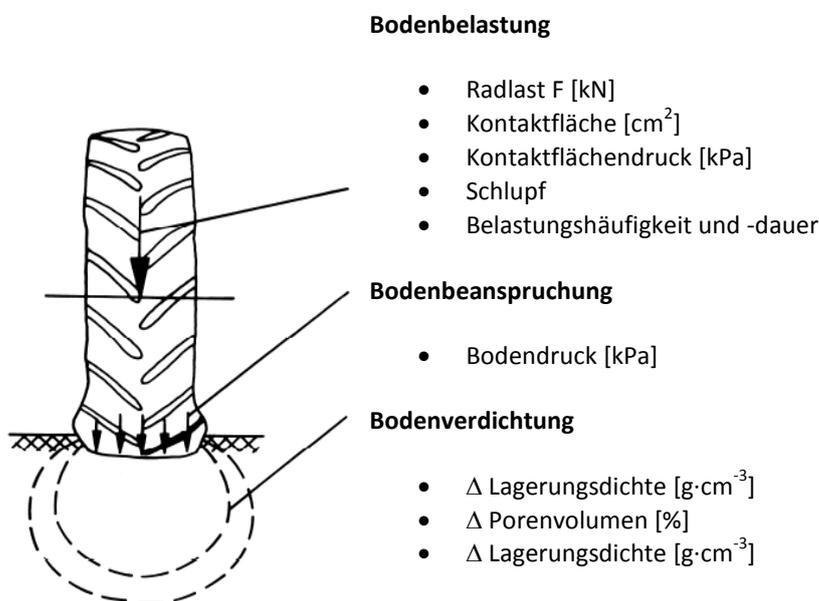


Abb. 24: Zusammenhang zwischen Bodenbelastung, Bodenbeanspruchung und Bodenverdichtung (modifiziert nach SOMMER 1985).

2.5.1 Bodenbelastung

Die Belastung des Bodens während der Überfahrt resultiert aus der einwirkenden Last, welche in der Kontaktfläche zwischen Fahrwerk und Boden abgestützt wird. Der Quotient aus Radlast [kN] und Kontaktfläche [cm^2] beschreibt in diesem Zusammenhang den spezifisch wirkenden Kontaktflächendruck [kPa] und quantifiziert die Intensität der Belastung in der Fahrspur als wesentliche Kenngröße (BOLLING und SÖHNE 1982; BOLLING 1986; WEIßBACH 1994; OLFE 1995; WILDE 2000).

Die Wirkpaarung zwischen Fahrwerk und Boden, Form und Größe der Kontaktfläche sowie die Höhe und Verteilung des Drucks innerhalb der Kontaktfläche unterliegt einer Vielzahl von Determinanten und Wechselbeziehungen. In der Literatur werden fahrwerksbezogene Parameter (Fahrwerksbauart und -dimensionierung, Reifenfülldruck, Reifenbauart, Vibration), Kräfteverhältnisse in der Kontaktfläche, Dauer und Häufigkeit der Belastung sowie Materialeigenschaften des Bodens benannt (BOLLING 1986; HAKANSSON 1988; OKELLO 1992; SEMMEL 1993; SCHLOTTER und KUTZBACH 2001; WEIßBACH 1994, 2003; EBEL 2006). Eine näherungsweise Abschätzung des mittleren Kontaktflächendrucks als wirksamer Belastungsfaktor an der Bodenoberfläche kann über den Reifeninnendruck erfolgen (BOLLING und SÖHNE 1982, BOLLING 1986), wobei eine konstante und homogene Druckverteilung innerhalb der Kontaktfläche nicht gegeben ist (OLF 1993; WEIßBACH 1994; EBEL 2006).

Die komplexen Vorgänge und Wechselwirkungen der technogenen Bodenbelastung wurden in der Vergangenheit intensiv untersucht und hieraus Gesetzmäßigkeiten und Handlungsempfehlungen abgeleitet. Nachfolgend werden ausgewählte Forschungsergebnisse einzelner Belastungsversuche in Form einer tabellarischen Übersicht zusammengefasst (Tab. 4):

Tab. 4: Konzeption und Ergebnisse ausgewählter Belastungsstudien.

Quelle(n)	Versuchsanstellung	Ergebnis
SOMMER et al. (1981)	Herbstliche Bodenbefahrung nahezu wassergesättigter Böden mit einem militärischen Kettenfahrzeug (40 t Gesamtmasse).	Deutliche Ertragsdepression im Bereich der Fahrspuren im Folgejahr. Rückgang der Ertragsdepressionen innerhalb eines Zeitraums von drei Jahren nach Versuchsdurchführung.
WEIßBACH (1994)	Belastungsversuche auf unterschiedlich bewirtschafteten Ackerstandorten (konventionell, konservierend, Direktsaat). Evaluation des Bodendruckverhaltens von Rad- und Bandfahrwerken landwirtschaftlicher Fahrzeuge sowie der Druckverteilung in der Kontaktfläche.	Auf fester Fahrbahn tragen nur die Reifen- bzw. Bandstollen zur Abstützung der Fahrzeugmasse bei, auf nachgiebiger Fahrbahn nahezu die gesamte geometrische Kontaktfläche. Die theoretisch errechneten Kontaktflächendrücke wurden in der Praxis durch Stolleneinfluss und ungleichmäßige Druckverteilung deutlich überschritten.
DÖLL (1998)	Belastungsversuche mit Rad- und Bandfahrwerken auf natürlich abgesetzten und gepflügten Böden mit hoher Bodenfeuchte nahe FK.	Die Wahl eines lastangepassten Reifennendricks trägt maßgeblich zu einer gleichmäßigen Druckverteilung in der Kontaktfläche und einem gleichmäßigen Spannungsabbau im Boden bei.
WIERMANN (1998), MÄHNER (1999)	Kontrollierte Belastungsversuche auf gepflügten und konservierend bearbeiteten Parabraunerden mit nichtlandwirtschaftlichen Fahrzeugen und variierenden Belastungsniveaus (0 t, 2 x 2,5 t, 2 x 5,0 t, 6 x 5,0 t).	Die gepflügten Böden zeigten eine deutliche Verminderung des Grobporenvolumens und eine Zunahme der Lagerungsdichte. Das Ertragspotenzial der nach erfolgter Belastung ausgesäten Sommergerste sank um bis zu 66 %. Gleichzeitig war die Wurzellänge reduziert. Die Belastung der konservierend bearbeiteten Böden wies ähnliche Tendenzen auf, ließ insgesamt jedoch eine höhere Bodenstabilität erkennen.
ANSORGE und GODWIN (2007, 2008, 2009)	Vergleichende Versuche in der Bodenrinne (Substrat: lehmiger Sand) mit Rad- und Bandlaufwerken hinsichtlich auftretender Bodendeformation und -verdichtung.	Bandlaufwerke weisen hinsichtlich der Parameter Bodendeformation und Bodenverdichtung Vorteile gegenüber Radfahrwerken auf. Von besonderer Bedeutung für den Bodenschutz sind große Reifendurchmesser und eine gleichmäßige Druckverteilung in der Kontaktfläche.

2.5.1.1 Kontaktfläche

Die Kontaktfläche definiert den Bereich der Kraft- und Drehmomentübertragung zwischen Fahrwerk und Fahrbahn (WEIßBACH 2003). Die Größe und Form der Aufstandsfläche wird beim Radfahrwerk primär durch die Einzelradlast, den Reifendruck und die Reifendimensionierung bedingt. Weitere Faktoren sind Reifentyp, Profilierung, Materialverhalten des Reifens, insbesondere der Karkasse sowie fahrbahnspezifische Parameter. Ausformung und Faktoren der Kontaktfläche sind in der Literatur ausführlich beschrieben (u. a. BOLLING 1984; RENIUS 1985; SEMMEL 1993;

WEIßBACH 2003; EBEL 2006). Für Bandlaufwerke wird im Allgemeinen die im Bodenkontakt befindliche Grundfläche der einzelnen Bänder als Kontaktfläche angenommen.

In der Kontaktfläche stellt sich ein Gleichgewicht zwischen abzustützender Rad-/Bandlast und entgegen gerichteter Bodenreaktionskraft ein. Insbesondere auf nachgiebigen Fahrbahnen bedingt die Einstellung eines Kräftegleichgewichts neben der Verformung der elastischen Bereifung auch die Verformung des Bodengefüges. Auf nachgiebigen Böden erfolgt das Einsinken des Reifens bis der unterhalb gelagerte Boden so stark verdichtet wurde, dass er eine ausreichende Stützkraft aufbringen kann. Die Tiefe der Fahrspur korreliert mit einem zunehmendem Kontaktflächendruck bzw. einer abnehmenden Bodentragfähigkeit (BOLLING 1984; SCHWIEGER 1996). Zur Bestimmung der Kontaktfläche stehen experimentelle und theoretische Verfahren zur Verfügung.

DISERENS (2002) entwickelte ein Modell zur näherungsweisen Ableitung der Kontaktfläche landwirtschaftlicher Reifen auf nachgiebiger Fahrbahn unter Berücksichtigung der Parameter Reifenbreite, -durchmesser, -fülldruck und Radlast. Berücksichtigte Regressionskoeffizienten wurden empirisch im Rahmen von Feldstudien bestimmt. Ältere Berechnungsverfahren nach KOMANDI (1976), BOLLING (1987), SCHWANGHART (1993) und SCHWIEGER (1996) berücksichtigten jeweils unterschiedliche Fahrbahneigenschaften (starr oder nachgiebig) und Formen der angenommenen Kontaktfläche (Ellipsen, Rechtecke, teils Sonderformen). Sämtlichen mathematischen Verfahren ist eine gewisse Schätzungenauigkeit gemein.

2.5.1.2 Kontaktflächendruck

In der Kontaktfläche entsteht als Folge der Kraffteinleitung über die Bereifung bzw. über die Antriebskette ein spezifischer Druck, welcher als Kontaktflächendruck bezeichnet wird (SÖHNE 1951). SÖHNE (1953) sowie KRAUSE und STEINKAMPF (1986) betonten die primäre Bedeutung des Kontaktflächendrucks für die Druckfortpflanzung und die resultierende Beanspruchung im Oberboden. Maßnahmen zur Senkung des Kontaktflächendrucks führen somit unmittelbar zu einer verminderten Druckbeanspruchung und einer Beschränkung nachteiliger Gefügeveränderungen auf die Aggregatzwischenräume.

Bei Annahme der Reifenkarkasse als unendlich dünn ist der Reifeninnendruck dem mittleren Kontaktflächendruck gleichzusetzen. Bedingt durch die Gewebesteifigkeit der Karkasse, Verform- und Walkarbeit des Reifens sowie der Einflüsse der Reifenprofilierung erhöht sich in der Praxis regelmäßig der tatsächliche Kontaktflächendruck. Nach SCHILLING (1960) bewegt sich der Zuschlagsfaktor zwischen 0,2 und 1,2 wobei der Betrag der Druckerhöhung eine hohe Variabilität aufweist. Unmittelbar unterhalb der Reifenstollen wird der mittlere Kontaktflächendruck um den Faktor vier bis fünf überschritten wie differenzierte Druckmessungen von HAMMEL (1993) und WEIßBACH (1994, 2003) zeigten. Grundsätzlich liegt der mittlere Kontaktflächendruck auf befestigten Fahrbahnen regelmäßig höher als der Reifeninnendruck, wohingegen dieser auf nachgiebigen Untergründen tendenziell geringer ausfällt (KRASCHINSKI 2001).

Für die Tiefenwirksamkeit mechanischer Belastungen ist hingegen der absolute Betrag der Gesamtlast, die dem Produkt aus Kontaktflächendruck und Kontaktflächen-größe entspricht, bestimmend. Vor diesem Hintergrund kamen ARVIDSSON et. al (2002) sowie ARVIDSSON und KELLER (2007) im Rahmen durchgeführter Feldstudien zu dem Ergebnis, dass die Belastung im Oberboden nicht ausschließlich als Funktion des Reifeninnendrucks und die Belastung im Unterboden nicht nur als Funktion der Gesamt- bzw. Radlast definiert werden kann. Vielmehr ist die Bodenbelastung eine Funktion der Gesamtschnittstelle Fahrwerk - Boden, welche zusätzlich durch spezifische Fahrwerks- und Bodeneigenschaften bedingt wird.

Häufigkeit und Dauer der Belastungsimpulse sind ebenso wie auftretender Schlupf der Antriebsräder maßgebliche Determinanten der Gesamtbodenbelastung (SÖHNE 1951, 1952; GLIMERTH 1953; SÖHNE 1953; HOLM 1972; STEINER 1979; BOLLING 1987; HORN et al. 1987; KROMER 1989; HORN 2001). MÜLLER (1984) stellte in diesem Kontext insbesondere die Bedeutung der Belastungshäufigkeit im Weinbau dar, welcher durch langjährig wiederholte Überfahrten ein und derselben Fahrspur eine Sonderstellung einnimmt.

Die direkte experimentelle Bestimmung des Kontaktflächendrucks ist aufwendig und engen Grenzen unterworfen. Starre Fahrbahnen erlauben den Einsatz drucksensitiver Folien und elektronischer Flächensensoren. Dabei variiert die Sensitivität zwischen einem einfachen Stempelabdruck bis hin zur farblich differenzierten Darstel-

lung unterschiedlicher Druckstufen (EBEL 2006). Von Druckmessungen im Grenzbe-
reich zwischen Fahrwerk und nachgiebiger Fahrbahn liegen nur wenige Versuchser-
gebnisse vor. Exemplarisch sei auf die Verwendung von Drucksensoren in der Rei-
fenoberfläche durch WAY et al. (2000) verwiesen. Alternative Messverfahren bestim-
men den statischen Kontaktflächendruck indirekt durch standardisierte Installation
elektronischer Sensorsysteme in definierten Bodenmedien.

Zwischen den idealisierten Modellen zur Beschreibung von Kontaktfläche und Kon-
taktflächendruck sowie der tatsächlichen Druckverteilung unter landwirtschaftlichen
Fahrwerken existieren offensichtliche Diskrepanzen. Beispielsweise untersucht EBEL
(2006) die Druckverteilung unter verschiedenen Forstreifen. Er stellte fest, dass sich
die Druckbelastung im Zentrum der Kontaktfläche mit zunehmender Radlast und Rei-
fenfülldruck glockenförmig konzentriert, wohingegen sie zur Peripherie hin kontinuier-
lich abnimmt. Im Unterschied zum Kontaktflächendruckprofil auf plastischer Fahr-
bahn wies WEIßBACH (1994) ein differenziertes Profil für feste und nachgiebige Fahr-
bahnen nach. Während die Messergebnisse auf nachgiebiger Fahrbahn wiederum
eine Druckkonzentration unter dem Radmittelpunkt erkennen ließen, verlagerte sich
die Zone der höchsten Drücke auf starren Fahrbahnen hin zu den peripheren Reifen-
schultern.

JACKE und EBEL (2006) bezifferten den Faktor der Druckerhöhung im Flankenbereich
gegenüber dem Zentrum auf $2 : 1 - 3 : 1$. Eine homogene Druckverteilung in der Kon-
taktfläche ist abhängig von der Einstellung eines angepassten Reifenfülldrucks unter
Berücksichtigung der im Betriebszustand zu erwartenden Reifenauflast. Die Anpas-
sung des optimalen Fülldrucks ist fahrbahnspezifisch vorzunehmen. Regelmäßig
geht eine Erhöhung der Radlast mit einer Erhöhung des Kontaktflächendrucks ein-
her. In Verbindung mit überhöhten Reifenfülldrücken bildet sich eine Aufwölbung der
Lauffläche heraus, was eine zusätzliche Kontaktflächendruckerhöhung zur Folge hat
(SCHULZ 1995; SCHWIEGER 1996; SCHLOTTER und KUTZBACH 2001; MOHSEMANESCH
und WARD 2007).

Ketten- und Bandfahrwerke zeigen eine andersartige Druckcharakteristik, wenngleich
auch innerhalb der annähernd rechteckig geformten Kontaktfläche der Bandlaufwer-
ke Abweichungen von der statisch-idealisierten homogenen Druckverteilung festge-
stellt werden können. WEIßBACH (1994) wies nach, dass der unterhalb von Bandlauf-

werken messbare Druck den theoretischen mittleren Kontaktflächendruck um den Faktor 2 übersteigt. Daraus schloss er auf eine ungleiche Druckverteilung in der Kontaktfläche. Bauartbedingt ist eine Akkumulation des Kontaktflächendrucks unterhalb der Antriebs- und Stützrollen des Fahrwerks festzustellen (OLF 1993; WEIßBACH 1994, WEIßBACH und WINTER 1996). Kette bzw. Band im Zwischenrollenbereich tragen nicht im selben Maße zur Lastabstützung bei (Abb. 25). Durch eine mechanische Vorspannung von bis zu 200 kN, insbesondere bei Gummigurtbändern, kann gegenüber den Bandlaufwerken der ersten Generation eine gleichmäßigere Druckverteilung erreicht werden (MOITZI und BOXBERGER 2007). Messungen durch OBERMEIER-HARTMANN et al. (2006) zeigten, dass ohne entsprechende Bandvorspannungen nahezu keine Stützkräfte im Zwischenrollenbereich übertragen werden. In diesen Bereichen sinkt die Druckspannung nahezu auf ein unbelastetes Niveau ab. Bandareale, welche über die äußeren Umlenkrollen hinausragen, tragen ebenfalls nicht zur Lastabstützung bei (WEIßBACH 1994).

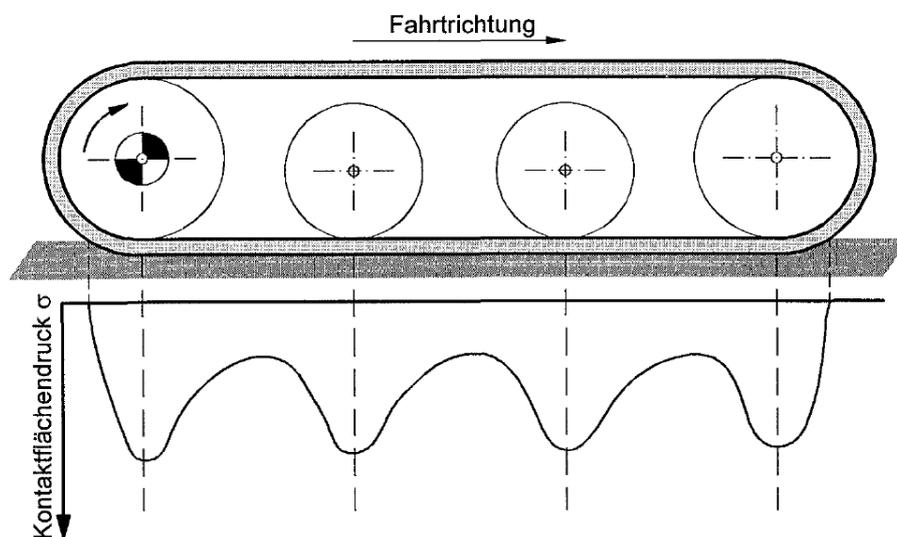


Abb. 25: Druckverteilung unterhalb der Laufwerksrollen und der Rollenzwischenräume (WENZLAWSKI 1999).

Über die Tiefe betrachtet ist eine Angleichung der ursprünglich unterschiedlichen Drücke in der Kontaktfläche zu verzeichnen. Die Form der Kontaktfläche zeigt Auswirkungen auf die Druckfortpflanzung in die Tiefe. Runde oder elliptische Kontaktflä-

chen verursachen bei vergleichbarem Kontaktflächendruck eine tiefere Spannungswirkung im Bodengefüge als gleich große, aber rechteckig-länglich geformte Kontaktflächen (WEIßBACH 2003; ANSORGE und GODWIN 2007).

Für Fahrzeuge mit Rad- und Kettenfahrwerk resultieren aus dynamischen Fahrbedingungen, respektive aus der Gewichtskraft und Hebelwirkung von Fahrzeug und Anbaugeräten sowie aus angreifenden äußeren Kräften variable Achs- und Radlasten. Diese Variabilität beeinflusst gleichermaßen die Druckverteilung in der Kontaktfläche. Bei Kenntnis der eintretenden Verlagerungsvorgänge kann eine angepasste Ballastierung der Fahrzeuge einer ungünstigen Lastverteilung entgegenwirken und somit eine gleichmäßigere Druckverteilung begünstigen (RENIUS 1985).

2.5.1.3 Antriebsschlupf

Die Differenz zwischen tatsächlich zurückgelegtem Weg und dem theoretischen Abrollumfang bzw. zwischen der schlupflosen nominellen Radumfangsgeschwindigkeit und der Translations- bzw. tatsächlichen Geschwindigkeit der Radachse wird als Schlupf bezeichnet. Die nominelle Abrollgeschwindigkeit resultiert aus der Winkelgeschwindigkeit und dem wirksamen Radius. Für ein auf der Stelle durchdrehendes Rad gilt demnach ein Schlupf von $i = 100 \%$, wohingegen ein abbremsendes blockierendes Rad mit einer nominellen Umfangsgeschwindigkeit von $v = 0$ einen negativen Schlupf gegen unendlich ($i = -\infty$) erfährt.

Schlupf tritt regelmäßig bei der Kraftübertragung zwischen Fahrwerk und Boden auf und verringert den spezifischen Fahrwerkswirkungsgrad. Das kraftübertragende Rad/Band legt je Umdrehung einen von dessen theoretischem Abrollumfang abweichenden Weg zurück. Es kommt sowohl in der Aufstandsfläche als auch im Boden zu Deformationen, bis das Rad/Band in eine Gleitbewegung übergeht (EICHHORN 1999). Eine schlupffreie Kraftübertragung ist nicht möglich. In der Praxis wird sich stets eine von Null abweichende Differenz zwischen theoretischem und tatsächlichem Abrollumfang einstellen (WENNER et al. 1986).

Ein gedachter Punkt (A) auf dem Rollkreis eines schlupffrei abrollenden Rades beschreibt eine zyklische Bahnkurve (Abb. 26 a). Dabei wird der Weg s_0 zurückgelegt, welcher als zweifaches Produkt aus dem statischen Rollradius des Reifens (r_{th}) und

der Kreiszahl (π) definiert ist. Ein ziehendes Rad erfährt in Abhängigkeit eines spezifischen Triebkraftkoeffizienten einen positiven Schlupf. Die entsprechende Bahnkurve zeigt eine verkürzte Zyklode mit typischer Zykloidenschleife (Abb. 26 b). Ein abbremsendes Rad hingegen erfährt einen negativen Schlupf und zeigt eine verlängerte Zyklode (Abb. 26 c). Das schlupffreie Rad hat im Berührungspunkt gegenüber der Fahrbahn die Geschwindigkeit Null, wohingegen das schlüpfende Rad gegenüber dem Boden in Bewegung ist (SCHILLING 1960).

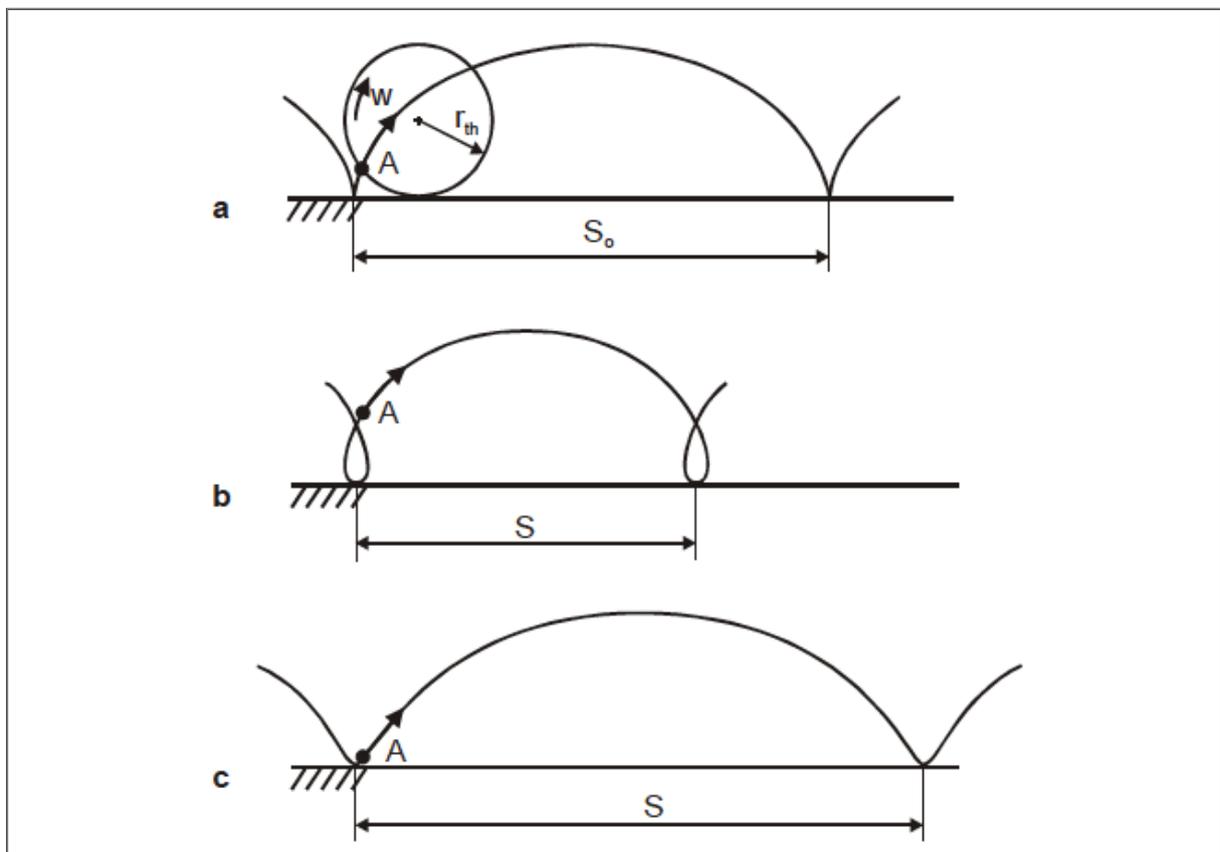


Abb. 26: Bahnkurven eines Punktes A bei Rotation eines starren Rades mit dem Radius r_{th} und der Abrollgeschwindigkeit w unter verschiedenen Schlupfverhältnissen auf starrer Bahn. S entspricht der effektiv zurückgelegten Wegstrecke je Umdrehung. a: schlupffreies Abrollen, b: ziehendes Rad mit positivem Schlupf, c: bremsendes Rad mit negativem Schlupf (MEYER o.J.).

WENNER et al. (1986) gaben als Richtwert eine Größenordnung von 15 - 20 % Schlupf für klassische allradgetriebene Radschlepper im schweren landwirtschaftlichen Einsatz (z. B. Grundbodenbearbeitung) an. Schlupf stellt im landwirtschaftlichen

Kontext einen anthropogenen Faktor bei der Entstehung von Bodenverdichtungen dar. Nach Untersuchungen von RAGHAVAN et al. (1977, 1978) liegt das Maximum schlupfinduzierter Bodenverdichtungen in einem Schlupfbereich von 15 - 30 %. Höherer Schlupf führt zu keiner weiteren Steigerung der Verdichtungsintensität. Der Anteil der schlupfinduzierten Verdichtung an der Gesamtverdichtung im Oberboden beträgt bis zu 50 %.

Eine schlupfinduzierte Belastung des Bodengefüges über dessen Scherwiderstand hinaus führt zum Gefügebruch und horizontaler Materialverlagerung. Der maximale Scherwiderstand (τ) eines Bodens folgt den Gesetzmäßigkeiten der Mohr - Coulomb'schen Gleichung als Funktion aus Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) und der Normalspannung (σ_n) (DIN 18137-1 2010; HARTGE und HORN 1999; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2010; LANG et al. 2007; KUNZE et al. 2011).

Die Stabilität des Bodens wird insbesondere durch die Parameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung beeinflusst, wobei mit steigender Normalspannung auch der vom Boden mobilisierbare Scherwiderstand zunimmt. Kohäsion und Winkel der inneren Reibung und somit auch der Scherwiderstand selbst sind von den spezifischen Materialeigenschaften der Bodenbestandteile abhängig (HARTGE und HORN 1999; SCHMIDT 2001). Zur Tiefenwirkung schlupfbedingter Bodenverdichtungen gibt es widersprüchliche Angaben: KOOLEN et al. (1992) vertraten die Auffassung eines schnellen Abbaus der Scherspannungen mit zunehmender Bodentiefe, wohingegen KIRBY (1989) aus Modellierungsversuchen mit der Finite - Elemente - Methode lastabhängige Gefügeschäden bis zu einer Tiefe des zweifachen Durchmessers des überrollenden Rades für möglich hielt.

Analog zum Radantrieb definiert sich beim Kettenfahrwerk die Differenz zwischen absoluter Fahrgeschwindigkeit und Umfangsgeschwindigkeit als Antriebsschlupf. Entstehungsort des Schlupfes ist neben der Kontaktfläche Kette - Boden das Laufwerk selbst, insbesondere durch Dehnungseffekte in der Antriebskette. Typische Antriebsschlupfwerte der Kettenfahrwerke betragen nur etwa 25 - 35 % der Beträge vergleichbarer Radfahrzeuge.

2.5.1.4 Fahrwerksvibration

Der Effekt einer dynamischen Bodenverdichtung durch eingeleitete Vibrationen wird in der Literatur ausführlich beschrieben und bautechnisch seit den 1930er Jahren genutzt. Physikalisch ist der Verdichtungseffekt auf eine Verringerung der Scherfestigkeit durch das in Schwingung versetzte Bodengefüge zurückzuführen, wodurch eine Um- und Dichtlagerung der Bodenpartikel durch eine mechanisch induzierte Auflast ermöglicht wird (SONNENBERG 1998). Die Intensität der Bodenverdichtung sowie die damit einhergehende Volumenminderung sind abhängig von der Bodenbeschaffenheit, der Vibrationsenergie und deren Einwirkungsdauer (KIRSCH und SONDERMANN 2001).

Wenige Untersuchungen von SOANE et al. (1981a, 1981b) in der Landwirtschaft sowie im Weinbau durch MÜLLER (1984) zeigten das Verdichtungspotenzial durch Radfahrwerke bei hohem Reifenfülldruck und durch ungefederte Kettenfahrwerke. Beide Fahrwerksausführungen sind aufgrund einer relativ starren Konstruktionsweise nicht geeignet, die vom Antriebsmotor und Getriebe ausgehenden Fahrzeugschwingungen abzufedern (KOOLEN und KUIPERS 1983). Bei Gleiskettenfahrwerken wirkt zusätzlich der Vibrationseffekt massereicher Kettenglieder unmittelbar verdichtend auf das Bodengefüge ein. Auch WONG et al. (1984) erklärten Oberbodenverdichtungen, die nach der Überfahrt von Kettenfahrzeugen höher als erwartet ausfielen, durch Vibrationseinwirkungen. KUNTZE (1983) wies darauf hin, dass hohe Scherwiderstände leichter Böden durch Vibrationseinwirkung einfacher überwunden werden können, was zu einer gesteigerten Verdichtungsempfindlichkeit führt (Abb. 27).

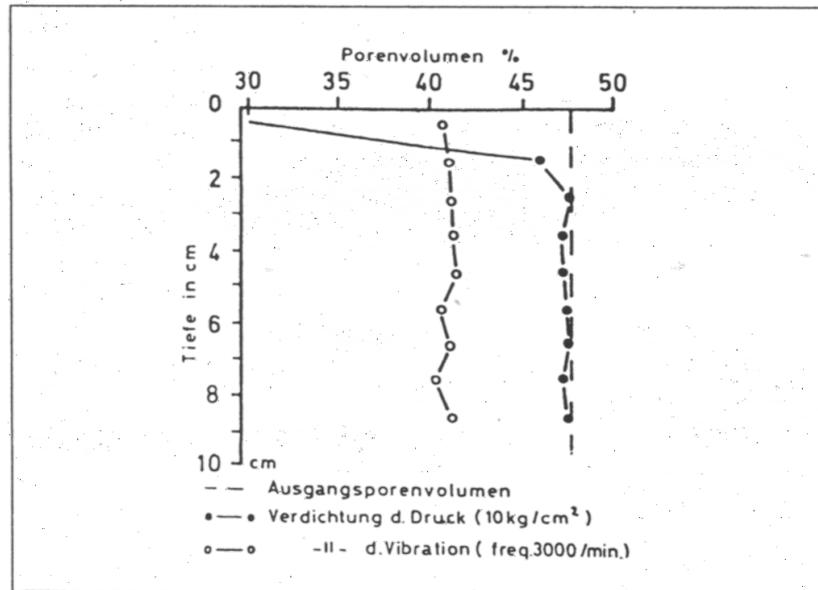


Abb. 27: Wirkung von Druck und Vibration auf das Porenvolumen (KUNTZE 1983).

2.5.1.5 Dauer und Häufigkeit der Belastungsereignisse

Die Dauer einer Belastung ist ursächlich an den im Boden resultierenden Gefügeveränderungen beteiligt (KÉZDI 1970). Die Verformung und Kompression des Bodens erfolgt regelmäßig in voneinander abgrenzbaren Phasen. Man unterscheidet in diesem Zusammenhang Sofortsetzung, Primärsetzung und Sekundärsetzung (Abb. 28). Die Einzelprozesse werden zeitlich nacheinander durchlaufen, wobei diese kontinuierlich längere Zeiträume in Anspruch nehmen (Sekunden bei Sofortsetzung bis Jahre bei Sekundärsetzung; DEGEN 1994; NISSEN 1999).

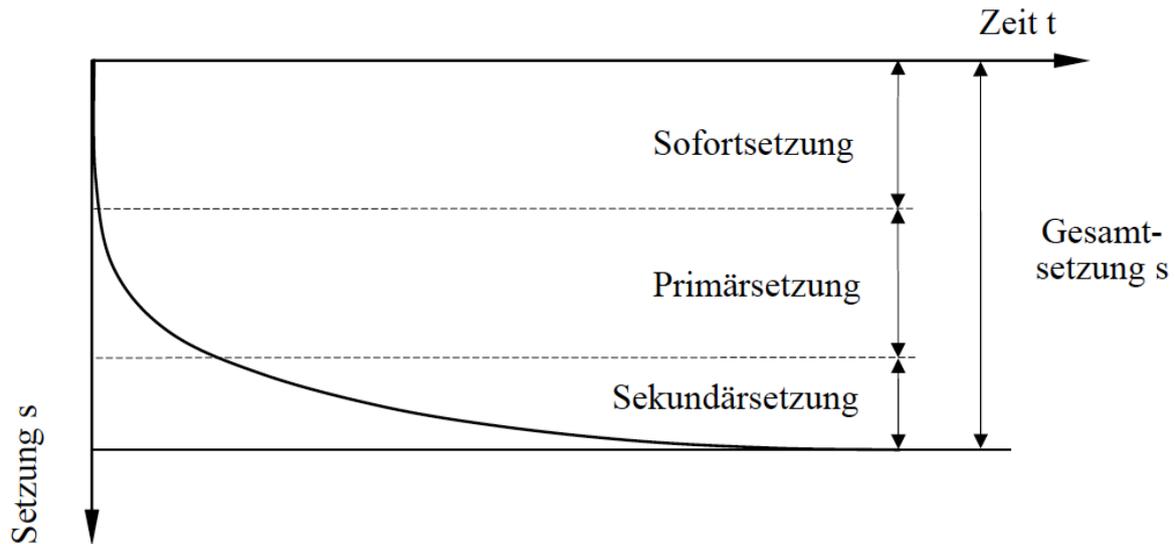


Abb. 28: Einzelprozesse des Bodensetzungsverhaltens in Abhängigkeit von der Zeit (KATZENBACH 2013).

Der Prozess der Sofortsetzung kann in Abhängigkeit der Bodenart nach zwei verschiedenen Modellen ablaufen. Leichte, nichtbindige Böden reagieren auf die einwirkende Belastung mit einer unmittelbaren Kompression, insbesondere des luftgefüllten Porenvolumens. Bindige und wassergesättigte Böden weisen ein anderes Verhalten auf. Sie zeigen zunächst ein belastungsinduziertes seitliches Ausweichen des Bodenmaterials unter Volumenkonstanz. Die Sofortsetzung kann Auslöser von elastischen oder plastischen Bodendeformationen sein (SIMMER 1994; HINTER 2008). Anhaltende Belastungszustände verursachen das Fortschreiten der Bodensetzung im Rahmen der Primärsetzung. Kennzeichnend für diesen Prozess ist das Auspressen von wasser- und luftgefüllten Bodenporen unter kontinuierlicher Zunahme des Bodenkonsolidierungsgrades. Geschwindigkeit und Betrag der Primärsetzung sind durch die bodenspezifische Permeabilität und die herrschenden Druckverhältnisse bestimmt. An die Konsolidierungsphase schließt sich die finale Stufe der Sekundärsetzung an. Grundlage der Sekundärsetzung sind Deformationsvorgänge der Bodenteilchen bzw. ein plastisches Fließen des Korngerüsts (GUDEHUS 1981; LANG et al. 2007).

Die Prozesse der Sofort- und Primärsetzung unterliegen einer bodenspezifischen Variabilität hinsichtlich Geschwindigkeit und Dauer. Eine länger einwirkende Belas-

tung führt eine betragsmäßig höhere Bodenkonsolidierung herbei (GLIMERTH 1953). Die Dauer einer technogenen Belastung hängt von der Länge der Kontaktfläche und der Fahrgeschwindigkeit ab (OLF 1993). Untersuchungen von BOLLING (1987) und HORN und LEBERT (1989) ließen geringere Eindringwiderstände im Oberboden und eine insgesamt verminderte Bodenspannung über die Tiefe als Folge kurzer Belastungsimpulse erkennen. Gegenteilige Resultate waren bei entsprechend längerfristiger Einwirkungsdauer nachweisbar. Die Weiterleitung von Bodenspannungen in tiefere Schichten erfordert eine ausreichende Anzahl an Korn - Korn - Kontakten. Ein im Hinblick auf die effektive Spannung unterkonsolidierter Boden muss diese zunächst ausbilden. Dies nimmt in Abhängigkeit vom jeweiligen Bodentyp einen bestimmten Zeitraum in Anspruch. Auf bereits konsolidierten und dichtlagernden Böden war der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit hingegen nicht mehr nachweisbar (BOLLING 1984).

BOLLING (1987) zeigte weiterhin, dass auch mit zunehmender Anzahl der Überfahrten eine Weiterleitung der Bodenspannung in tiefere Bodenareale erfolgt. Eine wiederholte Belastung unter gleichbleibenden Rahmenbedingungen führt zu einer kontinuierlichen Dichtezunahme. Dabei induziert die erstmalige Belastung bereits den überwiegenden Anteil der Gesamtverdichtung; weitere Belastungsereignisse münden in einen logarithmisch abnehmenden Zuwachs der Lagerungsdichte bis zum Erreichen eines standortspezifischen Endverdichtungsgrades (SÖHNE 1953; HORN 1988). Vergleichbare Ergebnisse publizierten BEKKER (1969) und BOLLING (1987) auch für den Parameter der überfahrtsinduzierten Fahrspursetzung.

Viele weitere Autoren quantifizierten im Rahmen praxisorientierter Versuchsreihen die Auswirkungen mehrfacher Überfahrten. Nachfolgende Tabelle (Tab. 5) gibt eine Auswahl repräsentativer Studien wieder.

Tab. 5: Übersicht über ausgewählte Studien zur Belastungshäufigkeit.

Quelle(n)	Versuchsanstellung	Ergebnis
SCHJONNING und RASMUSSEN (1994)	Belastungsversuche mit 3-achsigen Transportfahrzeugen in Einfach- und Mehrfachüberrollung (4x) auf S- und sL-Böden. Messung der Bodenlagerungsdichte mit Gammastrahlentechnik und Penetrometrie. Auswertung der Ertragsdaten nachfolgender Getreidekulturen.	Einfachüberrollung resultiert in leichter Verdichtung ohne Ertragsdepression. Mehrfachüberrollung induziert Verdichtungen bis 0,6 m Tiefe mit Ertragseinbußen.
HORN et al. (2008)	Ein gepflügter Standort wurde mittels Messsystem MOVIS mit 7,5 t bei 3,5 bar Reifenfülldruck belastet.	Bis in eine Tiefe von 0,4 m sind Veränderungen des Porenvolumens nachweisbar; bei 0,6 m keine Veränderung mehr. Mit zunehmender Anzahl der Überrollungen erfolgt die Spannungsausbreitung in tiefere Bodenschichten. Konservierend bearbeitete Böden zeigen eine höhere Stabilität.
BOTTA et al. (2009)	Überrollungsversuche mit Fahrzeugen geringer Achslast. Vergleich der Parameter Eindringwiderstand und Fahrspursetzung (0x, 1x, 3x, 5x und 10x Überrollung).	Auch Fahrzeuge mit Achslasten unter 30 kN verursachen bei wiederholter Überrollung Verdichtungen im Unterboden. Konservierende Bodenbearbeitung resultiert in einer erhöhten Tragfähigkeit (Parameter: Eindringwiderstand, Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen, Spurtiefe).
GEISCHEDER und RAINER (2008)	3 Überrollungsvarianten (1x Band, 2x Rad, 4x Rad).	Alle Varianten zeigen eine Zunahme des Eindringwiderstands im Krümmenbereich. Das nachgewiesene Bodendruckprofil unter dem Band zeigt in 0,2 m Tiefe deutliche Druckspitzen. Der Druckabbau erfolgt schneller als in den Radvarianten. In 0,5 m Tiefe erfolgt in keiner Variante ein Druckanstieg.
MANUWA et al. (2010)	Randomisierter und dreifach wiederholter Überrollungsversuch. Versuchstandort mit sandigem Lehmboden wurde wiederholt (1x, 3x, 5x, 7x, 9x, 11x) mit einem Kleinbagger (3,6 t Gesamtmasse) mit Gummibandlaufwerk überrollt.	Mit steigender Anzahl der Überrollungen nimmt die Spurtiefe zu. Auch durch die Überrollung mit der verhältnismäßig leichten Maschine ist eine Zunahme der Lagerungsdichte und des spezifischen Eindringwiderstands mit zunehmender Häufigkeit der Überfahung nachweisbar. Dabei zeigt die Dichte gegenüber dem Eindringwiderstand eine höhere Sensitivität.

2.5.2 Bodenbeanspruchung

Der Kontaktflächendruck zwischen Fahrwerk und Fahrbahn induziert ein mechanisches Druckspannungsfeld im Boden, welches der belastungsbedingten Bodenbe-

anspruchung entspricht. Die Spannungsausbreitung im Boden erfolgt stets dreidimensional, wobei mit größer werdendem Bodenvolumen der Betrag der Spannung abnimmt (FAZEKAS 2005; WILD et al. 2012). Sofern die Bodenbeanspruchung die spezifische Eigenfestigkeit des Bodens überschreitet, resultiert dies in einer Verformung und einer Abnahme bzw. Gestaltsänderung des Porenraums (SOMMER et al. 2002; FAZEKAS und HORN 2005). Die innere Bodenspannung als Gegenkraft zur äußeren Beanspruchung ist auf Reibungsspannungen der Kontaktpunkte zwischen den Bodenpartikeln sowie auf Wasserspannungen der dazwischenliegenden Menisken zurückzuführen (BRANDHUBER 2006). Die Verformung durch Befahren wird an der Bodenoberfläche in Form von Fahrspuren sichtbar (BRUNOTTE et al. 2011).

Die Eigenstabilität eines Bodens wird von einer Vielzahl bodenendogener (Pedogenese, Lagerungsdichte und -volumen, Bodenfeuchte) und bodenexogener (Bewirtschaftungssystem, Vegetation) Parameter beeinflusst (ERDAS 1976; HORN 1981; SOMMER 1985; SOMMER 1999; BRANDHUBER 2006; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2010). In Deutschland und vergleichbaren Klimazonen (warmgemäßigtes Regenklima der mittleren Breiten) ist nach YAVUZCAN et al. (2005) die Bodenfeuchte der für die Bodenstabilität bedeutendste Faktor.

2.5.3 Bodenverdichtung

Mit der fortschreitenden Mechanisierung und Rationalisierung landwirtschaftlicher und weinbaulicher Produktionsverfahren ist der Einsatz schlagkräftiger und damit meist großer und schwererer Maschinen und Arbeitsgeräte verbunden. Die steigenden Radlasten und Kontaktflächendrücke erhöhen die Bodenbelastungen. Insbesondere beim Befahren feuchter und labiler Böden kommt es zu einer Schädigung der Bodenstruktur.

Bodenverdichtung wurde von SÖHNE (1952) als Verringerung des Bodenporenvolumens infolge einwirkender Druckbeanspruchung bezeichnet. SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (2010) definierten den Begriff Bodenverdichtung als Zunahme der Bodenlagerungsdichte infolge einer einwirkenden mechanischen Belastung. Damit einher geht eine Verringerung des Porenvolumens, insbesondere der luftgefüllten Grobporen. Wassergefüllte Poren sind aufgrund der Inkompressibilität des Wassers

gegenüber einer Verdichtung zunächst weniger stark empfindlich. Einer Verdichtung muss in diesem Fall zunächst eine Entwässerung des Porenraums vorausgehen.

Eine Verdichtung des Bodens resultiert weiterhin in einer Verminderung und Unterbrechung der Kontinuität des Gesamtporenvolumens bei gleichzeitiger Erhöhung des Anteils solider Bodensubstanz (Abb. 29) (FRIELINGHAUS 2002).

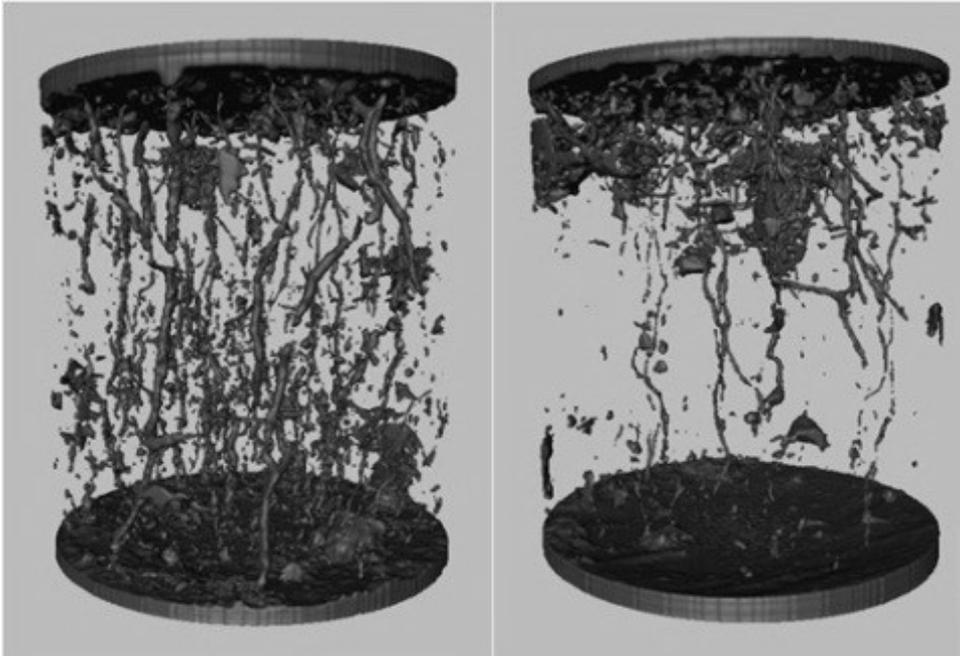


Abb. 29: Computer-Tomografie des Porensystem eines unverdichteten (links) und verdichteten Bodens (rechts). Die Verdichtung resultiert in einer signifikanten Verminderung des Gesamtporenvolumens sowie Unterbrechung dessen Kontinuität (BØRRESEN 2011).

Verschiedene Autoren (HORN et al. 2000; BRÜMMER 2001; WERNER und WERNER 2001; BLUME 2005) beschrieben standortunabhängige, regelmäßig erkennbare Gefügeveränderungen und bodenphysikalische Vorgänge in verdichteten Bodenhorizonten:

- Abnahme des Bodenvolumens
- Zunahme der Lagerungsdichte
- Kompression des Grobporenanteils, vor allem der weiten Grobporen
- Unterbrechung der Grobporenkontinuität

- Zunahme der Mittel- und Feinporen
- Verringerung der Durchlässigkeit
- Umwandlungsvorgänge innerhalb des Porensystems und Bodengefüges.

Aus pflanzenbaulicher Sicht ist eine moderate Bodenverdichtung nach Lockerungsmaßnahmen oder Einsaat als positiv zu beurteilen. Die definierte Rückverdichtung des Oberbodens ermöglicht den Aufstieg von Bodenwasser in Kapillaren und trägt positiv zur landwirtschaftlichen Standorteignung bei. Verdichtungsbedingte Veränderungen des Gefügestands können standortspezifisch als akzeptabel eingestuft werden oder unterliegen einer Klassifikation als Schadverdichtung (WERNER 1983; WERNER und REICH 1993). Unter einer Bodenschadverdichtung wird eine Verdichtung verstanden, deren Grad an Gefügeveränderung zeitlich befristet oder dauerhaft negative Auswirkungen auf die Bodenfunktionen zeigt (SOMMER und BRUNOTTE 2003).

Zur Abgrenzung der Bodenverdichtung von der Bodenschadverdichtung und zur Prognose der standortspezifischen Verdichtungssensitivität gibt es verschiedene kontrovers diskutierte Konzepte. An dieser Stelle sei auf die Modelle zur Bestimmung der Gefährdungsklassen der Schadverdichtung (SVGK) nach PETELKAU et al. (2000), das Konzept der Vorbelastung (HORN et al. 2002) sowie das darauf aufbauende Prognosekonzept des Druckbelastungsquotienten nach PAUL (2004) verwiesen. DISERENS (2010) entwickelte ein praxistaugliches Simulationsprogramm zur Vorhersage der technogen induzierten Bodenbeanspruchung und Interpretation der daraus resultierenden Schadverdichtungsgefahr.

In der Literatur wurden verschiedene Arten der Entstehung von Bodenverdichtungen beschrieben (SEIFERT und SEUFERT 1986; BRÜMMER 2001; FRIELINGHAUS 2002; HARRACH et al. 2003; RÜCKNAGEL et al. 2010; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2010):

1. Einlagerungsverdichtungen entstehen durch natürliche pedogene Verlagerungsvorgänge, wobei Bodenpartikel von perkolierendem Wasser aus ihrer ursprünglichen Lage entfernt, in Grobporen transportiert und dort mit abnehmender Fließgeschwindigkeit wieder sedimentiert werden. Empfindlich gegenüber Einlagerungsverdichtungen sind insbesondere labile Bodengefüge mit hohen Schluff- und Sandanteilen bei gleichzeitig geringen Humus- und

Kalkgehalten. Obwohl der Verdichtungsvorgang als solcher natürlichen Ursprungs ist, wirken anthropogen hervorgerufene Strukturschädigungen fördernd.

2. Verschlammungsverdichtungen sind Folge von Niederschlagsereignissen und können durch Planschwirkung auf unbedeckten Bodenoberflächen hervorgerufen werden. Die häufig nur wenige Millimeter stark ausgeprägten Verdichtungshorizonte unterscheiden sich vom Ausgangsboden signifikant in Struktur, Rauigkeit und Dichte. Die Verschlammung äußert sich in einer starken Verminderung der Wasserdurchlässigkeit und Infiltrationsrate und begünstigt durch eine Zunahme des Oberflächenabflusses Erosionsereignisse.
3. Sackungs- oder Setzungsverdichtungen resultieren aus einer Verringerung der bodenbürtigen Gefügestabilität oder einer äußeren Belastung des Bodens durch Auflasten. In beiden Fällen liegt der Entstehung der Bodenverdichtung eine über das spezifische Maß der Tragfähigkeit hinausgehende Belastung zugrunde, die durch das Eigengewicht des Bodens oder durch eine äußere Auflast ausgelöst wird.
4. Bodenverdichtungen können weiterhin auf Verschmieren und Verkneten des Bodengefüges zurückzuführen sein. Insbesondere der im Kontaktbereich zwischen Fahrwerk und Boden auftretende Schlupf wird als Auslöser schwerer Strukturschäden beschrieben. Die horizontale Belastung und Verlagerung des Bodens infolge der durch die Triebräder auf den Boden abgestützten Zugkräfte führen in Verbindung mit hohen Kontaktflächendrücken zu einer dauerhaften plastischen Verformung des Bodens.

Sackungs- und Setzungsverdichtungen sowie Verdichtungen durch Verschmieren und Verkneten sind in der Regel auf mechanische Belastungen anthropogener Natur zurückzuführen. Bodenverdichtungen können in verschiedenen Tiefen und Horizonten entstehen. Üblich ist eine Unterscheidung in Ober- und Unterboden (SEMMELE und HORN 1995; STEINKAMPF et al. 1993; BRANDHUBER 2006). Weiterhin wird differenziert in Krumbasis- oder Pflugsohlenverdichtung, welche im Grenzbereich zwischen Ober- und Unterboden lokalisiert ist und deren Entstehungsprozess in zahlreichen Veröffentlichungen beschrieben wurde (VETTER und LICHTENSTEIN 1968; EHLERS 1983, 1992; LIEBHARDT et al. 1995; EHLERS 1996; FENNER 1997; STOCKFISCH 1997).

Verdichtungszone unterhalb der regelmäßigen Bearbeitungstiefe unterliegen nur in stark begrenztem Umfang einer Wiederauflockerung durch biotische und abiotische Prozesse (WILDE 2000). Eine natürliche Regeneration verdichteter Zonen durch Quellungs- und Schrumpfungsvorgänge, durch Austrocknung und Wiederbefeuchtung sowie durch Eissprengung oder Bioturbation (Durchmischung des Bodens durch Lebewesen) erfordert Zeitperioden von mehreren Dekaden (DACHROTH 2002; VON WILPERT und SCHÄFFER 2006). Zur gezielten Auflockerung vorhandener Unterbodenverdichtungen stehen biologische und technische Meliorations- und Tiefenlockerungsverfahren zur Verfügung (STRAUSS 2005; WALG 2007a, 2007b, 2007c).

2.6 Bodenschadverdichtungen in der Landwirtschaft

Schadverdichtungen werden überwiegend induziert durch mechanische Belastung ausgehend von Traktoren, Maschinen und Transportfahrzeugen, welche den landwirtschaftlich genutzten Boden als Fahrbahn nutzen. Die Gefahr der Entstehung von Schadverdichtungen nimmt mit steigenden Maschinen- und Gerätemassen und damit einhergehenden Radlaststeigerungen zu. Weitere Faktoren sind u. a. die Belastungsdauer, die Überrollhäufigkeit, auftretender Antriebsschlupf und stabilitätsbedingende bodenendogene Faktoren (ZAPF und KOTZI 1997; PETELKAU 1998).

Die Schadverdichtung ist in der Regel nicht auf den Oberboden beschränkt, sondern erstreckt sich in tiefere Bodenhorizonte, welche außerhalb der regulären Bearbeitungstiefe konventioneller Bodenbearbeitungsgeräte liegen. Im landwirtschaftlichen Kontext kommt der Krumbasisverdichtung eine besondere Bedeutung zu. Dieser lokal konzentrierte Verdichtungshorizont hemmt das Wachstum der Pflanzenwurzeln und stört nachhaltig die Pflanzenernährung aus Wasser- und Nährstoffdepots im Unterboden. Insbesondere Standorte mit vorherrschendem Plattengefüge neigen bei fortschreitender Verdichtung zur Ausbildung eines horizontal orientierten Porensystems. Gegenüber dem in unverdichteten Böden vorherrschenden vertikalen System wirkt es als Stau- und Sperrschicht für infiltrierendes Wasser, Luft, Pflanzenwurzeln und die Bodenfauna (RUSSELL 1977; BRÜMMER 2001).

In der Literatur werden standortabhängige Trockenrohdichten $> 1,3 - 1,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ als kritisch beurteilt, ebenso ein Gesamtporenvolumen unter 39 Vol.-% (CZERATZKI 1972;

FRIELINGHAUS 2002; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2010). Als weiteres Merkmal der Schadverdichtung kann die Beeinträchtigung des bodenspezifischen Luft- und Wasserhaushalts angesehen werden.

2.6.1 Tragfähigkeit

Eine ausreichende Bodentragfähigkeit ist Voraussetzung für den Einsatz maschineller Produktions- und Ernteverfahren. Die Tragfähigkeit des Bodengefüges wird maßgeblich durch die Bodeneigenstabilität bestimmt. Diese kann als Spannungsbetrag ausgedrückt werden. Die Eigenstabilität entspricht dabei dem Spannungsbetrag, welcher vom Boden ohne relative Lageveränderung der Primärpartikel zueinander aufgenommen werden kann und welcher über den Parameter der Vorbelastung einer Quantifizierung zugänglich ist. Tragfähigkeit und Stabilität sind maßgebliche Parameter dafür, inwiefern das Bodengefüge gegenüber äußeren Belastungen eine ausreichende Reaktionskraft aufbringen kann (ZIMA 2002).

In der Literatur werden eine Reihe bodenbürtiger Faktoren genannt, die auf die Tragfähigkeit einwirken (HORN 2001; WEIßBACH 2003; RÜCKNAGEL et al. 2010). Die Tragfähigkeit selbst unterliegt einer starken standortabhängigen Variabilität (HARTGE und HORN 1999). Nachfolgend beschriebene Bodenparameter sind für dessen Tragfähigkeit und Stabilität von besonderer Bedeutung.

2.6.1.1 Porenvolumen

Das Porenvolumen umfasst die Gesamtheit der mit Bodenluft und Bodenlösung gefüllten Hohlräume zwischen der soliden Bodensubstanz (HARTGE und HORN 1999). Ein niedriges Porenvolumen geht regelmäßig mit einer erhöhten Bodenlagerungsdichte und Tragfähigkeit einher. Die Ausbildung des Porenvolumens in anthropogen unbeeinflussten Böden wird im Wesentlichen durch Kornform und Korngrößenverteilung beeinflusst. Je nach Bodenart wird ein für das Pflanzenwachstum optimales Porenvolumen um 45 Vol.-% angegeben (CZERATZKI 1972; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2010). Neben dem Gesamtporenvolumen ist die Größenverteilung des Porenvolumens für die Eignung eines Bodens als Pflanzenstandort entschei-

dend. SCHROEDER (1992) gab ein optimales Verhältnis von Grobporen ($> 50 \mu\text{m}$) zu Fein- und Mittelporen ($< 10 \mu\text{m}$) von 2 : 3 an.

2.6.1.2 Dichte

Die Bodendichte wird als Quotient aus Trockenmasse der Bodenfestsubstanz und dem spezifischen Lagerungsvolumen in der Maßeinheit $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ angegeben. Eine standortspezifische Bodenlagerungsdichte stellt sich unter Berücksichtigung pedogenetischer Faktoren physikalischer, chemischer und biologischer Art ein (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2010). Unter anthropogener Beeinflussung ist die Lagerungsdichte primär auf die Vorbelastung zurückzuführen (HORN 1986). Im Rahmen der DIN 19682-10 (2007) wird die Packungsdichte eines Bodens als eine im Feldversuch experimentell-sensorisch zu ermittelnde Kenngröße definiert. Sie beschreibt die Bodengefügeeigenschaften unter Berücksichtigung eines individuellen Grades an Kompaktheit bzw. Lockerheit. Die experimentelle Bestimmung umfasst überwiegend makroskopische Merkmale, wie Eindringwiderstand, Aggregatform, -größe und -lagerung sowie Häufigkeit und Verteilung von biogenen Makroporen und Pflanzenwurzeln. Die Bodendichte zeigt einen starken Einfluss auf den Durchdringungswiderstand, welchen Pflanzen bei der Durchwurzelung eines Standorts zu überwinden haben. Zahlreiche Untersuchungen belegten eine Degression des Wurzel- und Sprosswachstums mit zunehmender Trockenrohdichte (VAKALI und KÖPKE 2001; PASSIOURA 2002; VAKALI 2003; RÜCKNAGEL 2007). Exemplarisch wird dieser Zusammenhang in Abb. 30 dargestellt.

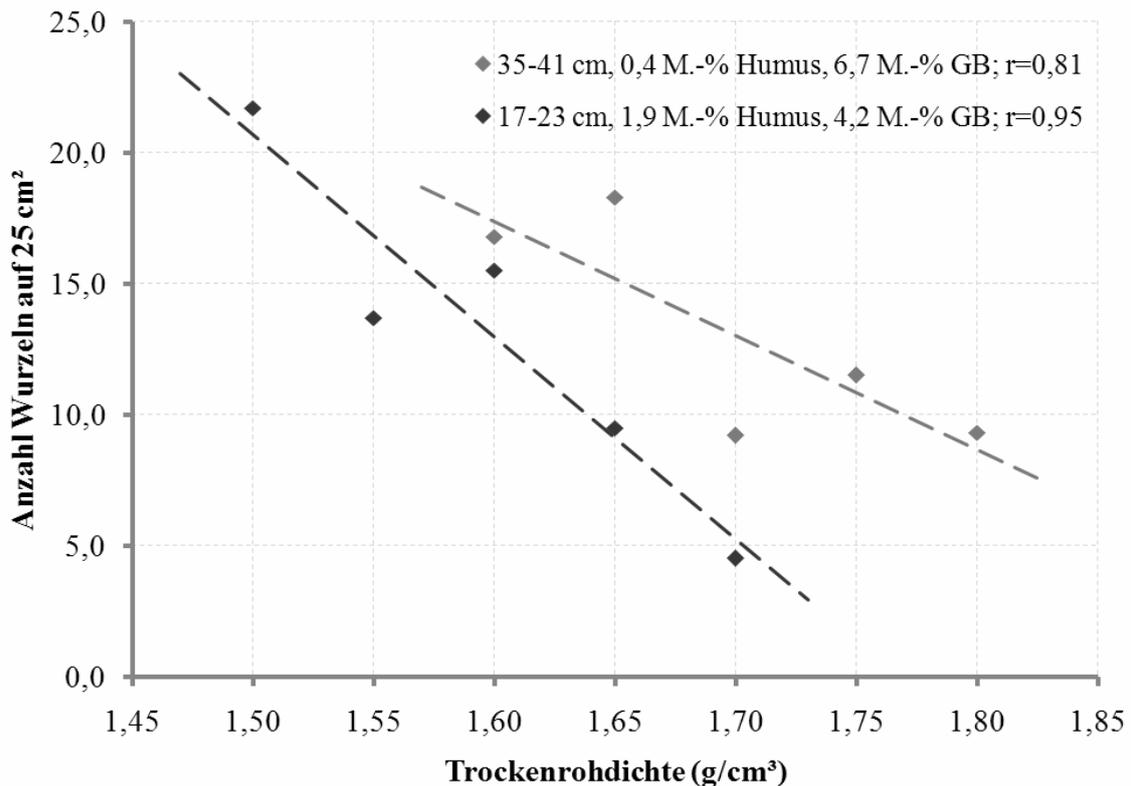


Abb. 30: Effekt der verminderten Wurzelanzahl mit zunehmender Trockenrohdichte. Dargestellt wird die Anzahl der Wurzeln je 25 cm² Fläche in verschiedenen Horizonten. Insbesondere der Oberboden (17 - 23 cm) lässt eine Degression erkennen (RÜCKNAGEL 2007).

2.6.1.3 Bodenwasser

Das Bodenwasser bildet die flüssige Phase des Bodens und ist überwiegend auf infiltrierende Niederschläge oder kondensierende Luftfeuchte zurückzuführen. In der Regel bildet das Bodenwasser mit Stoffen atmosphärischer oder bodenbürtiger Herkunft eine Lösung bzw. eine Suspension. Die Bodenart und das vorherrschende Porensystem beeinflussen maßgeblich die Bindung des Bodenwassers an die Bodenmatrix bzw. die Durchströmung bis zum Grundwasserleiter oder stauenden Bodenschichten. Das Haftwasser setzt sich aus adhäsiv an Bodenpartikel gebundenem Adsorptionswasser und aus kapillar gebundenem Bodenwasser zusammen (SCHROEDER 1992; HINTERMAIER-ERHARD und ZECH 1997; GISI et al. 1997). Die Stärke der Bindung des Bodenwassers an die Matrix wird als Saugspannung in Pa oder der nicht SI-konformen Maßeinheit cmWS (Zentimeter Wassersäule) angegeben. Gebräuchlich ist auch die Angabe als pF-Wert (dekadischer Logarithmus der Was-

ersäule) (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2010). Quantifiziert wird der Bodenwassergehalt in Gew.-% oder Vol.-%.

Der Bodenwassergehalt beeinflusst die Tragfähigkeit eines Bodens maßgeblich, insbesondere kann der zwischen den Bodenpartikeln lokalisierte Wasserfilm einen Gleitfilm ausbilden und eine Verdichtung begünstigen (SOMMER et al. 2002). Mit zunehmendem Bodenwassergehalt nimmt die Stabilität des Bodengefüges ab (BOLLING 1987), da die Kontaktpunkte zwischen einzelnen Bodenpartikeln aufgelöst werden (HARTGE und HORN 1999). HORN und SEMMEL (1994) zeigten, dass eine starke Druckbelastung feuchter Böden eine Bodenverflüssigung bewirkt und somit plastische Verformungen begünstigt.

Der Anbau von Zwischenfrüchten im ackerbaulichen Bereich stellt eine Möglichkeit dar, den Bodenwassergehalt zu senken und damit einhergehend die Tragfähigkeit zu erhöhen (BRANDHUBER et al. 2008, RÜCKNAGEL et al. 2010). Analog zeigt eine standortangepasste Begrünungseinsaat unter Dauerkulturen vergleichbare Auswirkungen.

2.6.1.4 Bodenart, Schichtung, Gefüge

Die Bodenart ist das Resultat einer spezifischen Korngrößenzusammensetzung, wobei sich deren Stabilität aus der verhältnismäßigen Verteilung der einzelnen Kornfraktionen ergibt. Insbesondere Gemenge verschiedener Korngrößensfraktionen bilden durch effektives Ausfüllen der Intergranularporen ein stabiles System mit erhöhter Trockenrohdichte (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2010).

Das Bodengefüge oder die Bodenstruktur wird als die räumliche Anordnung der festen Bodenbestandteile definiert und bestimmt Quantität und Form der Poren. Dem in wechselnden Anteilen mit Luft und Wasser gefüllten Porenvolumen fällt im Hinblick auf die Versorgung des Bodenlebens oder wurzelnder Pflanzen eine ausschlaggebende Rolle zu. Das Bodengefüge ist von einer Vielzahl biogener und anthropogener Faktoren abhängig (z. B. Bodenart, Menge und Art der organischen Substanz und biologischen Aktivität, Wasserhaushalt).

2.6.2 Vorbelastungskonzept

Das Ausmaß einer Bodenverdichtung wird im Wesentlichen durch die Bodenstabilität gegenüber der Einwirkung externer Belastungsereignisse bestimmt (GRISSE et al. 1987). Die Stabilität natürlich gelagerter Bodensysteme kann dabei mittels grafischer oder mathematischer Verfahren, wie sie u. a. CASAGRANDE (1936) und DANNOWSKI (1994) beschrieben, bestimmt werden.

HORN (1981) leitete aus standardisierten Belastungsversuchen im Labor die bodenmechanische Kenngröße der Vorbelastung ab. Diese wird experimentell an ungestörten Bodenproben (Stechzylinderproben) bestimmt, welche im eindimensionalen Kompressionsversuch (DIN 18135 2012) gegenüber einer vertikalen Druckbelastung (10 - 800 kPa) im Ödometer exponiert werden. Eine halblogarithmische Darstellung der Bodensetzung gegenüber der Druckbelastung zeigt einen differenzierbaren Wieder- und Erstverdichtungsbereich (HORN 1981; GYSI 2001). Die Vorbelastung entspricht dabei der gemessenen Druckbelastung am Schnittpunkt zwischen flach verlaufender Wiederverdichtungs- und steil abfallender Erstverdichtungsgerade. Die gemessene Druckbelastung dient als Indikator für die Belastung eines Bodens in der Vergangenheit. Das Konzept der Vorbelastung geht davon aus, dass ein Boden im Bereich der Wiederverdichtung stabil reagiert, wohingegen eine Druckbelastung über die kritische Vorbelastung hinaus ein Fortschreiten der Konsolidierung und eine plastische Verformung zur Folge haben. Neben der allgemeinen Bodenstabilität beeinflussen frühere Verdichtungsereignisse sowie der spezifische Grad der Bodendichtlagerung die standortspezifische Vorbelastung (HORN 1981; HARTGE und HORN 1999; GYSI 2001; PETH und HORN 2004). HORN und ROSTEK (2000) wiesen auf die essenzielle Bedeutung der Vorbelastung als Kriterium für die Stabilität des Bodens und damit seiner Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen Belastungen hin.

Eine Zusammenfassung des aktuellen Wissensstands hinsichtlich der Einflussfaktoren auf die Vorbelastung gaben VORDERBRÜGGE und BRUNOTTE (2011). Die Autoren wiesen zusätzlich auch auf Unsicherheiten und Grenzen der Anwendung des Vorbelastungskonzepts hinsichtlich der Beurteilung von Bodenverdichtungen und der bodenspezifischen Verdichtungssensitivität hin.

2.6.3 Pflanzenphysiologie

Eine Bodenverdichtung im landwirtschaftlichen Bereich geht stets mit einer Beeinflussung des Produktionsfaktors Boden einher. SCHILLING ging 1960 noch davon aus, dass ein Zusammenhang zwischen Bodenverdichtung und Pflanzenwachstum nicht nachweisbar ist. Für Ackerböden bei normaler Bodenfeuchte hielt er Flächendrücke von $2,5 \text{ kp}\cdot\text{cm}^{-2}$ [245 kPa], für wassergesättigte Böden $1,0 \text{ kp}\cdot\text{cm}^{-2}$ [98 kPa] für tolerierbar.

Nach HORN (2001) lassen sich im Ackerbau signifikante Ertragsdepressionen in einer Größenordnung von bis zu 35 % als direkte Folge manifestierter Bodenschadverdichtungen nachweisen. Die Ursachen dafür liegen in den Einschränkungen der Wasserleit- und Infiltrationsfähigkeit sowie einer Verminderung der Luftkapazität, Luftdurchlässigkeit sowie des Bodengasaustausches (SOMMER et al. 2002, WÜRFEL et al. 2002). Exemplarische Untersuchungen von GAMEDA et al. (1985), HÅKANSSON et al. (1988), PETELKAU (1991) oder SCHJONNING und RASMUSSEN (1994) zeigten auf verschiedenen Standorten ebenfalls ertragsrelevante Auswirkungen. WOLKOWSKI und LOWERY (2008) wiesen beispielsweise für den Maisanbau Ertragsdepressionen bis zu 50 % als unmittelbare Folge einer Bodenschadverdichtung nach. Die Autoren begründeten die Beobachtung u. a. mit einer weitreichenden Veränderung der Wurzelphysiologie hin zu einer überwiegend horizontalen Orientierung sowie mit einer Behinderung der Nährstoffaufnahme.

Zur Abschätzung des Einflusses verschiedener Reifenluftdrücke auf das Ertragsniveau existieren Modelle, doch unterliegen die tatsächlichen Auswirkungen einer hohen Variabilität (SCHWANGHART 1993). Unter Feldbedingungen wurde eine gewisse Kompensationsfähigkeit der Kulturpflanzen festgestellt, die ihre Hauptwurzelzone in unverdichtete Horizonte verlagern; die Kompensation geht allerdings mit einer Verringerung der Nährstoffeffizienz einher (UNGER und KASPAR 1994).

Aufgrund einer regelmäßig intensiven Kultur- und Bodenbearbeitung sowie insgesamt häufiger Flächenbefahrungen ist auch der ökologische Landbau von Bodenverdichtungen betroffen. WILD et al. (2012) zeigten, dass insbesondere die im ökologischen Landbau verbreiteten großkörnigen Leguminosen empfindlich auf Verdichtungen im Wurzelbereich reagieren. Dies gilt bereits für mittlere Bodenlagerungsdichten,

welche nach RENGER et al. (2008) noch ein weitestgehend ungestörtes und gleichmäßiges Wurzelwachstum ermöglichen sollten.

Untersuchungen von WALKER (1994) und VOßBRINK (2005) belegten für forstwirtschaftliche Standorte, dass der Einsatz schwerer Zugpferde gegenüber technischen Verfahren zwar einen lokal höheren Kontaktflächendruck bedingt, insgesamt jedoch keine ökologisch wirksamen Schadverdichtungen nachgewiesen werden konnten. Entsprechende Ergebnisse liegen auch für landwirtschaftlich und weinbaulich genutzte Standorte vor (CANNELLE 2002; HEROLD und HEß 2003).

Auch für perennierende Kulturpflanzen und Forstkulturen werden pflanzenphysiologische Auswirkungen verdichteter Böden beschrieben. Im Forstbereich sind diese direkte und indirekte Schäden im Hauptwurzelbereich durch die Druckbelastung der Reifen- und Kettenfahrwerke. Die Beschädigungen stellen nach MENG (1978) und LÖFFLER (1985) Eindringpforten für Stamm- und Rotfäuleerreger dar, wobei die Infektionsgefahr mit zunehmender Tiefe und Größe der Wundfläche anstieg. Eine Schädigung der Feinwurzelmasse hingegen wurde weitestgehend kompensiert (BREDBERG und WÄSTERLUND 1983). Im Obstbau bewertete LIND (2010) die typischen Fahrspurverdichtungen bei Zeilenabständen um 3,0 m und der Verwendung schwachwachsender Unterlagssorten als tolerierbar.

2.6.4 Schadverdichtung im Weinbau

Das weinbauliche Produktionsziel unterscheidet sich von etablierten landwirtschaftlichen Zieldefinitionen. Im Weinbau wird keine Maximierung des Flächenertrags angestrebt, sondern vielmehr eine höhere Erntequalität bei einem optimierten Einsatz der Produktionsfaktoren (VAN HUYSSTEEN 1989a). Unabhängig davon werden in der Literatur nachteilige Effekte eines schadverdichteten Standorts auf die Physiologie der Weinrebe sowie die Ertrags- und Reifeparameter der Trauben beschrieben:

- Staunässe als Folge von Verdichtungsereignissen beeinflusst sowohl das Spross-, Blatt- als auch Wurzelwachstum der Rebe negativ. Es wurden Störungen des Pflanzenhaushalts durch Staunässe zum Zeitpunkt des Austriebs und während der Phase des Hauptwurzelwachstums dokumentiert (KOBAYASHI et al. 1963; IWASAKI et al. 1966; MYBURGH und MOOLMAN 1991a, 1991b).

- Eine Erhöhung der Bodenfestigkeit und Bodenlagerungsdichte induziert im allgemeinen Pflanzenbau eine Veränderung des Wachstums und der Verteilung der Pflanzenwurzeln im Boden (PHILIPS und KIRKHAM 1962; COCKROFT et al. 1969; VOORHEES 1992). Für den Weinbau konnten MYBURGH et al. (1996) zeigen, dass Ertragsdepressionen sowie Qualitätsminderungen ebenfalls regelmäßig auf eine eingeschränkte Wurzelentwicklung zurückzuführen waren.
- FERREE und STREETER (2004) zeigten mit Gefäßversuchen, dass eine Bodenlagerungsdichte von mehr als $1,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ bei Weinreben in einer signifikanten Verminderung der Sprosslänge, der Blattfläche sowie der Triebtrockenmasse resultierte. Die Trockenmasse von Stamm und Wurzel war nicht beeinflusst. Die Sensitivität gegenüber der induzierten Verdichtung war unabhängig von der verwendeten Rebunterlage.
- Bodenlagerungsdichten von größer $1,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ behindern das Wurzelwachstum der Weinrebe und resultieren in Wuchsdepressionen (PENKOV et al. 1979).
- Für die Weinrebe sind Bodeneindringwiderstände größer $2,0 \text{ MPa}$, gemessen bei Feldkapazität, kritisch zu bewerten. Oberhalb wird das Wurzelwachstum behindert bzw. können höher verdichtete Bereiche nur unzureichend durch die Pflanzenwurzeln erschlossen werden (VAN HUYSSTEEN 1983; MYBURGH et al. 1996). BARLEY und GREACEN (1967) sowie DEXTER (1988) wiesen jedoch darauf hin, dass diese Grenze nicht als absolut anzusehen sei und auch in stärker konsolidierten Böden ein Wurzelwachstum entlang von Strukturbrüchen und Makroporen möglich wäre. Unabhängig davon wird für die Wurzelbereiche in stark verfestigten Böden eine verminderte Wasser- und Nährstoffaufnahme angenommen (PASSIOURA 1988, 1991; TARDIEU et al. 1992).
- SAAYMAN und KLEYNHANS (1978) und VAN HUYSSTEEN (1988) stellten die Bedeutung eines wurzelgängigen Unterbodens für die Wasserversorgung der Rebe fest. Insbesondere bei ausgeprägtem Wasserstress im Oberboden hat die Versorgung aus dem Unterboden maßgeblichen Einfluss auf die Ertragsquantität und -qualität.
- Zum Einfluss verdichteter Böden auf die Nähr- und Spurennährstoffaufnahme der Weinrebe liegen widersprüchliche Ergebnisse vor. FERREE und STREETER (2004) gaben an, dass mit zunehmender Bodenlagerungsdichte die Konzentration von N, Ca, Mg, Fe, Mn, Na und Zn in der Blattdrockenmasse stieg, wäh-

rend die Konzentration von P, K, B und Mo vermindert wurde. SHIERLAW und ALSTON (1984) führten den Effekt einer verbesserten Nährstoffversorgung auf eine Intensivierung des Kontakts zwischen Wurzel- und Bodengefüge zurück. Hingegen berichtet die weinbauliche Grundlagenliteratur von einer tendenziell verminderten Nährstoffaufnahme der Rebe als Folge eines eingeschränkten Wurzelwachstums und mikrobieller Aktivität (VOGT und SCHRUFF 2000).

- Die Eisenmangelchlorose, die mit einer pathologischen Verminderung der Blattchlorophyllkonzentration einhergeht, nimmt im Weinbau eine besondere Stellung ein. Als ursächlich werden u. a. multifaktorielle Beeinträchtigungen des Pflanzen- und Wurzelmetabolismus durch verdichtungsbedingte Hydrogencarbonat- und Ethylenanreicherung im Wurzelspitzenbereich angenommen (KOLESCH 1985; PERRET und KOBELET 1996a, 1996b; WISSENMEIER 2002; SCHWAB und PETERNEL o.J.).
- LANYON et al. (2004) stellten fest, dass die aus dem allgemeinen Pflanzenbau bekannten Interdependenzen zwischen Bodenverdichtung und Pflanzenwachstum grundsätzlich auf den Weinbau übertragbar sind.
- Die maschinelle Bearbeitung der Weinberge führt zur Ausbildung von Fahrspuren und Verdichtungshorizonten, welche die Infiltration von Niederschlägen vermindern und gleichzeitig den oberflächigen Abfluss begünstigen (EMDE 2004). Für das Anbauggebiet Rheinhessen weisen Studien einen jährlichen Bodenabtrag von bis zu $500 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ aus. Als Nebeneffekt tritt eine Verlagerung erheblicher Nährstofffrachten sowie die Remission im Boden sorbierter Pflanzenschutzwirkstoffen in Oberflächengewässer auf (KNIETER 1985).
- Mechanische Belastungen bewirken eine Veränderung des Bodenporensystems, insbesondere eine signifikante Verminderung der Grobporen sowie der Gaspermeabilität. HELAL et al. (1994) stellten fest, dass eine unzureichende Sauerstoffversorgung zu reduzierter Nährstoffretention führt. In Verbindung mit mechanischem Stress resultiert hieraus auch ein beschleunigtes Wurzelsterben bei einem gleichzeitig erhöhten Assimilatverbrauch.
- LARINK et al. (1994) stellten einen signifikanten Rückgang der Individuen- und Artenzahlen der Bodentiere als Folge der Bodenverdichtung fest. Andererseits sind Bodentiere, insbesondere diverse Arten der Regenwürmer (Lumbricidae),

in der Lage Verdichtungshorizonte aktiv zu lockern; jedoch ist eine Meidung starkverdichteter Bodenbereiche festzustellen.

2.6.5 Sanierung schadverdichteter Böden im Weinbau

Die mechanische Tiefenlockerung ist das Standardverfahren zur Sanierung schadverdichteter Böden im Weinbau (STRAUSS 2005; WALG 2007a, 2007b, 2007c). Technologisch wird hierbei zwischen Hub- und Abbruchlockerung unterschieden, wobei gezogene und zapfwellenangetriebene Lockerungsgeräte zum Einsatz kommen. Systeme mit starren Lockerungswerkzeugen (z. B. Tiefengrubber, Parapflüge, Hub-schwenklockerer) zeichnen sich durch eine einfache Konstruktion bei hohem Zugkraftbedarf aus, wobei Lockerungstiefen von bis zu 60 cm erreicht werden. Aktiv angetriebene Lockerungsschare vermindern den Zugwiderstand bei gleichzeitiger Herabsetzung der Arbeitsgeschwindigkeit und der resultierenden Flächenleistung. Das Prinzip der Hublockerung nutzt den aggregatbrechenden Effekt gewinkelter Schare aus, über welche der Boden hinweg gleitet und gleichzeitig angehoben wird. Einzig das Verfahren der Abbruchlockerung (z. B. Spatenmaschine, Meliorationsfräse) mit rotierenden Werkzeugen ermöglicht zeitgleich zur Lockerung eine Einarbeitung organischer Materialien oder mineralischer Düngemittel. Der Einsatzzeitpunkt mechanischer Tiefenlockerungsmaßnahmen ist an der standortspezifisch vorherrschenden Bodenfeuchte zu orientieren. Voraussetzung für die Erzielung nachhaltiger Auflockerungseffekte ist ein ausreichend abgetrockneter Unterboden. Für wassergesättigte Unterböden besteht hingegen die Gefahr der Ausbildung undurchlässiger und persistierender Bearbeitungssohlen.

In der Literatur wird regelmäßige eine nachfolgende Stabilisierung des gelockerten Bodengefüges durch Einsaat tiefwurzelnder Begrünungspflanzen empfohlen, ebenso die Schonung frischgelockerter Böden bis zur natürlichen Gefügekonsolidierung (MÜLLER et al. 2000; WALG 2007a, 2007b, 2007c; GÖTZ und EDER 2009; WINKOVITISCH 2010; NIGGLI 2013).

Tiefenlockerungen gehen regelmäßig mit einer Beschädigung und Verminderung des Wurzelkörpers der Weinreben durch Abschneiden und Abscheren einher. Lockerungsmaßnahmen im Bestand sind daher auf die absolute Notwendigkeit zu begrenzen und nach Möglichkeit alternierend in jeder zweiten Rebzeile mit einem zeitlichen

Abstand von mindestens fünf Jahren vorzunehmen (VAN HUYSSTEEN 1988; WALG 2007b, 2007c). Der Nebeneffekt des Wurzelschnitts wird vereinzelt als Instrument der Wuchsregulierung in sehr stark wüchsigen Rebanlagen diskutiert (DRY et al. 1995, 1998; PROFFITT 2000; PROFFITT et al. 2000).

Für die weinbautreibenden Länder der südlichen Hemisphäre, insbesondere Australien, beschrieb MACRAE (1991) die Kultivierung in aufgeworfenen Erddämmen. Diese werden durch gezielte Verlagerung des Oberbodens aus dem Zwischenzeilenbereich in den Unterstockbereich geformt. Als vorteilhaft wird die vertikale Verlagerung des Wurzelraums über potenzielle Verdichtungshorizonte und Staunässebereiche angeführt. Verschiedene Autoren beschrieben darüber hinaus positive Auswirkungen auf bodenphysikalische Parameter, das Ertragsniveau und das vegetative Wurzel- und Sprosswachstum (MYBURGH und MOOLMAN 1991a, 1991b, 1993; EASTHAM et al. 1996).

2.7 Rechtliche Rahmenbedingungen des Bodenschutzes

Das Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG 1998) bildet zusammen mit der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV 1999) den Kern des deutschen Bodenschutzrechts. Der Geltungsbereich des Gesetzes umfasst den Boden im Sinne der vorgenommenen Definition, maßgeblich „die obere Schicht der Erdkruste, [...] einschließlich der flüssigen Bestandteile (Bodenlösung) und der gasförmigen Bestandteile (Bodenluft), ohne Grundwasser und Gewässerbetten“ (BBodSchG 1998). Das Bodenschutzrecht verfolgt eine nachhaltige Sicherung bzw. Wiederherstellung der Bodenfunktionen, sowohl durch ein Vorsorge-, als auch Sanierungsgebot. Im landwirtschaftlichen Kontext wird die Gefahrenabwehr und Vorsorge gem. den §§ 4, 7, 17 BBodSchG durch die Einhaltung der guten fachlichen Praxis sichergestellt. Eine Konkretisierung der Anforderungen an eine gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft wird u. a. im Rahmen von Handlungsempfehlungen durch das jeweils zuständige Bundesministerium vorgenommen bzw. im Rahmen der staatlichen landwirtschaftlichen Officialberatung kommuniziert.

Zu den Kernforderungen der guten fachlichen Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung gehören insbesondere:

1. standortangepasste Bodenbearbeitung unter Berücksichtigung der Witterung
2. Bewahrung und Verbesserung der Bodenstruktur
3. Vermeidung von Bodenverdichtungen durch Berücksichtigung der Bodenart, Bodenfeuchtigkeit und technogenen Bodenbelastung
4. Minimierung von Bodenabträgen durch eine standortgemäße Nutzung
5. Erhaltung der naturbetonten Strukturelemente der Feldflur
6. Bewahrung und Förderung der biologischen Aktivität des Bodens durch entsprechende Fruchtfolgegestaltung
7. Erhalt des standorttypischen Humusgehalts (BBodSchG 1998).

Weitergehende Normen und Anforderungen spezifizieren die jeweiligen Bodenschutzgesetze der Bundesländer nebst Ausführungsverordnungen.

Handlungsempfehlung und Entscheidungshilfen hinsichtlich des landwirtschaftlichen Maschineneinsatzes und zur spezifischen Befahrbarkeit des Bodens enthält auch die Richtlinie 6101 (2007) des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI). Besondere Berücksichtigung finden pflanzenbauliche Vorsorgemöglichkeiten und optimierte Bodennutzungsstrategien sowie technische Möglichkeiten zur Minimierung der Bodenbeanspruchung.

Auch auf europäischer Ebene gibt es Bestrebungen zur Etablierung eines gesamtgesellschaftlichen Bodenbewusstseins. Bereits 1972 verabschiedete der Europarat die Europäische Bodencharta, welche die grundlegende Bedeutung des Bodens als Lebensgrundlage definiert und Grundsätze für dessen Schutz, Bewirtschaftung und Produktivitätssicherung enthält. Der Fokus der Bodencharta liegt dabei auf der Betrachtung des Bodens als unvermehrbarer und zentraler Bestandteil der Biosphäre. Eine vergleichbare Zieldefinition verfolgt auch die 1981 in Kraft getretene Weltbodencharta unter Schirmherrschaft der Food and Agriculture Organization (FAO).

Analog zur Vorgehensweise der gemeinschaftlichen und integrierten Regelung des Gewässerschutzes im Rahmen der RICHTLINIE 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens

für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Europäische Wasserrahmenrichtlinie) wird auf europäischer Ebene die Schaffung eines einheitlichen Bodenschutzrechts diskutiert. Der Entwurf einer RICHTLINIE 2006/0086 (COD) des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für den Bodenschutz (Europäische Bodenrahmenrichtlinie) wurde erstmals im Jahr 2006 vorgelegt und seither wiederholt überarbeitet. Die Ziele der Richtlinie sind die Vermeidung fortschreitender Beeinträchtigungen der Bodenqualität, die nachhaltige Sicherung der Bodenfunktionen, Schutz vor Bodendegradation sowie die Wiederherstellung geschädigter Böden. Aufgrund von Dissensen zwischen den Mitgliedsstaaten und anhaltender Widerstände seitens verschiedener Interessensverbände, kündigte die KOMMISSION im Oktober 2013 an, den Richtlinienentwurf zurückzuziehen. Mit dem Inkrafttreten eines gemeinschaftlichen EU-Bodenschutzrechts ist somit in absehbarer Zeit nicht zu rechnen.

3 Material und Methoden

Im Jahr 2012 wurden umfangreiche Feldversuche durchgeführt. Voran ging diesen die Entwicklung und Überprüfung von Messmethodik und eingesetzter Messtechnik im Rahmen exemplarischer Vorversuche.

Die Feldstudie hatte drei Aufgaben:

- Evaluation fahrwerksspezifischer Parameter
- Bodendruckmessungen am Beispiel ausgewählter Versuchsfahrzeuge und unter variierenden Einsatzbedingungen
- Messungen des Bodeneindringwiderstands vor und nach Befahrung mit den Versuchsfahrzeugen.

Die Experimente zur Evaluation fahrwerksspezifischer Parameter sollten Erkenntnisse über das Triebkraft- und Rollwiderstandsverhalten und über die maximalen Zugkräfte und Wirkungsgrade gewinnen. Als Nebeneffekt sollte eine Überprüfung und Validierung der entsprechenden Vergleichsparameter aus der landtechnischen Grundlagenliteratur durchgeführt werden, welche meist nur beiläufig auf weinbauspezifische Aspekte verweist.

Der Fokus der Untersuchungen lag auf den dynamischen Bodendruckmessungen mit der Schlauchdrucksonde. Dabei wurden ausgewählte Fahrwerksvarianten bezüglich der Bodenbeanspruchung unter variierenden Belastungszuständen respektive von außen einwirkenden Verzögerungskräften beurteilt. Die unter Zuhilfenahme eines Bremsfahrzeugs eingestellten Verzögerungskräfte dienten der Simulation typischer Einsatzzustände von Weinbautraktoren. Dabei simulierten die im Punkt der heckseitigen Anhängerkupplung bzw. Ackerschiene angreifenden Verzögerungskräfte modellhaft die beim Antrieb von Anbaugeräten oder dem Befahren von schiefen Ebenen wirkenden Zug- bzw. Hangabtriebskräfte. Der systematische Versuchsaufbau erlaubte somit Rückschlüsse auf die Druckbelastung des Bodengefüges unterhalb der Fahrwerkskontaktfläche der Weinbautraktoren unter praxisüblichen Einsatzbedingungen.

Eine Quantifizierung der fahrzeuginduzierten Auswirkungen auf das Bodengefüge erfolgte exemplarisch durch Messungen des Bodeneindringwiderstands. Die Mes-

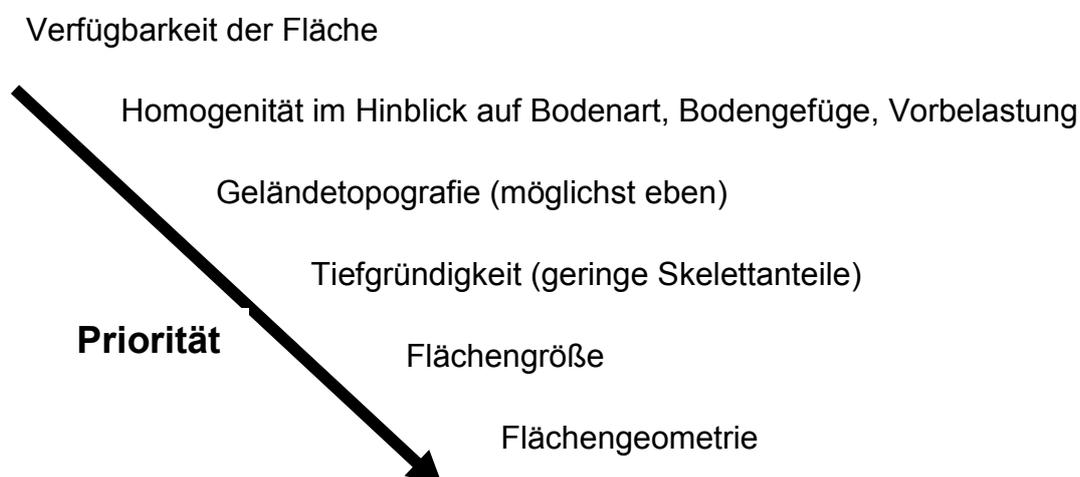
sungen wurden jeweils vor und nach Befahrung mit den Versuchsfahrzeugen vorgenommen. Der Eindringwiderstand als Messgröße unterlag dabei einer Beeinflussung durch die mechanische Druckbeanspruchung und der daraus hervorgehenden Bodenverdichtung. Er war somit auch abhängig von den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Determinanten der Bodentragfähigkeit. Der Eindringwiderstand wurde als praxistauglicher und unter Feldbedingungen reproduzierbarer Parameter für die Beurteilung und den Vergleich der individuellen Verdichtungsintensität ausgewählt.

3.1 Versuchsstandort

Die Freilandversuche wurden auf zwei verschiedenen Standorten durchgeführt. Die Vorversuche zur Entwicklung der Versuchsmethodik und Überprüfung der eingesetzten Messtechnik erfolgten 2011 auf einem weinbaulich genutzten Standort des Versuchsguts Burg Wildeck in Abstatt, Landkreis Heilbronn. Zur Durchführung der Exaktversuche stand während des gesamten Jahres 2012 eine Versuchsfläche in Gau-Algesheim, Landkreis Mainz-Bingen zur Verfügung. Diese Fläche war zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung nicht mit Weinreben bestockt und konnte somit vollflächig für die Versuchsdurchführung herangezogen werden (Abb. 31).

3.1.1 Standortkriterien

Die Auswahl der Versuchsfläche für die Exaktversuche orientierte sich an den nachfolgend dargestellten und priorisierten Kriterien:



Standorteignung für weinbauliche Nutzung



Abb. 31: Versuchsstandort in Gau-Algesheim, zum Zeitpunkt der Luftaufnahme noch mit Weinreben bestockt. Der rote Linienvverlauf bezeichnet den Begehungsverlauf für die Bodenbeprobung zur Klassifizierung des Versuchsstandorts (Luftbild modifiziert nach GEO PORTAL RLP 2013).

Die Versuchsfläche lag innerhalb der Großlandschaft „Süddeutsches Stufenland“ mit seinen Randgebirgen und dem Oberrheinischen Tiefland. Kleinräumiger differenziert konnte der Standort der linksrheinischen Niederterrasse zwischen den Städten Bingen und Mainz zugeordnet werden. Am Versuchsstandort war das vorherrschende kalkhaltige Ausgangsgestein mit pleistozänen Flugsanden und Dünen überdeckt (BFN 2012). Auf den Flächen der Niederterrasse herrschte sommerwarmes, trockenes Klima vor. Der jährliche Niederschlag lag im zehnjährigen Mittel der Klimastation Gau-Algesheim (2001 - 2011) bei 512 mm (AM RLP 2013).

3.1.2 Vorherrschende Bodenart

Im Rahmen der Standortbeschreibung wurde eine differenzierte Flächenbeprobung, insbesondere zur Bestimmung der vorliegenden Bodenart und Korngrößenzusammensetzung vorgenommen. Beprobt wurden die Horizonte 0 - 10 cm, 11 - 20 cm sowie 21 - 30 cm. Für die Probenentnahme wurde das Bohrstocksystem nach Pürckhauer verwendet. Zur Analyse erfolgte die Bildung von Mischproben aus jeweils 30 repräsentativ auf der Versuchsfläche verteilten Entnahmestellen je Untersu-

chungshorizont. Die Entnahme der Einzelproben fand systematisch, entsprechend einer N-Verteilung, gemäß Veröffentlichungen des LANDESKONTROLLVERBANDS BRANDENBURG (2013) statt. Der Begehungsverlauf zur Probenentnahme ist in Abb. 31 dargestellt. Die Klassifizierung der einzelnen Bodenbestandteile wurde in Anlehnung an die beschriebenen Korngrößenfraktionen des Feinbodens von SCHALLER (2000) bzw. SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (2010) vorgenommen. Die zugrundeliegende Systematik ist in Tab. 6 dargestellt.

Tab. 6: Kornfraktionen des Feinbodens. Die Kurzzeichen T (Ton), U (Schluff) und S (Sand) mit ihren Indizes kodieren die einzelnen Korngrößenfraktionen (modifiziert nach SCHALLER 2000; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2010).

Äquivalentdurchmesser		Fraktion	Unterfraktion	Kurzzeichen
µm	mm			
< 2,0	< 0,002	Ton		T
2 - 6,3	0,002 - 0,063	Schluff		U
2 - 6,3	0,002 - 0,0063		Feinschluff	fU
6,3 - 20	0,0063 - 0,02		Mittelschluff	mU
20 - 63	0,02 - 0,063		Grobschluff	gU
63 - 2000	0,063 - 2,0	Sand		S
63 - 125	0,063 - 0,125		feiner Feinsand	ffS
63 - 200	0,063 - 0,2		Feinsand	fS
200 - 630	0,2 - 0,63		Mittelsand	mS
630 - 2000	0,63 - 2,0		Grobsand	gS

Tab. 7 fasst die Ergebnisse der Korngrößenanalyse am Versuchsstandort zusammen.

Tab. 7: Korngrößenzusammensetzung am Versuchsstandort. Grundlage waren Mischproben aus jeweils n = 30 Einzelproben. Die Kurzzeichen folgen der Systematik zu Tab. 6.

Horizont	Skelett [%]	gS [%]	mS [%]	fS [%]	ffS [%]	S [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	U [%]	T [%]	S [%]
0 - 10 cm	0,94	0,9	26,9	40,7	14,7	83,2	4,1	2,2	1,7	8,0	8,8	83,2
11 - 20 cm	0,24	0,9	26,5	42,4	14,2	84,0	3,7	2,0	1,7	7,4	8,6	84,0
21 - 30 cm	0,17	0,8	26,8	41,0	14,5	83,1	4,1	2,0	1,9	8,0	8,9	83,1

Eine Inaugenscheinnahme der Gesamtfläche vor Rodung der Rebanlage hatte keine visuell erkennbaren Unterschiede bzgl. Bodenbeschaffenheit oder Habitus der auf-

stehenden Weinreben und Begrünpflanzungen ergeben. Daher wurde auf eine ge-sonderte Beprobung und Bodenuntersuchung einzelner Areale verzichtet.

Auf der Grundlage des erhobenen Korngrößenbefunds wurde der Boden am Ver-suchsstandort als lehmiger Sand der Bodenart St 2 (Bodenart 2 der Landwirtschaf-tlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten; LUFA) klassifiziert. Der Einordnung lag das Bodenartendreieck (Abb. 32) der AG BODEN (2005) zugrunde.

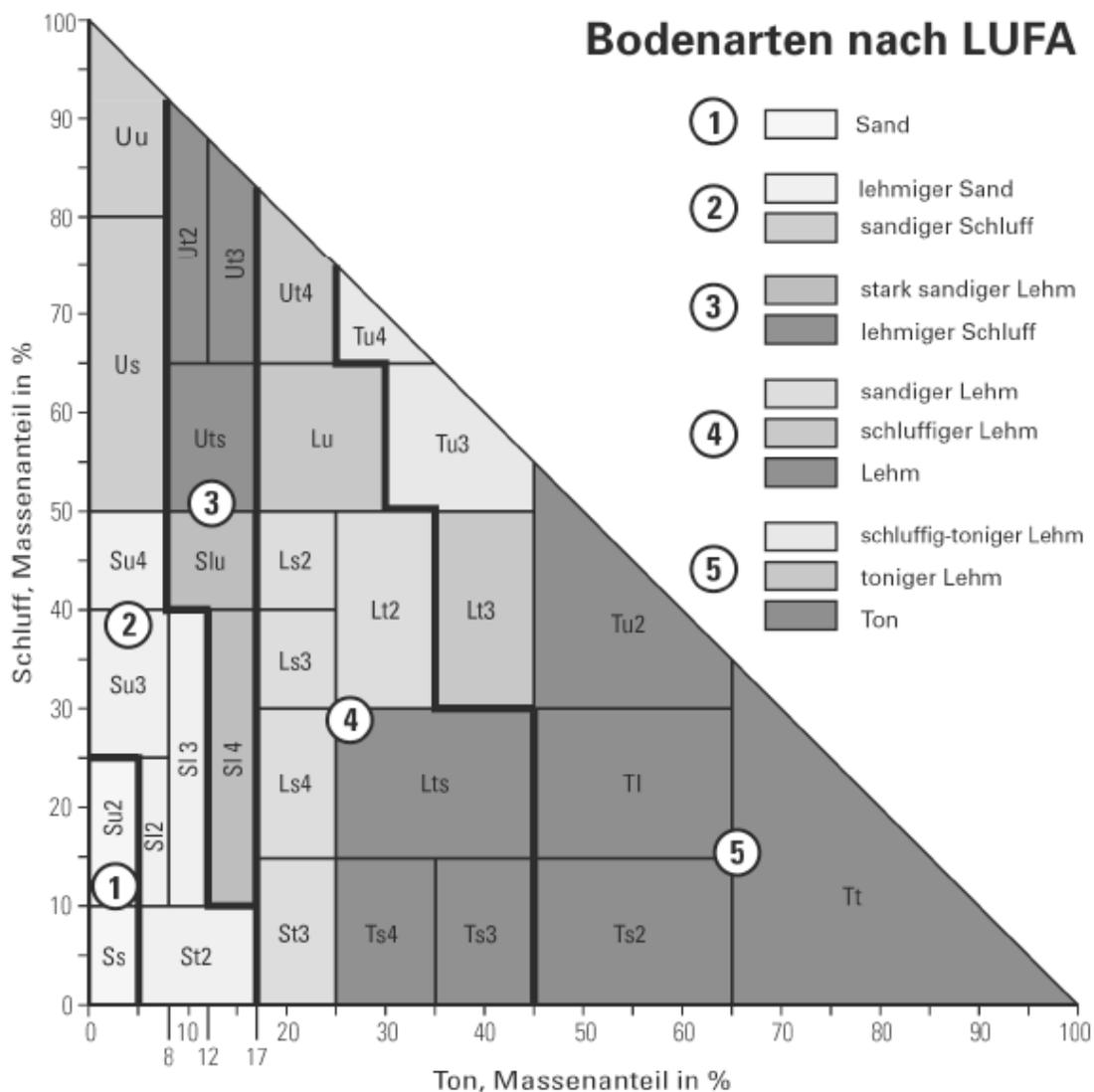


Abb. 32: Bodenartendreieck gemäß Kartieranleitung KA5 (AG Boden 2005).

3.1.3 Versuchsrelevante Flächenparameter

Die Trockenrohdichte des Bodens wurde mit der üblichen Standardmethodik entsprechend DIN 18125-1 (2010) bestimmt. Sie betrug $1,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Die Gesamtfläche wurde zusätzlich penetrometrisch auf eventuell vorhandene Verdichtungsareale und -horizonte hin untersucht. Hierzu erfolgte eine Sondierung der Fläche über 30 Einstiche hinweg. Für die Durchführung der Penetrometrie wurde ein Vertikal-Konus-Penetrometer, Typ Penetrologger, des Herstellers Eijkelkamp verwendet. Die verwendete Messtechnik und Methodik ist in Kapitel 3.10 detailliert beschrieben.

Der gravimetrische Wassergehalt des Bodens zum Zeitpunkt der penetrometrischen Sondierung betrug 10,7 Gew.-%. Die Bestimmung erfolgte durch Ofentrocknung entsprechend DIN 18121-1 (1998). Aus der Multiplikation des gravimetrischen Wassergehalts mit der bekannten Trockenrohdichte resultierte ein volumetrischer Wassergehalt von 15,3 Vol.-%.

Die Probenentnahme zur Bestimmung des Wassergehalts und die Sondierung des Bodeneindringwiderstands erfolgte an repräsentativen Entnahmestellen auf der Versuchsfläche analog zu der unter Kapitel 3.1.2 beschriebenen N-Verteilung.

Abb. 33 zeigt den vor Versuchsbeginn nachweisbaren Bodeneindringwiderstand am Standort. Charakteristisch ausgeprägt war eine Krumbasisverdichtung mit Ausdehnung bis in den Unterboden hinein. Die vertikale Ausdehnung erstreckte sich primär auf den Tiefenbereich von 20 - 60 cm mit Maximum bei 36 cm. Hier wurde mit 2,4 MPa der absolut höchste Eindringwiderstand gemessen. Darunter folgte ein etwa 10 cm mächtiger Horizont geringerer Verdichtung. Unterhalb dieser relativen Auflockerungszone war bis zur Tiefenbegrenzung der Sonde wiederum ein stetiger Anstieg des Eindringwiderstands nachweisbar.

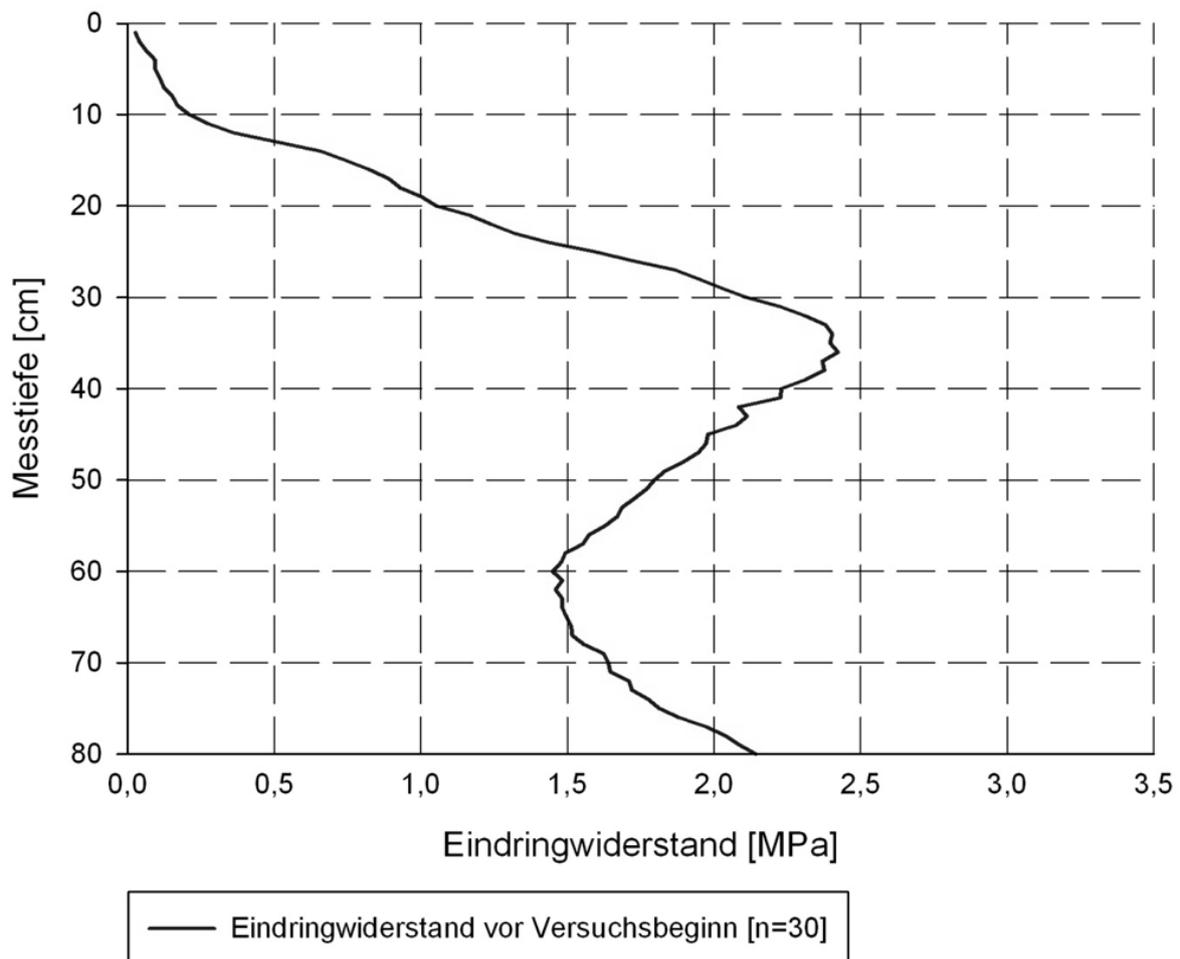


Abb. 33: Darstellung des vor Versuchsbeginn gemessenen Bodeneindringwiderstands am Versuchsstandort.

3.2 Versuchsfahrzeuge

Die Auswahl der Versuchsfahrzeuge erfolgte streng praxisorientiert. Aus der Vielzahl verfügbarer Bauarten wurden Schmalspurfahrzeuge für die Bewirtschaftung von Weinbaudirektzug- und Weinbausteillagen ausgewählt. Es handelte sich um folgende Fahrzeuge:

- a. Schmalspurtraktor in Standardbauweise mit Radfahrwerk und Achsschenkel- lenkung (Abb. 34)
- b. Schmalspur-Vierraupentraktor mit Knicklenkung (Abb. 35 und 36)
- c. Schmalspur-Kettentraktor in Standardbauweise (Abb. 37).

Die Versuchsfahrzeuge bildeten exemplarisch den Stand der Mechanisierung im Weinbau ab. Details zu den Bauarten sowie den spezifischen Einsatzbereichen sind Kapitel 2.2.2 zu entnehmen. Im Rahmen der Feldversuche kamen die Versuchsfahrzeuge in der typischen Serienausstattung zur Anwendung (vgl. die technischen Datenblätter im Anhang). Bauartbedingte Besonderheiten sind nachfolgend angeführt.

Das Versuchsfahrzeug 211V Vario TMS (Abb. 34) war ein Schmalspurtraktor in Standardbauweise mit Reifen unterschiedlicher Größe auf Vorder- und Hinterachse. Über die Serienausstattung hinaus war er mit einer aktiven niveauregulierenden Vorderachsfederung (Federweg 40 mm) und Wankabstützung ausgestattet. Um eventuelle Einwirkungen des aktiven Regelsystems auf die Untersuchungsparameter auszuschließen, wurde es für die Dauer der Versuche deaktiviert. Die Vorderachse konnte somit als starr angesehen werden, wobei ein Pendelweg der Vorderräder zur Geländeanpassung von $\pm 10^\circ$ verblieb (FEUERSTEIN 2005; FENDT 2012).



Abb. 34: Versuchsfahrzeug 211V Vario TMS (Weinbauschmalspurschlepper, Standardbauweise, unechter Allradantrieb), Hersteller Fendt, Bereifung Vorderachse (VA) Michelin 11 LR 16, Hinterachse (HA) Michelin 380/70 R 24, Stollenprofil XM 27.

Die Veränderung des Untersetzungsverhältnisses zwischen Motor und Fahrwerk im Fahrbetrieb erfolgte durch ein hydrostatisch-mechanisch leistungsverzweigtes Getriebe (Vario-Getriebe). Der Weinbautraktor verfügte über einen schaltbaren Allradantrieb sowie Lamellensperrdifferentialie für Vorder- und Hinterachse. Im Allradbetrieb lag die Umfangsgeschwindigkeit der Vorderachsreifen um rd. 3 % über der entsprechenden Geschwindigkeit der Hinterachsreifen. Diese, aus dem Übersetzungsverhältnis und dem Anrollumfang resultierende, mechanische Voreilung bewirkte eine Streckung des Antriebsstranges, Minderung der Verschleißanfälligkeit sowie Verbesserung der Lenkfähigkeit und Spurtreue.

Die Versuchsdurchführung erfolgte einheitlich bei eingekuppeltem Allradantrieb; die Sperrdifferentialie befanden sich im Freilauf. Das Getriebe-Motor-Managementsystem (TMS) war aktiv.

Das mit vier Bandlaufwerken ausgestattete Fahrzeug Mach 4 des Herstellers Carraro (Abb. 35) war den Schmalspurtraktoren in Knickbauweise zuzuordnen. Es handelte sich dabei um eine Weiterentwicklung des knickgelenkten Schmalspurtraktors Carraro SRX. Für den Weinbau war diese Antriebskonstruktion ein Novum.

In der Gerätegrundeinstellung erfolgte der Fahrtrieb über vier synchron angetriebene Bandlaufwerke der Vorder- und Hinterachse. Im Gegensatz zum konventionellen Radtraktor entfiel eine mechanische Voreilung. Die Bandlaufwerke waren in Dreiecks- oder Deltaform ausgeführt, wobei der formschlüssige Antrieb durch ein im oberen Laufwerksbereich lokalisiertes Kettenrad erfolgte. Das Kettenrad griff zur Kraftübertragung in entsprechend ausgeformte Antriebsstollen auf der Innenseite des Gummigurtbands ein. Die Bandführung erfolgte weiterhin über zwei Umlenk- und zwei zusätzliche Stützrollenpaare. Der Rollenzwischenraum diente dabei einer stabilen Führung des Gurtbands (Abb. 36).



Abb. 35: Versuchsfahrzeug Mach 4 (Weinbauschmalspurschlepper, Knickschlepper, Bandantrieb), Hersteller Carraro, Bandgröße 0,35 m x 1,14 m.



Abb. 36: Detailaufnahme eines Bandlaufwerks des Versuchsfahrzeugs Carraro Mach 4. Der Drehpunkt der Lagerungsschwinge ist mit einem gelben Punkt gekennzeichnet.

Zur Gewährleistung eines konstanten Bodenkontakts der Bandlaufwerke war die Verbindung der Fahrzeugachsen im Knickpunkt pendelnd konstruiert. Die Anordnung erlaubte ein Verschränken beider Achsen zueinander in einem Winkel bis zu 15° in Fahrzeugquerrichtung. Zusätzlich waren die Umlenk- und Stützrollen der Raupenelemente auf einer gemeinsamen Schwinge montiert. Die Schwinge war ebenfalls drehbar um einen zentralen Befestigungspunkt gelagert, woraus für das einzelne Raupenelement ein Ausgleichsweg von $8 - 11^\circ$ resultierte (der Drehpunkt ist in Abb. 36 gelb markiert).

Ein elektrohydraulisches Auskuppeln der Bandlaufwerke der Vorderachse war technisch möglich, jedoch für den praktischen Betrieb herstellerseitig nicht empfohlen (CARRARO 2012). Der Traktor verfügte über ein mechanisch schaltbares Wendegetriebe mit Untersetzungsgruppe. Vorder- und Hinterachse waren jeweils mit einem schaltbaren Sperrdifferential ausgestattet. Während der Versuche erfolgte der Fahrtrieb über alle vier im Gleichlauf befindlichen Bandlaufwerke und mit nicht eingearsteten Sperrdifferentialen.

Der Fahrtrieb des Schmalspurraupentraktors Geier 60 TLY (Abb. 37) basierte auf einem hydrostatisch heckangetriebenen Zweiraupenfahrwerk. Antriebselemente waren zwei formschlüssig angetriebene Gummigurtbänder. Im Unterschied zum Bandlaufwerk des Carraro Mach 4 erfolgte die Kraftübertragung zwischen Antriebsrad und Gummiband nicht durch Stolleneingriff, sondern durch Eingriff eines Zahnkranzes in entsprechende Aussparungen des Gummigurtbands. Das Laufwerk bestand aus insgesamt sieben Laufwerksrollen. Neben der vorderen und hinteren Umlenkrolle dienten fünf Stützrollen der Abstützung der Fahrzeugmasse gegenüber dem Boden. Die Stützrollen waren federnd gelagert. Der hydrostatische Fahrtrieb erlaubte eine stufenlose Verstellung der Fahrgeschwindigkeit. Eine differenzierte Drehzahlsteuerung der hydraulischen Antriebsmotoren des linken bzw. rechten Gummibands diente der Herbeiführung von Lenkbewegungen. Eine gleichartige Drehzahländerung bewirkte eine Änderung der Fahrgeschwindigkeit. Die Drehzahlbeeinflussung erfolgte über die spezifisch zur Verfügung gestellte Antriebsölmenge, welche über Hydraulikventile variiert werden konnte.



Abb. 37: Versuchsfahrzeug Geier 60 TLY (Schmalspurraupentraktor leichter Bauart; hydrostatischer zweisträngiger Raupenantrieb), Hersteller Geier, Bandgröße 0,25 m x 1,20 m.

Für die Versuche war der Raupentraktor mit einem Dreipunktkraftheber der Kategorie „Kat. 1“ ausgerüstet. Dieser wurde im Heckbereich über universell nutzbare Koppelunkte am Fahrzeugrahmen installiert.

In Tab. 8 sind die wesentlichen Eigenschaften der verwendeten Fahrzeuge zusammenfassend dargestellt:

Tab. 8: Übersicht über die technischen Daten der Versuchsfahrzeuge und ausgewählten Fahrzeugkonfigurationen.

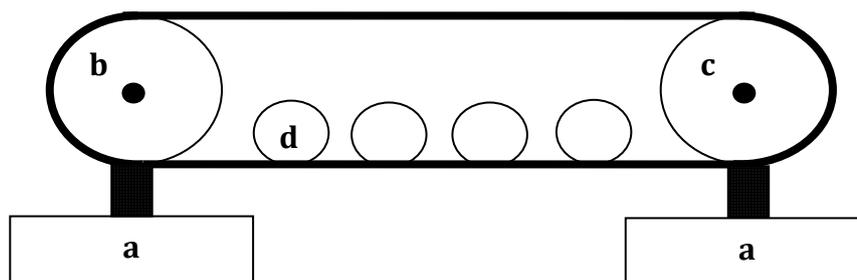
Fahrzeug	Fahrwerk/ Radstand/ Spurweite	Reifentyp/ Bandgröße ¹	Reifenfüll- druck [kPa]	Fahrzeug- masse [kg]	Radlast/ Bandlast [kN]	Kontakt- flächendruck [kPa] ²
Fendt 211V Vario	Radfahrwerk Achsschenkel- lenkung 2,16 m 0,95 m	VA 11 LR 16 HA 380/70 R 24	VA 120,0 HA 80,0	3.160	VA 6,7 HA 8,8	VA 87,4 HA 58,4
Carraro Mach 4	Bandfahrwerk Knicklenkung 1,51 m 0,95 m	0,35 m x 1,14 m (4-fach)	-	3.380	VA 10,7 HA 5,9	VA 26,8 HA 14,8
Geier 60 TLY	Bandfahrwerk Hydrostat 1,54 m 0,85 m	0,25 m x 1,94 m (2-fach)	-	1.711	8,4	17,3

¹ VA: Vorderachse; HA: Hinterachse

² nach Simulationssoftware TASC (Tyres/Tracks and Soil Compaction DISERENS 2010)

Die in Tab. 8 angegebenen Fahrzeugmassen waren das Resultat einer Verwiegung der Fahrzeuge vor Versuchsbeginn mit einer geeichten Fahrzeugwaage. Dabei wurde neben der Gesamtmasse zusätzlich die Masseverteilung auf Vorder- und Hinterachse bestimmt. Die Verwiegung erfolgte am versuchsfertig mit Messtechnik und funktionsnotwendigen Betriebsstoffen ausgerüsteten Fahrzeug. Die Masse des Fahrzeugführers blieb zunächst unberücksichtigt; sie wurde für die Versuchsauswertung der jeweiligen Fahrzeugmasse zugeschlagen.

Zur Verwiegung des Raupenschleppers Geier 60 TLY wurde dieser auf zwei Stahlträger gelagert. Die Stahlträger wurden unter dem Mittelpunkt der vorderen Umlenckrolle und des hinteren Antriebstruras positioniert (Abb. 38). Die Lauffläche der Gummikette war zum Zeitpunkt der Verwiegung vollflächig von der Fahrbahn abgehoben.



a: Wägeeinrichtung b: Umlenkrolle c: Antriebstrass d: Stützrolle

Abb. 38: Versuchsaufbau zur Verwiegung des Zweiraupentraktors Geier 60 TLY.

3.2.1 Schwerpunktlage der Versuchsfahrzeuge

Der Schwerpunkt ist als gedachter Angriffspunkt der Gewichtskraft definiert. Seine Lage ist unabhängig von externen Kräften und Momenten (BLUMENTHAL 1985). Für die Interpretation der geplanten Bodendruckmessungen war es erforderlich, neben einer dynamischen Achslastverlagerung im Zuge der Versuchsdurchführung auch eventuelle Anteile einer neigungsbedingten Achslastverlagerung der Fahrzeuge einzubeziehen. Dies setzte die Kenntnis der Schwerpunktlage der Versuchsfahrzeuge voraus.

Von besonderer Bedeutung für die vorliegende Arbeit war die Schwerpunktlage auf der Fahrzeuglängs- und Fahrzeugvertikalachse. Diese übte direkten Einfluss auf die Lastabstützung über die Vorder- und Hinterachse sowie über die links- und rechtsseitigen Räder/Bänder aus. Die Lage auf der Längsachse wurde entsprechend Gl. 3-1 berechnet, wobei b die Lage des Schwerpunkts (gemessen ab Zentrum Hinterachse) und l den Radstand, jeweils in mm, angibt. Die Vordachlast F_{VA} sowie die Gewichtskraft des Fahrzeugs F_G wurde durch Wägung ermittelt.

$$b = \frac{F_{VA} \cdot l}{F_G} \quad (\text{Gl. 3-1})$$

Auf eine experimentelle Bestimmung der Höhenlage der Masseschwerpunkte auf der Vertikalachse wurde in Ermangelung geeigneter Hebetechnik verzichtet. Es wurde auf entsprechende Angaben der jeweiligen Fahrzeughersteller zurückgegriffen, soweit diese zu entsprechenden Auskünften bereit waren. Gemäß den durchgeführten Berechnungen bzw. Herstellerangaben waren folgende Schwerpunktlagen der einzelnen Versuchsfahrzeuge anzunehmen (Tab. 9):

Tab. 9: Schwerpunktlage der Versuchsfahrzeuge gem. Herstellerangaben und eigenen Berechnungen.

Fahrzeugachse	Fendt 211V Vario	Carraro Mach 4	Geier 60 TLY
Längsachse (ab Zentrum Hinterachse)	916 mm ²	971 mm ²	1.007 mm ²
Vertikalachse (ab Referenzfläche)	748 mm ²	~ 600 mm ¹	380 mm ¹

¹ gem. Herstellerangabe. ² gem. eigener Berechnung.

Für die Orientierung des Schwerpunkts auf der Fahrzeugquerachse wurde vereinfachend eine einheitliche mittige Lage im Schlepperzentrum angenommen.

Die Berechnung der neigungsbedingten Veränderung der Achs- und Radlasten erfolgte in zwei Schritten. Im ersten Schritt erfolgte die Berechnung der Hangabtriebskraftkomponente F_H auf der schiefen Ebene aus der fahrzeugspezifischen Gewichtskraft F_G unter Berücksichtigung des Neigungswinkels α in Längs- oder Querrichtung (Gl. 3-2).

$$F_H = F_G \cdot \sin \alpha \quad (\text{Gl. 3-2})$$

Im zweiten Schritt wurde die Lastumverteilung F_U auf einzelne Räder oder Bänder unter Einbeziehung der vertikalen Schwerpunkthöhe h über der Fahrbahn sowie des Achs- bzw. Radabstands l berechnet (Gl. 3-3).

$$F_U = \frac{F_H \cdot h}{l} \quad (\text{Gl. 3-3})$$

3.3 Messtechnik

Nachfolgend wird die Ausrüstung der Versuchsfahrzeuge und Bodendruckmessstellen mit der Messtechnik beschrieben. Weitergehende hier nicht aufgeführte technische Spezifikationen sind dem Anhang zu entnehmen.

3.3.1 Mobile Datenerfassung auf dem Versuchsfahrzeug

Der Messverstärker HBM Spider8/SP55 für die kontinuierliche Dokumentation der Daten war über serielle Schnittstellen mit folgenden Sensoren verbunden:

- Radarsensor, Hersteller John Deere
125 - 135 Impulse je m zurückgelegter Wegstrecke, Impulszahl variiert einbauort- und ausrichtungsabhängig
- Getriebesensor
40 - 130 Impulse je m zurückgelegter Wegstrecke, Impulszahl variiert bauartbedingt und aufgrund der Sensorlage im Antriebsstrang
- Neigungssensor Typ IS 40, Hersteller Kübler
Messbereich: $\pm 60^\circ$, Auflösung: $< 0,15^\circ$, absolute Genauigkeit: $0,5^\circ$
- Infrarot-Lichtschranke mit Reflektor
- Kraftmessdose Typ U2A, Hersteller HBM
Messbereich 5000 kg, Genauigkeitsklasse D1
- Kraftmessdose (Kranwaage).

Die jeweiligen Messroutinen wurden über die Software Catman 32 Professional des Herstellers HBM konfiguriert. Jedes Versuchsfahrzeug war mit einem Messrechner ausgestattet. Die Messroutine wurde jeweils vor Versuchsbeginn manuell gestartet. Die Datenablage erfolgte im ASCII-Textformat, um den Import in und die Verarbeitung durch ein Tabellenkalkulationsprogramm zu ermöglichen. Die Abtastrate des Messverstärkers betrug 100 Hz.

3.3.2 Stationäre Bodendruckmessung

Der Messverstärker HBM Somat eDAQ wurde mit folgenden Sensoren verbunden:

- Schlauchdrucksonden, verändert nach BOLLING und SÖHNE (1982) sowie BOLLING (1984, 1986, 1987), ausgerüstet mit Drucksensoren Typ PA8P, Hersteller HBM; Messbereich 0 - 50 bar, Genauigkeitsklasse 0,3
- GPS-Empfangsantenne zur Verortung der Messposition.

Der Messverstärker verfügte über ein internes Skript zur Messdatenerfassung und Aufzeichnung. Die Konfiguration wurde über ein Webinterface, welches über Standardrechner innerhalb eines Netzwerkes mittels TCP/IP Protokoll abrufbar war, vorgenommen. Die Datenspeicherung erfolgte geräteintern im herstellerspezifischen SIE-Format. Dieses ermöglichte eine Konvertierung und den Export in das ASCII-Textformat. Die Messroutine wurde manuell vor Versuchsbeginn gestartet. Die Abtastrate betrug 50 Hz.

3.3.3 Radarsensor und Getriebesensor

Der installierte Radarsensor erlaubte unter Ausnutzung des Doppler-Effekts und unabhängig von einem gegebenenfalls auftretenden Antriebsschlupf die Messung der tatsächlichen Vorwärtsbewegung des Versuchsfahrzeugs über Grund. Parallel dazu ließ das Signal des fahrzeugeigenen Getriebesensors (fahrzeugspezifische Hallsonden zur Drehzahlmessung im Antriebsstrang) Rückschlüsse auf die theoretisch zurückgelegte Wegstrecke zu. Diese leitete sich von der Rotationsfrequenz und dem Abrollumfang des Antriebsrades bzw. des Antriebsbands ab. Sowohl Radar-, als auch Getriebesensor erzeugten eine bauart- und montagebedingt spezifische Anzahl von Spannungsimpulsen je zurückgelegter Streckeneinheit.

Fahrzeugabhängig wurde der Radarsensor schwingungsminimiert und in einer Montagehöhe von 0,35 - 0,50 m über Bodenniveau installiert.

Durch Kalibrierung konnte die spezifische Impulsanzahl auf die einheitliche Wegstrecke von 1,0 m bezogen werden. Diese erfolgte durch das Befahren eines definierten Streckenabschnitts von 25 m bzw. 30 m Länge vor Versuchsbeginn und anschlie-

ßende Auswertung der Sensormesswerte. Die Kalibrierung wurde auf der Asphaltfahrbahn bei einer Fahrgeschwindigkeit von $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ vorgenommen. Das Verfahren für die Schlepper Fendt 211V Vario und Carraro Mach 4 folgte einem zweistufigen Aufbau, wobei das Versuchsfahrzeug die Messstrecke durch aktives Befahren und im Schlepp durchquerte. Das Fahrzeug Geier 60 TLY konnte bauartbedingt nicht geschleppt werden. Der erforderliche Freilauf der Antriebsketten wäre ausschließlich durch weitgehende technische und fahrsicherheitsrelevante Eingriffe in den hydrostatischen Antriebsstrang zu erreichen gewesen.

Aus den Einzelwerten einer fahrzeugspezifisch dreimalig wiederholten Messung wurden Mittelwerte sowie Standardabweichungen und Variationskoeffizienten als Streuungsmaße berechnet. Die ermittelten und in Tab. 10 dargestellten Kalibrierdaten waren Grundlage für die im weiteren Verlauf dargelegte Versuchsmethodik zur Berechnung von Antriebsschlupf und verschiedenen Koeffizienten.

Tab. 10: Experimentell ermittelte mittlere Impulsanzahl der Sensorik je Wegstreckeneinheit [m] als Kalibrierwert für die Wegstreckenberechnung.

Fahrzeug	n	Radarsensor/ Getriebesensor [Impulse·m ⁻¹]	SD	VK [%]
Fendt 211V	6	126,84	0,62	0,5
Vario	6	126,63	1,22	1,0
Carraro Mach 4	6	127,32	0,53	0,4
	6	100,09	0,49	0,5
Geier 60 TLY	3	130,07	0,42	0,3
	3	39,72	0,10	0,2

3.3.4 Neigungssensor

Der Neigungssensor IS40 basierte auf einem mikro-elektro-mechanischen System (MEMS). Das Messprinzip beruhte auf der lagebedingten Auslenkung einer Referenzmasse innerhalb eines gekapselten Feder-Masse-Systems; der Grad der Auslenkung wurde für die Lageberechnung herangezogen. Der Sensor lieferte ein analoges Spannungssignal im Bereich 0,1 - 4,9 V. Aus dem Gesamtmessbereich von 120° resultierte hieraus eine richtungsabhängige Spannungsänderung des Ausgangssignals von $\pm 0,04 \text{ V/}^\circ$.

Die Kalibrierung des Neigungssensors erfolgte auf einer waagerechten Referenzfläche. Hierzu wurde die Messroutine bei unbewegtem Fahrzeug ausgeführt und die Messwerte dokumentiert (Tab. 11). Durch Verrechnung des Referenzwertes bei waagerechter Fahrzeugpositionierung mit den aufgezeichneten Messwerten während der Versuchsfahrten ließ sich die jeweilige tatsächliche Fahrzeugneigung im Gelände ermitteln.

Tab. 11: Experimentell ermittelte Referenzwerte des Neigungswinkelsensors in Fahrzeugquer- (X-Achse) und Fahrzeuglängsrichtung (Y-Achse) als Kalibrierwert für die Neigungskorrektur.

Fahrzeug	Spannung [V]	
	X-Achse	Y-Achse
Fendt 211V Vario	-0,0977	0,0858
Carraro Mach 4	2,5567	2,5290
Geier 60 TLY	-0,0222	0,0270

3.3.5 Infrarot-Lichtschanke mit Reflektor

Die Infrarotlichtschranke sendete kontinuierlich einen Lichtstrahl aus. Eine Unterbrechung bzw. Reflexion des Strahls wurde durch einen Sensor detektiert und digital in Form eines Spannungssignals durch den Messverstärker protokolliert.

Im Rahmen der Versuchsdurchführung kam der Lichtschranke keine unmittelbare messtechnische Bedeutung zu. Vielmehr diente der induzierte Spannungsimpuls während des Ein- und Ausfahrens des Versuchsfahrzeugs in den Bereich der Bodendruckmessstellen einer Verortung des Messbereichs im protokollierten Datenmaterial.

3.3.6 Kraftmessdose

Für die Feldversuche wurden zwei verschiedene Kraftmessdosen eingesetzt. Dabei diente eine kalibrierfähige Kraftmessdose vom Typ U2A des Herstellers HBM als Kraftaufnehmer zur Dokumentation der Zug- und Verzögerungskräfte.

Die Signalausgabe der Kraftmessdose erfolgte als Spannungsverhältnis mV/V. Die im Praxisversuch gemessene Kraft F in N wurde nach Gl. 3-4 berechnet. Die Konstante 5.000 entsprach in diesem Zusammenhang der Nennbelastung der Kraftmessdose in kg, 2 dem spezifischen Kennwert der Kraftmessdose in mV/V und g_n der Normalfallbeschleunigung. Die Variable X definierte den jeweils protokollierten Messwert, angegeben als Spannungsbetrag in mV.

$$F = \frac{5.000}{2} \cdot X \cdot g_n \quad (\text{Gl. 3-4})$$

Eine weitere Kraftmessdose hatte keine messtechnische Bedeutung; sie diente ausschließlich der Visualisierung der jeweils aktuell anliegenden Verzögerungskraft für den Fahrer des Bremsfahrzeugs.

3.3.7 Schlauchdrucksonde

Die Schlauchdrucksonden bestanden aus einem Edelstahlrohr von 1.200 mm Länge und 12 mm Außendurchmesser. Am vorderen Ende war ein flexibler Silikonschlauch von 100 mm Länge und einem Außendurchmesser von ebenfalls 12 mm als Druckaufnehmer befestigt. Der Silikonschlauch wurde mit einer konzentrischen Spitze aus Messing dicht verschlossen.

Das gegenüberliegende Rohrende mündete in einen Druckzylinder mit Flüssigkeitsreservoir. Der Druckzylinder ermöglichte über eine Rändelschraube die Einstellung eines definierten Vordrucks im hydraulischen System. Über ein eingefügtes Abzweigstück waren ein analoges Manometer mit Schleppzeiger sowie ein digitaler Druckaufnehmer eingebunden (Abb. 39).

Zur Messung war das gesamte System blasenfrei mit einer Wasser-Glycerin-Mischung gefüllt und dicht verschlossen. Die formschlüssige Verbindung zwischen Sonde und umgebendem Bodenmaterial wurde für die erstmalige Überfahrt über eine Messstelle durch die Einstellung eines Vordrucks von 10 kPa gewährleistet. Für

die nachfolgenden Überfahrten wurde der jeweils aus der vorherigen Überfahrt persistierende Sondendruck als Vordruck beibehalten.

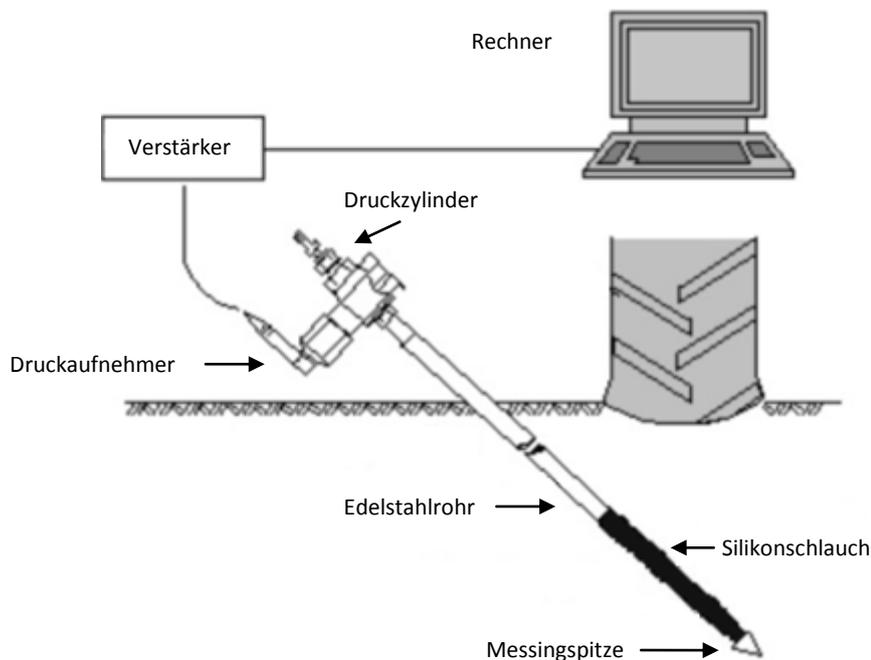


Abb. 39: Schematischer Aufbau der Schlauchdrucksonde (modifiziert nach WEIßBACH 1994).

3.4 Schlupfmessung

Der Antriebsschlupf der Versuchsfahrzeuge wurde in Abhängigkeit zur Fahrgeschwindigkeit untersucht. Gleichzeitig wurde der fahrzeugspezifische Nullschlupf als Bezugsgröße für die nachfolgenden Berechnungen verschiedener Koeffizienten bestimmt.

Die Versuchsfahrzeuge durchfahren in der Ebene eine definierte Messstrecke von 30 m Länge in freier Fahrt bzw. in geschlepptem Zustand. Dabei wirkte sich die jeweils erforderliche Kraft zur Überwindung des angreifenden Rollwiderstands sowie übriger fahrzeugimmanenter Widerstände als messtechnisch nachweisbarer Schlupf aus.

Die als Schlupf bezeichnete Abweichung zwischen tatsächlich zurückgelegtem Weg und dem theoretischen Abrollumfang wurde nach den Gleichungen 3-5 und 3-6 be-

rechnet. Dabei ist s_0 der theoretische schlupflose Abrollumfang, s der tatsächlich zurückgelegte Weg, v_0 die schlupflose nominelle Geschwindigkeit und v die Translations- oder tatsächliche Geschwindigkeit. Die nominelle Geschwindigkeit entspricht dem Produkt aus dem Radius r des Rads/Bands und der Winkelgeschwindigkeit ω .

$$i = \frac{(s_0 - s)}{s_0} = \frac{(v_0 - v)}{v_0} \quad (\text{Gl. 3-5})$$

$$v_0 = r \cdot \omega \quad (\text{Gl. 3-6})$$

Die Wegstrecken s_0 und s in m wurden durch Division der aufgezeichneten Impulszahlen von Getriebe- und Radarsensor während des Befahrens der Messstrecke und den fahrzeugspezifischen Kalibrierdaten gem. Tab. 10 berechnet. Die Berechnung ist in den Gleichungen 3-7 und 3-8 dargestellt.

$$s_0 = \frac{\text{Imp. Getriebe}}{\text{Kalibrierfaktor Getriebe}} \quad (\text{Gl. 3-7})$$

$$s = \frac{\text{Imp. Radar}}{\text{Kalibrierfaktor Radar}} \quad (\text{Gl. 3-8})$$

Die Schlupfmessung erfolgte auf den Fahrbahnuntergründen Asphalt und Sand, bei Geschwindigkeiten von $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und $2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. In jedem Geschwindigkeitsbereich wurde eine dreimalige Wiederholung des Experiments durchgeführt; dafür wurde jeweils ein unbefahrenes Teilstück der Versuchsfläche genutzt. Für den Radtraktor Fendt 211V Vario erfolgte zusätzlich eine getrennte Betrachtung des Hinter- und Allradantriebs.

3.5 Bestimmung der Rollwiderstandskoeffizienten

Die Rollwiderstandskoeffizienten wurden für die Fahrbahnuntergründe Sand und Asphalt berechnet. Der Rollwiderstandskoeffizient c_R ist definiert als Quotient aus erforderlicher Kraft F_S zum gleichmäßigen Schleppen des Versuchsfahrzeugs und dessen spezifischer Gewichtskraft F_G (Gl. 3-9). Der Koeffizient stellt somit eine dimensionslose Größe zur Klassifizierung der summarisch angreifenden Rollwiderstände an Antriebsrädern oder -bändern dar.

$$c_R = \frac{F_S}{F_G} \quad (\text{Gl. 3-9})$$

Das jeweilige Versuchsfahrzeug wurde im betriebsbereiten Zustand gleichmäßig über eine ebene Messstrecke von 30 m Länge geschleppt und die benötigte Schleppkraft aufgezeichnet. Der Antriebsmotor war in Betrieb, jedoch war die kraftschlüssige Verbindung zwischen Motor und Fahrwerk unterbrochen. Das Getriebe befand sich im Freilauf. Das Versuchsfahrzeug Fendt 211V Vario war mit einem stufenlos arbeitenden Getriebe mit mechanisch-hydrostatischer Leistungsverzweigung ausgestattet. Das vollständige Auskuppeln dieses Getriebes erfolgte durch mechanische Betätigung einer gesonderten Ausrückevorrichtung am Fahrzeugheck.

Für das Versuchsfahrzeug Geier 60 TLY wurde kein Rollwiderstandskoeffizient ermittelt.

Die spezifische Gewichtskraft F_G in kN wurde aus der Fahrzeugmasse durch Multiplikation mit der Normalfallbeschleunigung $g_n = 9,80665$ berechnet.

Die Bestimmung des Rollwiderstandskoeffizienten erfolgte bei einer Geschwindigkeit von $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Auf jedem Fahrbahnuntergrund wurde eine dreimalige Wiederholung des Experiments auf jeweils unbefahrenen Teilflächen durchgeführt.

3.6 Bestimmung der Triebkraftkoeffizienten

Die fahrzeugspezifischen Triebkraftkoeffizienten k wurden für den Versuchuntergrund Sand berechnet. Der Triebkraftkoeffizient ist definiert als Quotient aus Zugkraft F_T und Gewichtskraft F_G des Versuchsfahrzeugs (Gl. 3-10). Der Koeffizient ist di-

mensionslos und gibt an, welcher Anteil der spezifischen Gewichtskraft des Fahrzeugs effektiv in Zugkraft umgesetzt werden kann.

$$k = \frac{F_T}{F_G} \quad (\text{Gl. 3-10})$$

Die maximal erreichbare Zugkraft F_T wurde innerhalb der ebenen Versuchsparzelle T , durch Abbremsversuche experimentell ermittelt. Parallel dazu wurde der Antriebschlupf aufgezeichnet bzw. über die ermittelten Wegstrecken berechnet. Das jeweilige Versuchsfahrzeug wurde durch ein nachfolgendes und kraftschlüssig gekuppeltes Bremsfahrzeug einer Verzögerungskraft ausgesetzt (Abb. 40). Die Bremskraftsteigerung erfolgte progressiv bis zum vollständigen Durchdrehen der Antriebsräder bzw. Bänder.

Die Berechnung der spezifischen Gewichtskraft F_G folgte analog zur der in Kapitel 3.5 beschriebenen Vorgehensweise.

Die Bestimmung des Triebkraftkoeffizienten wurde für alle Fahrzeuge bei den Geschwindigkeiten $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und $1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ vorgenommen. Es erfolgte eine jeweils dreifache Wiederholung der Experimente auf zuvor unbefahrenen Teilflächen.

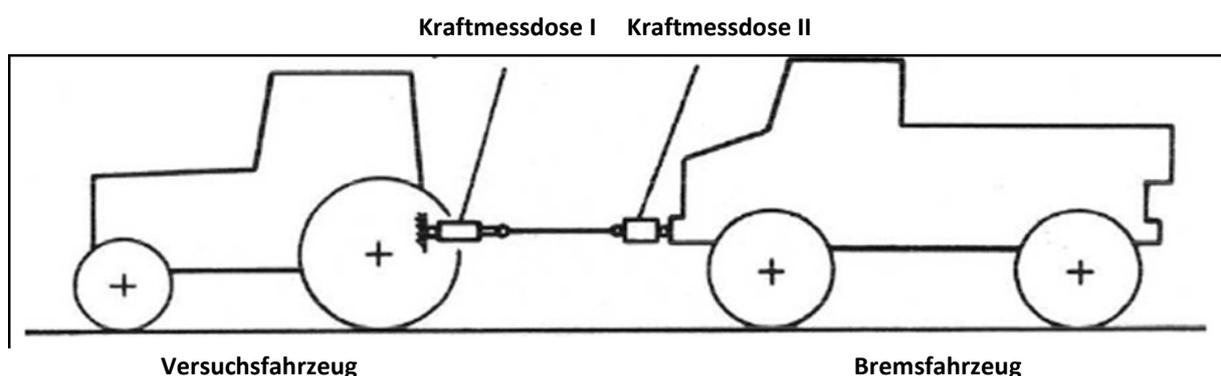


Abb. 40: Aufbau zur Abbremsung der Versuchsfahrzeuge im Rahmen der Fahrversuche und der dynamischen Bodendruckmessungen. Die kalibrierte Kraftmessdose I diente der Datenerfassung; Kraftmessdose II visualisierte die anliegende Verzögerungskraft für den Fahrer des Bremsfahrzeugs. Zur Bestimmung der Rollwiderstandskoeffizienten wurde das Versuchsfahrzeug geschleppt (modifiziert nach BÖTTINGER et al. 2011).

3.7 Bestimmung der Fahrwerkswirkungsgrade

Der Fahrwerkswirkungsgrad η ist definiert als Produkt aus Triebkraftkoeffizient k und dem effektiven Vorfahrtanteil des Schlepperfahrwerks. Daraus folgt, dass sich der Wirkungsgrad mit zunehmendem Schlupfanteil des Fahrwerks verringert.

Der effektive Vorfahrtanteil wird als Term $(1-i)$ dargestellt, wobei i dem Schlupfanteil der Vorwärtsbewegung entspricht (Gl. 3-11).

$$\eta = k \cdot (1 - i) \quad (\text{Gl. 3-11})$$

Erreichte der Schlupfanteil einen Wert von 1, entsprechend 100 % Schlupf, drehte das Fahrwerk ohne Vorwärtsbewegung auf der Stelle durch. In diesem Fall belief sich der Wirkungsgrad auf Null.

Die Berechnung der Wirkungsgrade für die Versuchsfahrzeuge erfolgte auf Grundlage der in Kapitel 3.6 erhobenen Messwerte zu den Triebkraftkoeffizienten und Antriebschlupfwerten.

3.8 Dynamische Bodendruckmessung

Die Versuchsfläche wurde zur Versuchsvorbereitung wie folgt vollflächig maschinell bearbeitet:

- Lockerung mittels Schichtengrubber; Arbeitstiefe 25 cm
- oberflächliche Einebnung mittels Ackerfräse; Arbeitstiefe 5 cm.

Die Bearbeitungsschritte erfolgten jeweils 10 Tage vor Versuchsdurchführung. Die Bearbeitung der Versuchsfläche wurde derart vorgenommen, dass die anzulegenden Versuchsblöcke zur Durchführung der Bodendruckmessungen jeweils im Beetbereich zwischen zwei Fahrspuren lagen und somit nicht direkt befahren wurden. Die vorab durchgeführte Bodenbearbeitung diente der Bereitung eines anthropogen-homogenisierten Bodengefüges und der Schaffung vergleichbarer Versuchsbedingungen für die zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführten Versuche.

Zur Versuchsdurchführung wurde die Versuchsfläche in 12 Parzellen *V1* - *V12* mit einer Breite von jeweils 4 m und einer Länge von jeweils 9 m gegliedert (Abb. 41). Die Verteilung der Einzelversuche erfolgte im Sinne einer minimierten Flächeninanspruchnahme. Für die Versuche mit dem Radtraktor Fendt 211V Vario wurden die Parzellen *V1* - *V4* herangezogen. Carraro Mach 4 und Geier 60 TLY schlossen sich auf den Parzellen *V5* - *V8* bzw. *V9* - *V12* an. Auf eine Randomisierung der Einzelversuche innerhalb der ausgewiesenen Versuchsblöcke wurde aufgrund der nachgewiesenen Standorthomogenität verzichtet. In diesem Zusammenhang sei auch auf die Vielzahl der von anderen Forschungsgruppen durchgeführten systematischen Versuche in der Bodenrinne verwiesen (z. B. ANSORGE und GODWIN 2007, 2008, 2009). Auch OLF (1993) beschrieb Eignung und Vorzüge einer blockweisen Versuchsanordnung von Bodendruckmessstellen auf ausreichend homogenen Versuchsstandorten.

Die mit *T* gekennzeichnete Sonderparzelle erstreckte sich über die gesamte Länge der Versuchsfläche. Die Sonderparzelle war den Versuchen zur experimentellen Bestimmung des Triebkraftverhaltens der Versuchsfahrzeuge vorbehalten. Der rot hervorgehobene Bereich wurde nicht genutzt, da dieser im Unterschied zu den nahezu ebenen Versuchspartellen *V1* - *V12* eine zunehmende Hangneigung aufwies.



Abb. 41: Anlage des Feldversuchs und der jeweiligen Versuchspartellen am Standort in Gau-Algesheim (Luftbild modifiziert nach GEOPORTAL RLP 2013).

3.8.1 Versuchsaufbau

Die Vorbereitung und Durchführung der Bodendruckmessungen einem standardisierten Verfahrensablauf:

1. Auswahl der Versuchspartelle auf dem Versuchsstandort
2. Installation einer Rahmenkonstruktion zur Sondenabstützung
3. Aushub der Messgrube in der jeweiligen Messtiefe
4. Überprüfen und Entlüften der Schlauchdrucksonden
5. Einbringen und paralleles Ausrichten der Schlauchdrucksonden im Abstand von jeweils 0,25 m zueinander
6. Ausrichtung des ersten Reflektors der Lichtschranke in einem rechtwinkligen Abstand von 0,66 m vor der ersten Sonde
7. Ausrichtung des zweiten Reflektors der Lichtschranke in einem Abstand von 2,0 m nach dem ersten Reflektor
8. Überprüfung aller einzuhaltenden Maße
9. Schließen der Messgrube mit dem seitlich abgelagerten Erdaushub und Ein-ebnung der Oberfläche, Markierung der Sondenmitte
10. Anschluss der digitalen Druckaufnehmer an den Messverstärker

11. Einstellung des Vordruckniveaus der Schlauchdrucksonden von 10 kPa
12. Starten der Aufzeichnung und Durchführung der Messüberfahrten.

Die gemäß Schema vorbereiteten Messparzellen (Abb. 42 und Abb. 43) wurden insgesamt viermal in Folge mit dem jeweiligen Versuchsfahrzeug befahren, wobei die erste Überfahrt primär der Rückverdichtung des durch den Versuchsaufbau gestörten Bodengefüges diente.

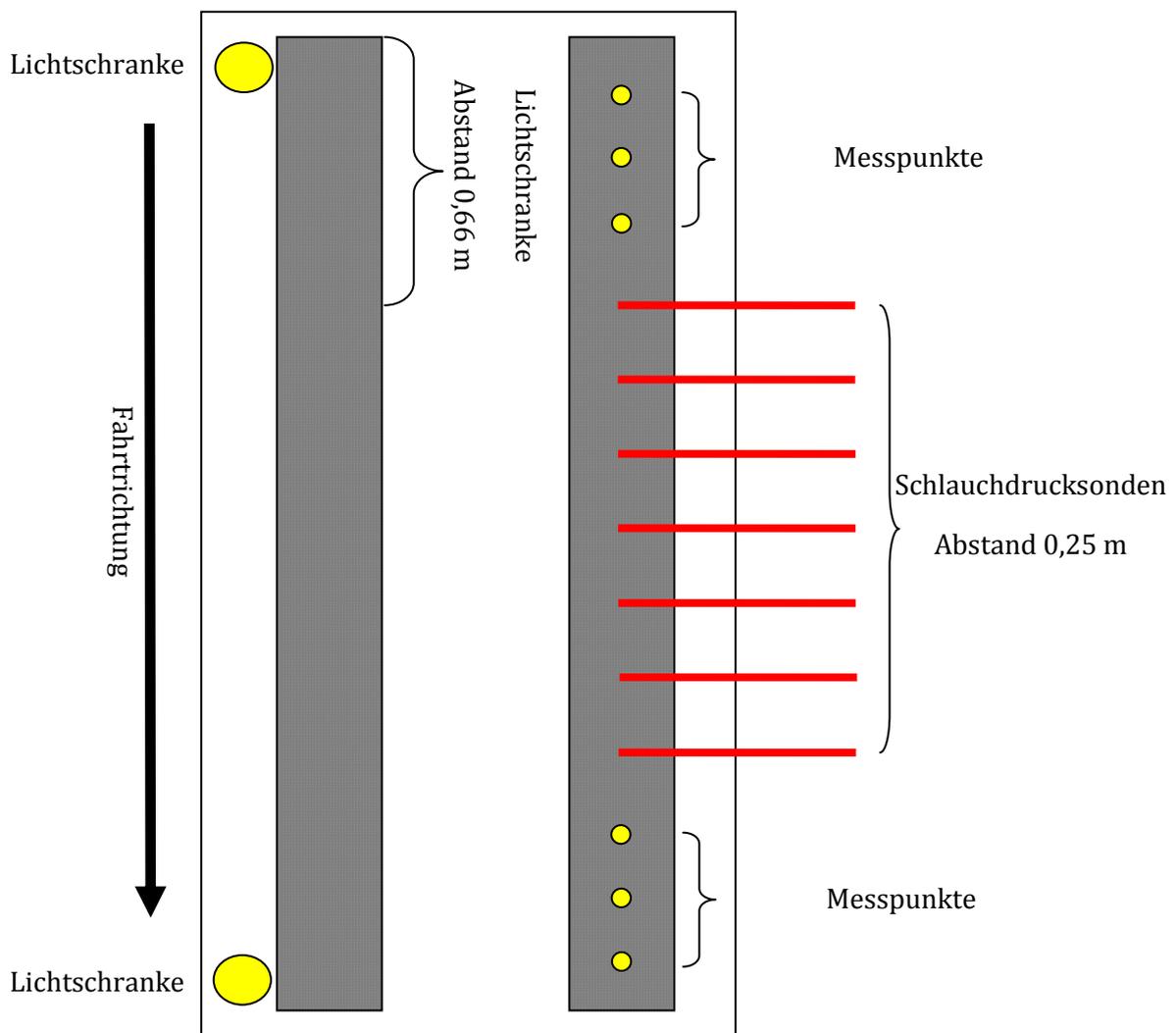


Abb. 42: Versuchsaufbau zur dynamischen Bodendruckmessung mittels Schlauchdrucksonden.



Abb. 43: Ansicht einer vorbereiteten Messparzelle für die Bodenruckmessung vor und nach Überfahrt des Versuchsfahrzeugs.

Die Rückverdichtung erfolgte für alle Varianten in freier Überfahrt, ohne dass eine Verzögerungskraft auf den Versuchsschlepper ausgeübt wurde.

Nach Abschluss der Überfahrten schloss sich ein für alle Varianten einheitliches Ausgraben der Schlauchdrucksonden an. Durch dieses Vorgehen konnte eine Beschädigung des Silikonschlauchs sowie ein Lösen der Verbindungsstelle zwischen Silikonschlauch und Edelstahlrohr verhindert werden.

Die Bodendruckmessung wurde je Fahrzeug und Verzögerungsstufe in den beiden festgelegten Messtiefen von 0,15 m und 0,25 m durchgeführt. Hierzu standen insgesamt sieben Schlauchdrucksonden zur Verfügung, welche in Reihe zeitlich nacheinander überfahren wurden. Der Versuchsaufbau ermöglichte somit je Messparzelle und Überfahrt eine siebenmalige Wiederholung des Einzelversuchs. Die Überfahrten erfolgten einheitlich bei einer Geschwindigkeit von $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Die Fahrspur der Versuchsfahrzeuge zur Überfahrt über das Messfeld wurde so ausgerichtet, dass der Bereich des zu erwartenden Maximaldrucks mittig über dem Druckaufnehmer der Schlauchdrucksonden lokalisiert war. Das Überfahren der Druckaufnehmer erfolgte daher mit der Reifenmitte.

Die Raupenlaufwerke wiesen hingegen eine grundsätzlich ungleichmäßigere Druckverteilung auf, da Druckmaxima nach OLF (1993) sowohl in Fahrtrichtung als auch senkrecht dazu unter den Umlenk- und Stützrollen auftreten. Im Unterschied zu groß dimensionierten Bandlaufwerken aus dem landwirtschaftlichen Bereich mit Bandbreiten von häufig mehr als 60 cm verfügten die Versuchsfahrzeuge Carraro Mach 4 und

Geier 60 TLY lediglich über Bandbreiten von 35 cm bzw. 25 cm. Die Breite der Umlenk- und Stützrollen betrug bei den untersuchten Fahrwerken ebenfalls nur 5 cm bzw. 2,5 cm.

Für die Versuchsdurchführung wurde daher festgelegt, den Druckaufnehmer analog zu den Radfahrwerken jeweils mit der Bandmitte zu überrollen. Durch dieses Vorgehen wurde das Risiko einer Fehlpassage (Vorbeierollen der schmalen Stützrolle am Druckaufnehmer) minimiert.

Nach Abschluss der Überfahrten erfolgte die Vermessung der stattgefundenen Fahrspursetzung in cm. Ebenfalls wurden in beiden Messtiefen gestörte Bodenproben am Ort der Schlauchdrucksondeninstallation entnommen; durch Ofentrocknung entsprechend DIN 18121-1 (1998) wurde der Wassergehalt des Bodens zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung bestimmt.

3.8.2 Variation der Verzögerungskraft

Aus der Literatur ist bekannt, dass der relative Druck in der Kontaktfläche bzw. im Boden unterhalb des Fahrwerks bezüglich seiner Höhe und Verteilung variabel ist. Insbesondere wirken die statischen und dynamischen Gewichtsverhältnisse am Fahrzeug sowie von außen einwirkende Kräfte (z. B. Fahrwiderstände, Zugkräfte) auf die spezifische Achs- und Radlastverteilung und somit auf die Druckverhältnisse in der Kontaktfläche ein (SCHILLING 1960; BLUMENTHAL 1985; RENIUS 1985; KÜHNER 1997).

Vor diesem Hintergrund wurde die eingangs dargestellte Methodik der dynamischen Bodendruckmessung um die Variable einer externen Belastung erweitert. Hierzu wurde eine graduell progressive Abbremsung des Versuchsfahrzeugs durch einen nachfolgenden kraftschlüssig angehängten Bremsschlepper vorgenommen (Abb. 44, Schema gem. Abb. 40).



Abb. 44: Versuchsaufbau zur Variation der Verzögerungskraft während der dynamischen Bodendruckmessungen. Der kraftschlüssig an das Versuchsfahrzeug gekoppelte Bremsschlepper erlaubte eine definierte Abbremsung während der Messüberfahrt.

Die Abbremsversuche sollten Aufschluss darüber geben, inwiefern eine definierte Verzögerungskraft F_V die relative Druckverteilung in der Kontaktfläche und dem darunter gelagerten Bodengefüge beeinflusste. Die weitere Versuchsdurchführung folgte analog der in Kapitel 3.8.1 beschriebenen Methodik.

Um die Versuchsfahrzeuge trotz ihrer unterschiedlichen Massen vergleichen zu können, wurde die angelegte Verzögerungskraft an der jeweiligen Fahrzeugmasse bzw. der daraus resultierenden Gewichtskraft orientiert. Als Zielgrößen für die Feldversuche wurden die in Tab. 12 aufgelisteten Verzögerungsstufen (VS) definiert:

Tab. 12: Definition der Verzögerungsstufen als Zielgrößen für die Feldversuche.

Verzögerungsstufe	Verzögerungskraft F_V [% d. Fahrzeuggewichtskraft]	[F_V in kN]		
		Fendt 211V Vario	Carraro Mach 4	Geier 60 TLY
VS-0	0 %	-	-	-
VS-1	30 %	9,5	10,2	5,3
VS-2	40 %	12,7	13,6	7,0
VS-3	50 %	15,9	17,0	8,8

Der Punkt zur Einleitung der Verzögerungskraft wurde fahrzeugspezifisch niedrigstmöglich gewählt. An den Versuchsfahrzeugen Fendt 211V Vario und Carraro Mach 4 diente die heckseitige Anhängerkupplung in einer Höhe von 45 cm

bzw. 32 cm als Anschlagpunkt. Das Raupenfahrzeug Geier 60 TLY verfügte bauartbedingt über keine Anhängerkupplung. Als Anschlagpunkt wurde der Dreipunktkraftheber mit einer Kugelkopfkupplung ausgestattet und auf einer Höhe von 35 cm arretiert. Die Ermittlung der Höhenangaben erfolgte stets auf befestigtem und ebenem Fahrbahnuntergrund.

Der korrespondierende Befestigungspunkt am Bremsfahrzeug wurde so gewählt, dass eine geradlinige Einleitung der Verzögerungskraft parallel zur Fahrbahn sichergestellt war.

3.9 Berechnung des gewichteten mittleren Bodendrucks

GEISCHEDER (2011) stellte ein Verfahren zur Beurteilung eines gemessenen Bodendrucks in Abhängigkeit zur Einwirkungsdauer der Druckbelastung vor. Das Verfahren basierte auf Arbeiten von VAN BAVEL (1950) und KNITTEL (1975), welche über die Kenngröße des „gewichteten mittleren Durchmessers“ (GMD) die Arbeitsqualität verschiedener Bodenbearbeitungsmaßnahmen bewerteten. Maßstab der Beurteilung war die Bildung verschiedener Größenklassen der entstehenden Bodenaggregate sowie deren Häufigkeitsverteilung. Aus der Modifikation der zugrunde liegenden Beziehung resultierte nachfolgende Gleichung (Gl. 3-12) für die Herleitung eines „gewichteten mittleren Drucks“ (GMP):

$$GMP = \frac{\sum t_i \cdot p_i}{\sum t_i} \quad (\text{Gl. 3-12})$$

Der GMP berechnete sich somit aus der Summe der Produkte der Einwirkungszeit t_i in s und dem Betrag der Klassenmitte p_i in kPa, dividiert durch die Summe der Einwirkungszeiten in s. Es wurden folgende Druckklassen definiert (Tab. 13):

Tab. 13: Definition der Druckklassen und Klassenmitten für die Berechnung des gewichteten mittleren Drucks (GMP).

Ordnungszahl	[kPa]	
	Druckklasse	Klassenmitte p_i
1	6-15	10
2	16-25	20
3	26-35	30
4	36-45	40
5	46-55	50
6	56-65	60
7	66-75	70
8	76-85	80
9	86-95	90
10	96-105	100
11	106-115	110
12	116-125	120
13	126-135	130
14	136-145	140
15	146-155	150
16	156-165	160
17	166-175	170
18	176-185	180
19	186-195	190
20	196-205	200

Die normierten Messdaten der dynamischen Bodendruckmessungen wurden sortiert und den einzelnen Druckklassen zugeordnet. Die Messfrequenz der Bodendruckmessungen betrug 50 Hz, woraus eine temporale Gewichtung der Einzelmesswerte mit jeweils 0,02 s abzuleiten war.

3.10 Penetrometrie

Der spezifische Bodeneindringwiderstand innerhalb der Fahrspur wurde jeweils vor und nach Überfahrt gemessen. Die Messung erfolgte mittels Vertikal-Konus-Penetrometer des Herstellers Eijkelkamp, Typ Penetrologger (Abb. 45). Die nach American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASAE) standardisierte Messmethode (ASAE S313.1 1983) ist für den praxisbezogenen Feldeinsatz besonders geeignet, da sie sich durch eine hohe Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit auszeichnet. Für die Versuche wurde der Sondenstab des Penetrometers mit einer

Kegelspitze von 2 cm² Fläche und einem Öffnungswinkel von 60 ° ausgerüstet. Der Normdurchmesser der Konusspitze war auf 15,95 mm festgelegt. Die Auswahl der Kegelspitze folgte dabei den Empfehlungen des Geräteherstellers (EIJKELKAMP 2011). Die Penetrationsgeschwindigkeit wurde in Anlehnung an den einschlägigen Standard NEN 5140 (1996) auf 2,0 cm·s⁻¹ definiert.

Die Messung des spezifischen Bodeneindringwiderstands erfolgte durch Einstechen einer Messsonde in das Bodengefüge. Eine am Boden positionierte metallische Platte diente dabei als Höhenreferenz. Zur Gewährleistung einer hohen Messpräzision waren eine exakte Horizontierung der Bodenplatte sowie das senkrechte Eintreiben der Messsonde in den Boden sicherzustellen. Sowohl die Bodenplatte, als auch die Messsonde selbst verfügten zu diesem Zweck über Dosenlibellen zur zweidimensionalen Ausrichtung. Die erforderliche Kraft zum Eintreiben der Messsonde in das Bodengefüge wurde an einer Z-förmigen Messschwinge über einen piezoelektrischen Sensor erfasst und im Arbeitsspeicher des Penetrometers abgelegt. Parallel zur Kraftmessung fand eine Aufzeichnung der Eindringtiefe der Messsonde durch ultraschallbasierte Abstandsmessung zur Bodenplatte statt.

Die Sondierung des Eindringwiderstands erfolgte über eine Tiefe von 80 cm, wobei die Tiefenauflösung 1 cm betrug. Die kontinuierlichen Messwerte wurden als Mittelwert für eine Messstrecke von jeweils 1 cm gespeichert. Das Penetrometer erlaubte einen kabelgebundenen Transfer der Messwerte auf einen Rechner, welcher mit der Auslese- und Auswertesoftware Eijkelkamp PenetroViewer Ver. 6.08 ausgestattet war.



Abb. 45: Vertikal-Konus-Penetrometer, Typ: Eijkelkamp Penetrologger (EIJKELKAMP 2011).

3.11 Datenauswertung und statistische Verfahren

Die protokollierten Messdaten der dynamischen Bodendruckmessungen wurden mittels Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel 2007 bearbeitet. Die Vergleichbarkeit der Messwerte der Einzelversuche wurde über ein mehrstufiges Normierungs- und Harmonisierungsverfahren gewährleistet:

1. Korrektur der Messwerte um das Vordruckniveau der Schlauchdrucksonden

Der eingestellte Vordruck der Schlauchdrucksonden wurde vom jeweiligen Messwert subtrahiert. Definiert wurde der anliegende Vordruck dabei als Mittelwert aus 500 Einzeldruckmessungen vor Beginn der eigentlichen Überfahrt des Versuchsfahrzeugs (Messintervall 10 s bei zugrundeliegender Messfrequenz von 50 Hz).

2. Korrektur des temporalen Versatzes der Messwertereihen

Die lineare Anordnung der einzelnen Schlauchdrucksonden führte zu einem zeitlichen Versatz der Messwertereihen zueinander. Der Betrag des Versatzes war abhängig von der Fahr- bzw. Überrollgeschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs sowie von einem spezifisch auftretenden Antriebsschlupf. Die Korrektur erfolgte durch Ver-

schieben der Messwertreihen zueinander, bis zur Deckungsgleiche der Messgraphen. Der erste persistierende Druckanstieg über das normierte Vordruckniveau hinaus wurde als Startpunkt der Messung definiert.

3. Verrechnung der Einzelmessungen

Die Einzelmessungen jeder Überfahrt wurden zu einem arithmetischen Mittelwert verrechnet und die Standardabweichung berechnet. Die grafische Darstellung erfolgte als Gesamtergebnis aus den Originaldaten der dreimaligen Überfahrt je Faktorstufe in Verbindung mit der Anzahl gültiger Einzelmessungen. Nicht zu plausibilisierende Einzelmessungen, beispielweise infolge messtechnischer Störungen oder Sondendefekten wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Hieraus resultierte eine variierende Anzahl gültiger Einzelversuche zwischen $n = 3$ und $n = 32$.

Der Auswertung und Verrechnung der Daten der Penetrometermessungen ging ebenfalls eine Harmonisierung voraus. Insbesondere war ein Ausgleich der zwischen unbefahrener und befahrener Variante induzierten Fahrspursetzung erforderlich. Diese Fahrspursetzung resultierte in einer Verschiebung der Messwertreihen zueinander. Die Angleichung erfolgte grafisch, durch Verschiebung der Messgraphen bis zur Deckungsgleiche. Hierzu wurden die erhobenen Messdaten unter Zuhilfenahme der Auswertesoftware Eijkelkamp PenetroViewer in das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel 2007 exportiert.

Die weitere statistische Auswertung der erhobenen Daten des Bodeneindringwiderstands erfolgte mittels der Statistiksoftware Sigmaplot Ver. 11. Die gemessenen Eindringwiderstände wurden getrennt nach Oberboden, Krumbasis und Unterboden verglichen und geprüft, ob und inwieweit sich die einzelnen Verzögerungsstufen und Fahrzeuge signifikant untereinander und gegenüber der jeweiligen Kontrolle unterschieden.

Methodisch erfolgte die Datenanalyse nach Prüfung auf Normalverteilung und Varianzhomogenität mittels zweifaktorieller Varianzanalyse (ANOVA; KÖHLER et al. 2007). Im Hinblick auf den Vergleich der fahrzeug- und belastungsspezifischen Eindringwiderstände wurden die Einflussfaktoren Versuchsfahrzeug (Faktor A) und der Befahrungsstatus (Faktor B) berücksichtigt:

Faktor A Radtraktor Fendt 211V Vario
 Vierraupentraktor Carraro Mach 4
 Zweiraupentraktor Geier 60 TLY

Faktor B Kontrollvariante (unbefahren)
 Versuchsvariante (befahren).

Zeigte die Varianzanalyse signifikante Unterschiede an, folgte eine weitergehende Dateninterpretation zur Identifikation der abweichenden Versuchsvarianten.

Die Messreihen zu den Zugkraft-Schlupf-Beziehungen der Versuchsfahrzeuge sowie zur Detailanalyse laufwerksinterner Lastumlagerungen zeigten keine Normalverteilung der Einzelmesswerte. In diesen gesondert gekennzeichneten Fällen wurde der H-Test nach Kruskal-Wallis als nichtparametrische, rangsummenbasierte Alternative zur ANOVA ausgewählt. Das Signifikanzniveau wurde einheitlich für sämtliche Analysen auf $p < 0,05$, $\alpha = 5 \%$ festgesetzt.

4 Ergebnisse

4.1 Standort- und Rahmenbedingungen

Die Standortbedingungen wurden bereits eingehend in Kapitel 3.1 dargestellt. Parallel zu den Bodendruckmessungen erfolgte die Bestimmung des volumetrischen Bodenwassergehalts in den unterschiedlichen Messhorizonten. Je Versuchsfahrzeug wurden jeweils vier Proben (Varianten VS-0 bis VS-3) in 0,15 m und 0,25 m Tiefe entnommen. Die Ergebnisse sind in Abb. 46 zusammengefasst.

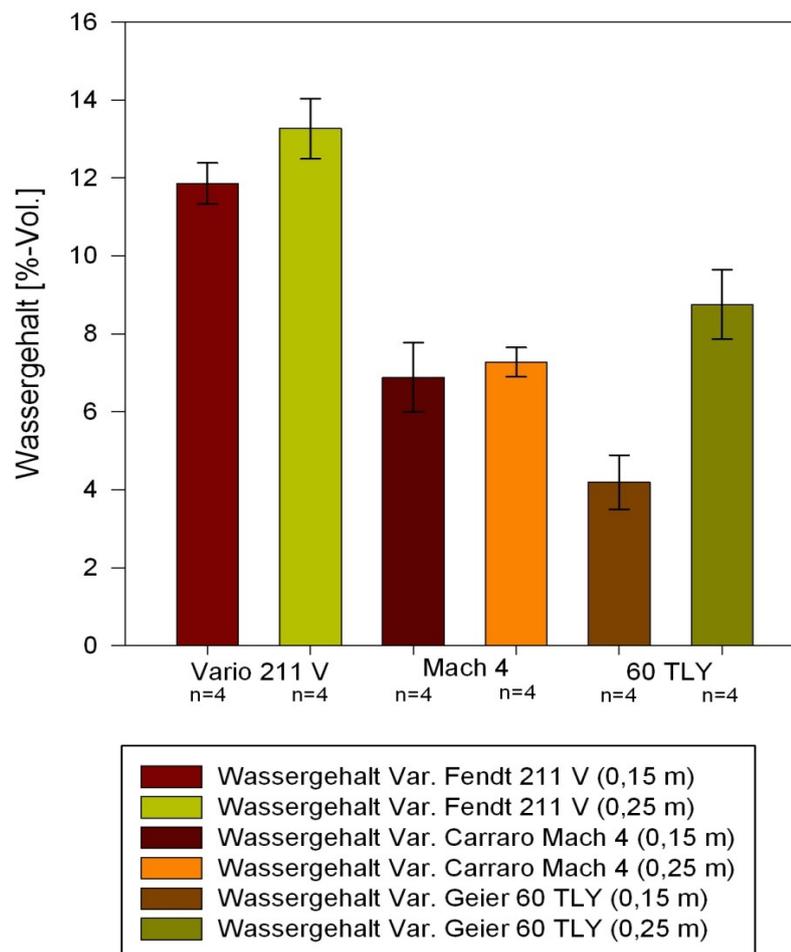


Abb. 46: Volumetrische Bodenwassergehalte nach DIN 18221 zum Zeitpunkt der Messungen mit der Schlauchdrucksonde und dem Konus-Penetrometer, differenziert nach den Messhorizonten 0,15 m und 0,25 m.

Mit Ausnahme der Variante Geier 60 TLY war der Wassergehalt in beiden Horizonten relativ homogen.

4.2 Schlupfmessung

Die Abb. 47 - 49 zeigen die Ergebnisse der Schlupfmessungen bei eigenem Fahrtrieb und in geschlepptem Zustand. Dargestellt wird der mittlere Antriebsschlupf, wie er für die definierte Messstrecke bei der jeweiligen Geschwindigkeit berechnet wurde.

Beim Radschlepper Fendt 211V Vario nahm der Antriebsschlupf bei eigenem Fahrtrieb mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit stetig zu (Abb. 47). Ein befestigter Fahrbahnuntergrund sowie die Zuschaltung des Allradantriebs reduzierten die messbaren Schlupfanteile. Der nachweisbare Schlupf lag im Bereich von 0,3 % bis maximal 5,9 %.

Im Schlepp traten auf der Asphaltfahrbahn ausschließlich positive Schlupfwerte zwischen 1,3 % und 3,1 % auf. Auf Sand wurde bei einer Fahrgeschwindigkeit von $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ hingegen zunächst ein negativer Schlupf von -1,1 % gemessen. Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit steigerte sich dieser bis auf 2,0 %.

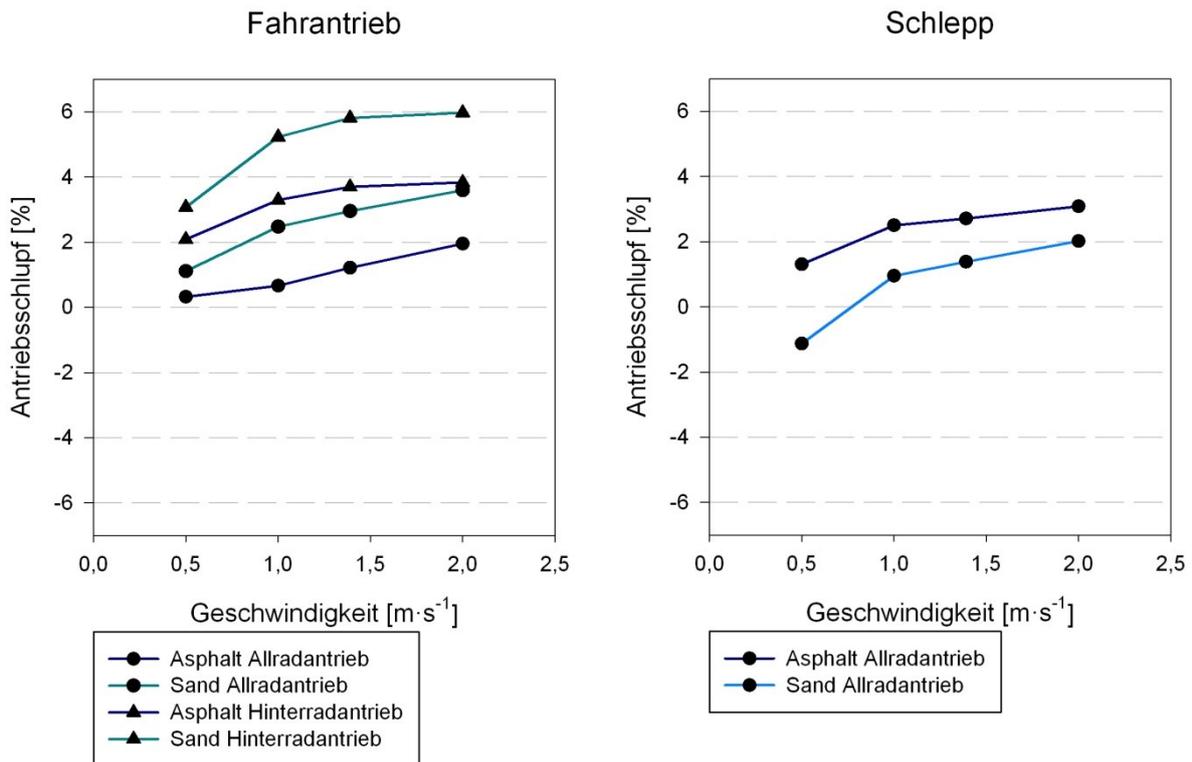


Abb. 47: Antriebsschlupf beim Fendt 211V Vario unter Berücksichtigung der Faktoren Fahrgeschwindigkeit, Fahrbahnbeschaffenheit und Antriebsart (links Fahrantrieb; rechts Schlepp).

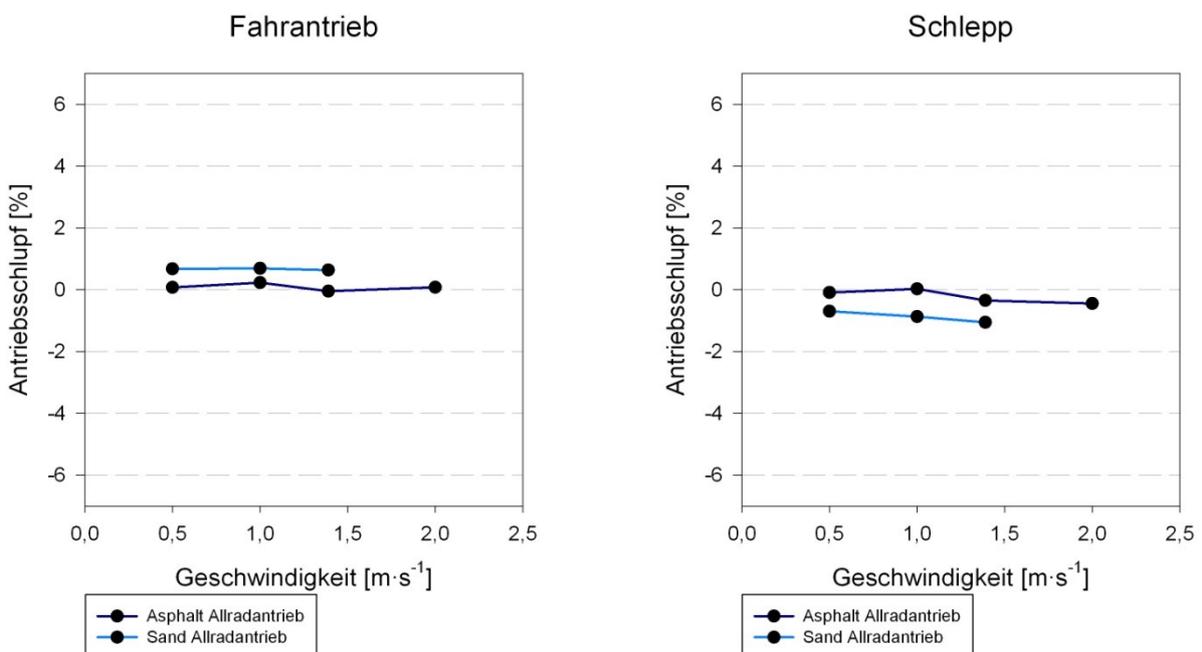


Abb. 48: Antriebsschlupf beim Carraro Mach 4 unter Berücksichtigung der Faktoren Fahrgeschwindigkeit, Fahrbahnbeschaffenheit und Antriebsart (links Fahrantrieb; rechts Schlepp).

Bauart- und konzeptionsbedingt wurde das Fahrzeug Carraro Mach 4 ausschließlich mit Permanentantrieb der vier Bandlaufwerke betrieben. Auf der Sandfahrbahn betrug die maximale Fahrgeschwindigkeit $1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, da darüber hinaus eine bedeutende Verlagerung abrasiven Bodenmaterials in das Fahrwerkinnere zu beobachten war. Bei eigenständigem Fahrtrieb war der Antriebsschlupf unabhängig von der Geschwindigkeit und bewegte sich auf einem konstant niedrigen Niveau (Abb. 48). Ähnlich wie beim Radschlepper war der Schlupf auf befestigtem Fahrbahnuntergrund geringer als auf der Sandfahrbahn. Für den Vierraupentraktor wurden Schlupfbeträge zwischen 0,1 % und 0,7 % bestimmt.

Im geschleppten Zustand wurden auf beiden Fahrbahnuntergründen Antriebschlupfwerte zwischen 0 % und -1,1 % gemessen.

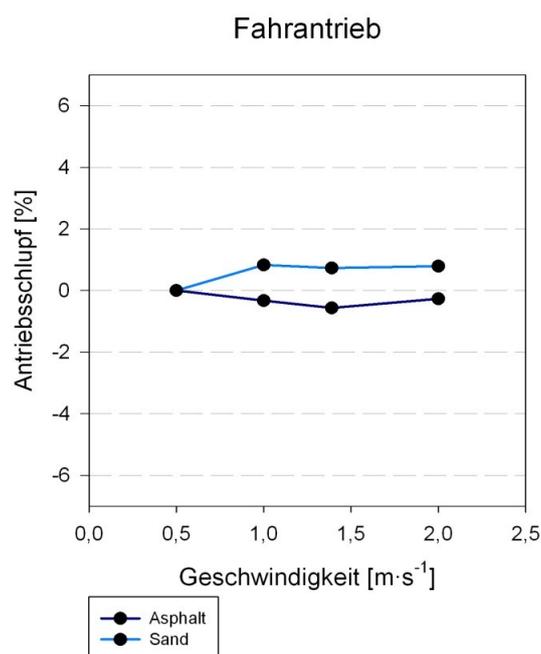


Abb. 49: Antriebsschlupf beim selbstfahrenden Raupenfahrzeug Geier 60 TLY unter Berücksichtigung der Faktoren Fahrgeschwindigkeit und Fahrbahnbeschaffenheit.

Der Versuchsaufbau beim Versuchsfahrzeug Geier 60 TLY beschränkte sich auf die Schlupfmessung bei eigenem Fahrtrieb, da konstruktionsbedingt ein Schleppen des Fahrzeugs nicht möglich war (vgl. Kapitel 3.3.3). Ähnlich wie bei dem ebenfalls mit Bandlaufwerken ausgerüstetem Carraro Mach 4 blieb der Antriebsschlupf in dem untersuchten Geschwindigkeitsbereich nahezu konstant (Abb. 49). Wiederum war

der Schlupf auf der befestigten Fahrbahn geringer. Während die Schlupfwerte auf Sand im positiven Bereich angesiedelt waren und um 1 % schwankten, lagen sie auf Asphalt zwischen 0 % und -0,5 %.

4.3 Rollwiderstandskoeffizienten

Die Vorgehensweise für die Berechnung der fahrzeug- und fahrbahnspezifischen Rollwiderstandskoeffizienten c_R wurde in Kapitel 3.5 ausführlich dargestellt. Zur Fahrzeugmasse M_G wurde die Fahrer Masse addiert. Hieraus resultierte die Gesamtfahrzeugmasse M_{GG} zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung. Die Herleitung der entsprechenden Gewichtskraft F_G basierte auf Multiplikation der Gesamtfahrzeugmasse M_{GG} mit der Normalfallbeschleunigung $g = 9,80665$.

Für das Versuchsfahrzeug Geier 60 TLY konnte aufgrund der fehlenden Daten zu den spezifischen Schleppkräften kein Rollwiderstandskoeffizient bestimmt werden. Aus den Einzelmesswerten der dreimaligen Wiederholung des Experiments je Fahrbahnuntergrund wurde ein Mittelwert gebildet sowie die einfache Standardabweichung berechnet. Die Ergebnisse sind in Tab. 14 dargestellt.

Tab. 14: Berechnung der Rollwiderstandskoeffizienten auf Grundlage der Gesamtfahrzeugmasse (M_{GG}), der Gewichtskraft (F_G) und der Schleppkraft F_S . Angegeben ist die mittlere Schleppkraft F_S inkl. einfacher Standardabweichung.

Fahrzeug	M_{GG} [kg]	F_G [kN]	Sand			Asphalt		
			n	F_S [kN]	c_R	n	F_S [kN]	c_R
Fendt 211V Vario	3.245	31,8	18.399	$4,1 \pm 0,5$	0,14	17.541	$1,0 \pm 0,2$	0,03
Carraro Mach 4	3.465	34,0	15.395	$4,8 \pm 0,7$	0,14	18.219	$3,0 \pm 0,4$	0,09

Für beide Fahrzeuge wurden auf der unbefestigten Sandfahrbahn höhere Rollwiderstandskoeffizienten als auf der Asphaltfahrbahn berechnet. Auf der Sandfahrbahn lagen die Rollwiderstandskoeffizienten des Vierraupen- und Radtraktors auf einem vergleichbaren Niveau; auf befestigter Fahrbahn war der Rollwiderstand des Vierraupentraktors gegenüber dem Radtraktor um den Faktor drei erhöht.

4.4 Triebkraftkoeffizienten und Wirkungsgrade

Die Triebkraftkoeffizienten wurden durch Verzögerungsversuche für die Geschwindigkeiten $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und $1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ bestimmt.

Abb. 50 zeigt exemplarisch die Originaldaten eines Verzögerungsversuchs. Dargestellt ist der zeitliche Verlauf, der an der Anhängerkupplung des Versuchsfahrzeugs gemessenen Kraft [kN]. Die Zeitintervalle mit relativ homogener Zugkraft (rot markiert in Abb. 50) wurden für eine weitere Auswertung herangezogen. Für jedes betrachtete Intervall erfolgte die Berechnung eines zusammengehörigen Wertepaares, bestehend aus mittlerem Zugkraftbetrag [kN] und mittlerem Schlupfbetrag [%].

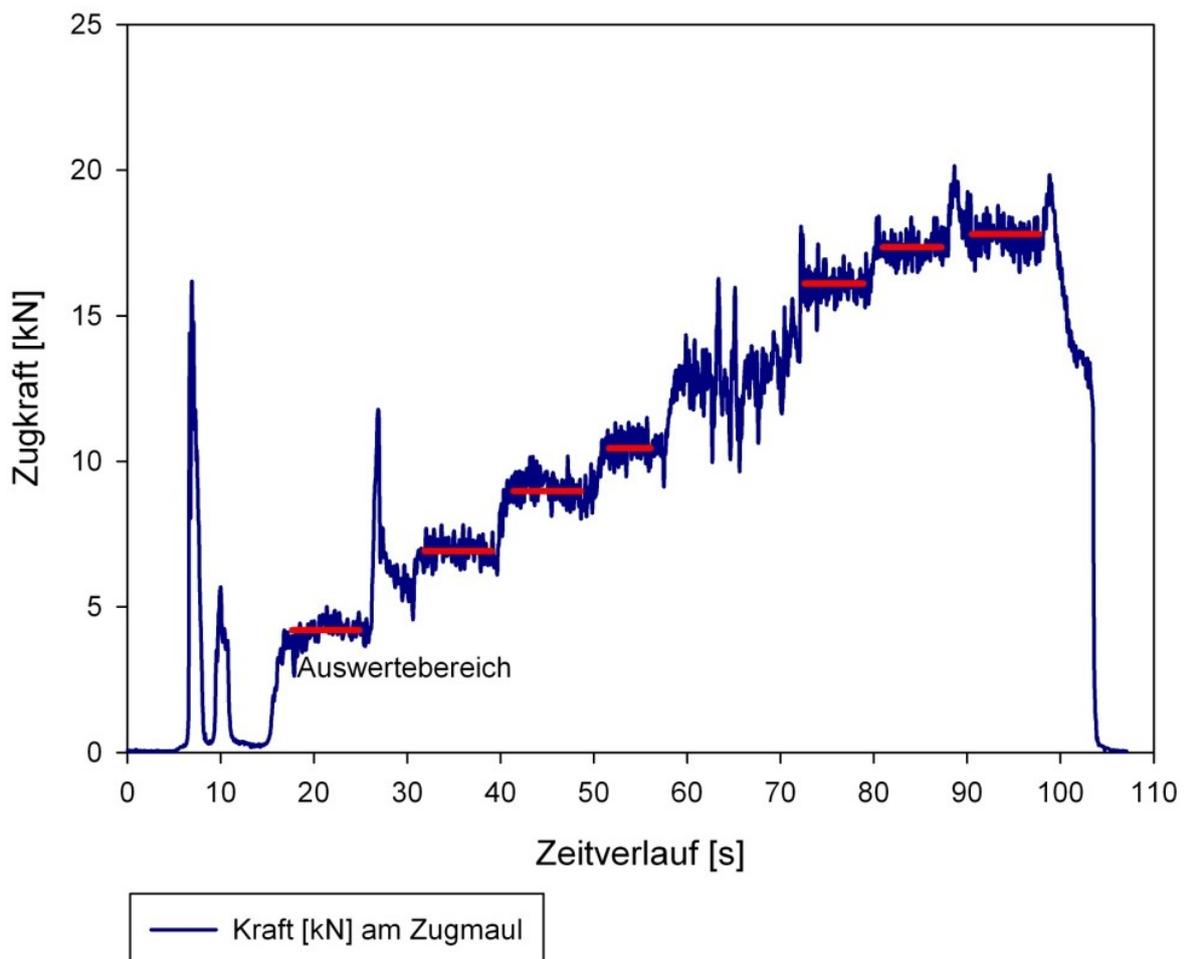


Abb. 50: Darstellung der Originaldaten eines Verzögerungsversuchs. Die progressive Abstufung sowie die Intervalle eines homogenen Verlaufs der induzierten Verzögerungskraft sind rot hervorgehoben.

Am Beispiel des Radschleppers war festzustellen, dass zwischen Zugkraft und Antriebsschlupf für alle untersuchten Geschwindigkeiten ein annähernd gleiches Verhältnis bestand. Die Unterschiede zwischen den Geschwindigkeitsvarianten waren nicht signifikant ($p = 0,180$, via H-Test; Abb. 51).

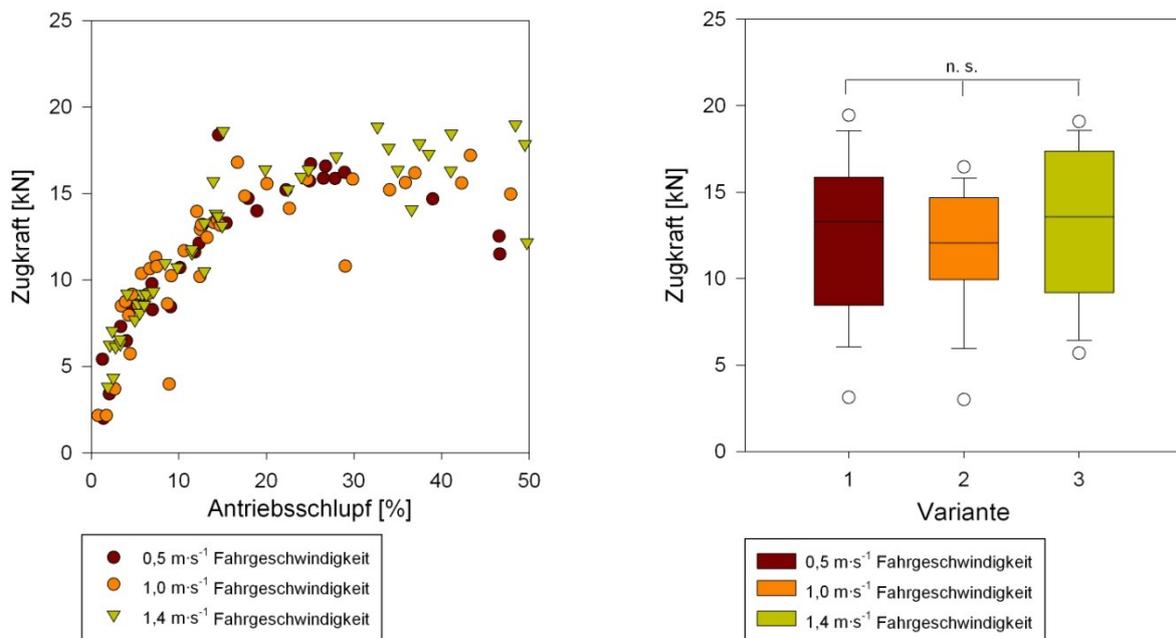


Abb. 51: Zugkraft-Schlupf-Beziehung am Beispiel des Versuchsfahrzeugs Fendt 211V Vario.

Die Messreihen zur Zugkraft-Schlupf-Beziehung für die untersuchten Geschwindigkeiten wurden vor diesem Hintergrund fahrzeugspezifisch zu einem Gesamtdatenpool vereinigt. Die nachfolgend in den Kapiteln 4.4.1 bis 4.4.3 dargestellten Zugkraft-Schlupf-Diagramme sowie Grafiken zu Triebkraftkoeffizienten und Fahrwerkswirkungsgraden sind somit das Resultat einer Gesamtbetrachtung des geprüften Geschwindigkeitsbereichs von 0,5 - 1,4 m·s⁻¹.

4.4.1 Fendt 211V Vario

Das Versuchsfahrzeug Fendt 211V Vario zeigte einen für Radschlepper charakteristischen Anstieg der maximalen Zugkraft mit steigendem Antriebsschlupf (Abb. 52). Als Nullschlupf wurde gem. RENIUS (1985) der auf dem jeweiligen Versuchsunter-

grund in freier Überfahrt ermittelte Schlupfbetrag definiert. Im Bereich zwischen 20 % und 40 % Schlupf wurde eine nahezu konstante Zugkraft von etwa 15 kN erreicht; der Triebkraftkoeffizient blieb mit 0.5 nahezu stabil. Mit höheren Schlupfwerten sank die Zugkraft. Der Fahrwerkswirkungsgrad zeigte ein ausgeprägtes Maximum bei etwa 20 % Schlupf. Überstieg der Antriebsschlupf diesen Grenzwert, sank der Wirkungsgrad kontinuierlich. Am günstigsten Betriebspunkt betrug der Wirkungsgrad etwa 40 %.

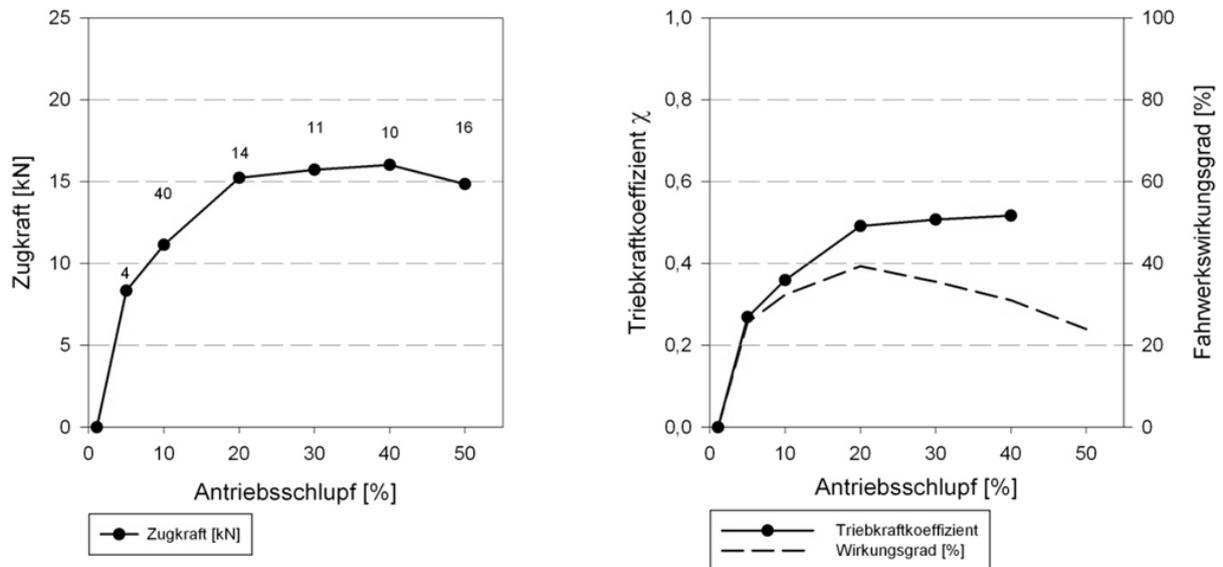


Abb. 52: Beziehung von Zugkraft, Triebkraftkoeffizient und Wirkungsgrad zum Antriebsschlupf beim Fendt 211V Vario (Sandfahrbahn). Die Anzahl der Messpunkte ist dem linken Diagramm zu entnehmen.

4.4.2 Carraro Mach 4

Im unteren Antriebsschlupfbereich bis etwa 10 % war der Anstieg der Zugkraft beim Vierraupenfahrzeug Carraro Mach 4 deutlich steiler ausgeprägt als beim Radschlepper Fendt 211V Vario. (Abb. 53).

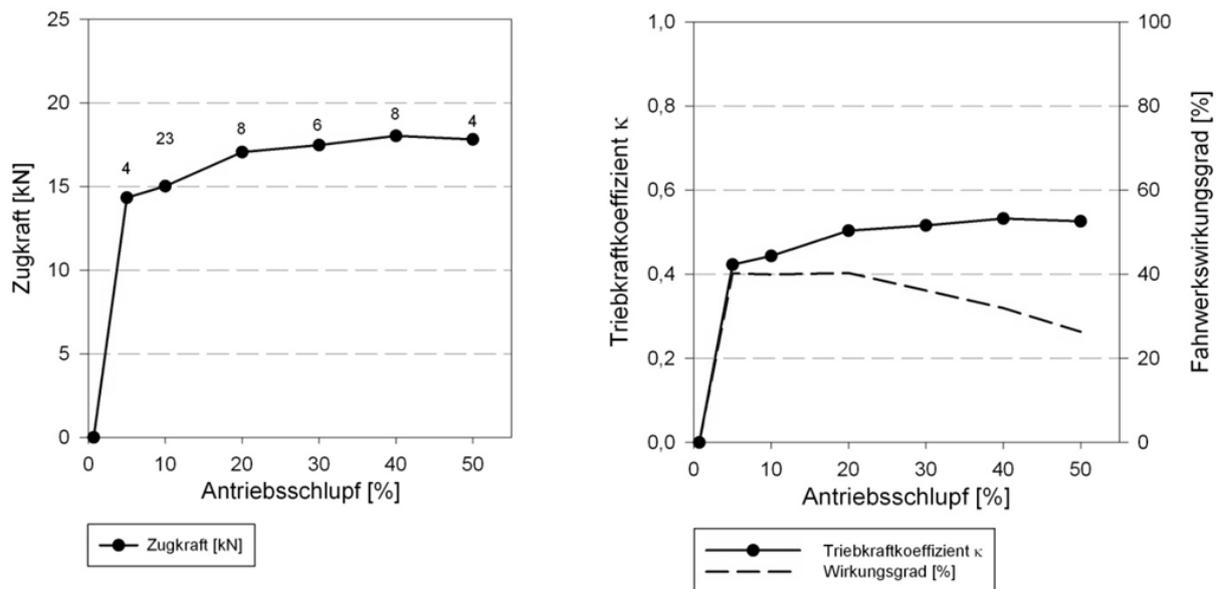


Abb. 53: Beziehung von Zugkraft, Triebkraftkoeffizient und Wirkungsgrad zum Antriebsschlupf beim Carraro Mach 4 (Sandfahrbahn). Die Anzahl der Messpunkte ist dem linken Diagramm zu entnehmen.

In diesem Bereich wurden 15 kN Zugkraft aufgebracht, was bereits rd. 80 % der unter Versuchsbedingungen erreichbaren Maximalzugkraft entsprach. Im weiteren Verlauf kam es unter deutlicher Zunahme des Antriebsschlupfes nur noch zu einer marginalen Zugkraftsteigerung. Der Triebkraftkoeffizient betrug etwa 0,4 - 0,5. Der maximale Fahrwerkswirkungsgrad von 40 % wurde in einem breiten Schlupfbereich von 5 - 20 % erreicht.

4.4.3 Geier 60 TLY

Das Zweiraupenfahrzeug Geier TLY 60 verhielt sich ähnlich wie der Vierraupentraktor (Abb. 54). Bei Schlupfwerten von 5 % wurden rd. 72 % und bei Werten von 10 % rd. 77 % der maximalen Zugkraft bereitgestellt. Im Schlupfbereich zwischen 20 und 50 % blieb die zur Verfügung stehende Zugkraft nahezu konstant. Die geringen Zugkraftsteigerungen wurden nur unter Inkaufnahme hoher Schlupfwerte erzielt. Bedingt durch die wesentlich geringere Fahrzeuggesamtmasse erreichte das Versuchsfahrzeug nur eine maximale Zugkraft von 12,5 kN. Im Vergleich zu dem Rad-schlepper und dem Vierraupentraktor waren die Triebkraftkoeffizienten mit

0,5 - 0,7 verhältnismäßig hoch. Das spezifische Wirkungsgradmaximum von ca. 55 % wurde bei einem anliegenden Antriebsschlupf von etwa 20 % erreicht.

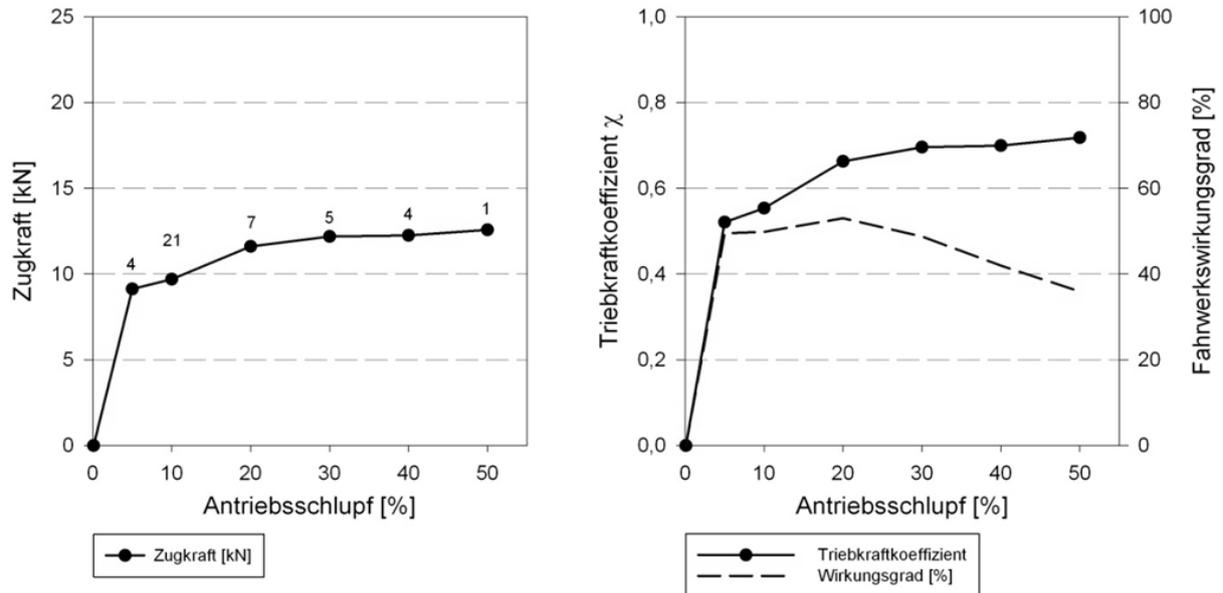


Abb. 54: Beziehung von Zugkraft, Triebkraftkoeffizient und Wirkungsgrad zum Antriebsschlupf beim Versuchsfahrzeug Geier 60 TLY (Sandfahrbahn). Die Anzahl der Messpunkte ist dem linken Diagramm zu entnehmen.

4.5 Dynamische Bodendruckmessung

Die dynamischen Bodendruckmessungen bildeten einen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt grafisch in Form fahrzeug- und variantenspezifischer Bodendruckprofile. Visualisiert wird in den nachfolgenden Kapiteln 4.5.4 und 4.5.5 jeweils der gemessene Bodendruck [kPa] über dem Zeitverlauf der Messüberfahrt [s]. Aufgetragen wird der gemessene Bodendruck auf der Ordinate, der Zeitverlauf auf der Abszisse (Abb. 55).

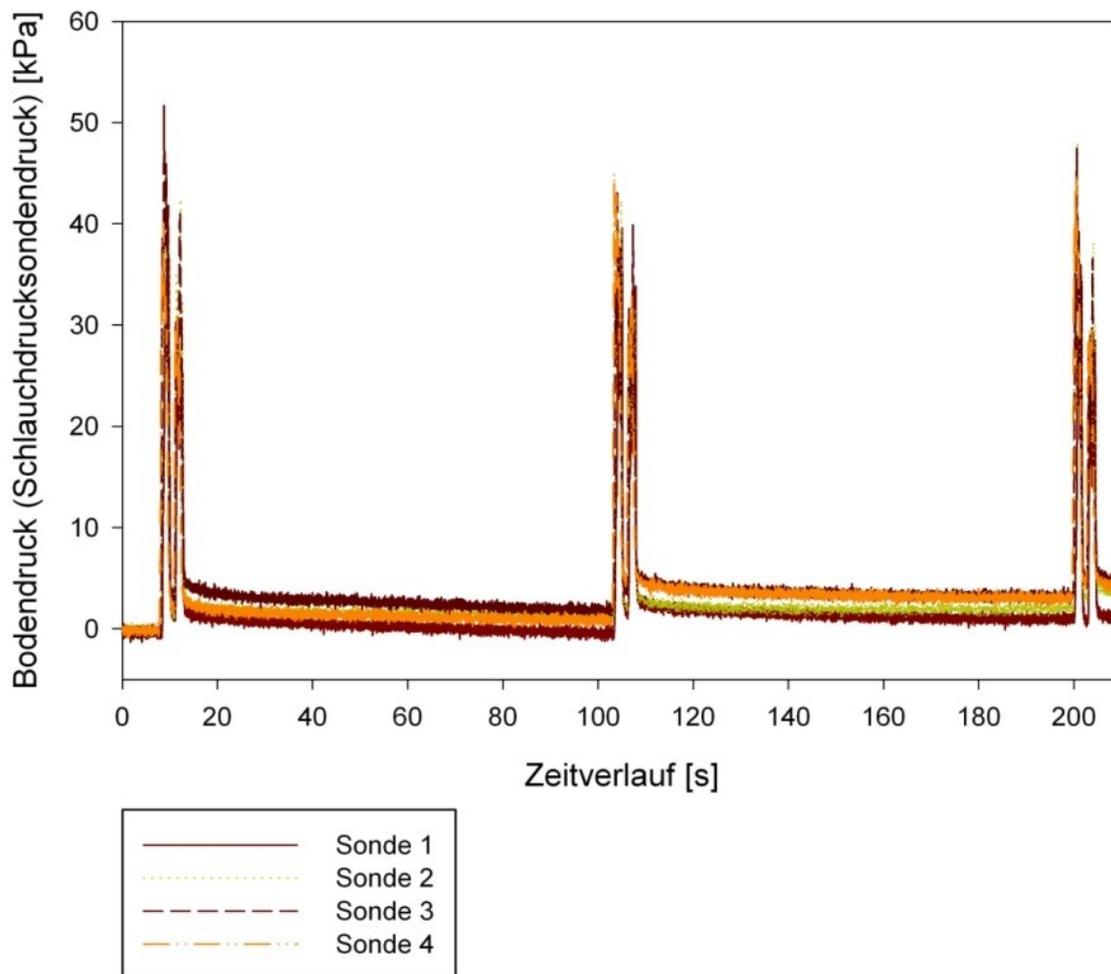


Abb. 55: Exemplarische Darstellung der normierten Originaldaten vier ausgewählter Bodendrucksonden für die dreimalige Überfahrt des Versuchsfahrzeugs Carraro Mach 4 über eine Bodendruckmessstelle.

Die in Abb. 55 exemplarisch gezeigten Originaldaten eines dreifach wiederholten Einzelversuchs wurden nach Normierung gem. Kapitel 3.11 zu einem mittleren Bodendruck verrechnet. Die Anzahl der gültigen und berücksichtigten Einzelversuche variiert variantenabhängig. Demzufolge wird in den ergänzend dargestellten Wertetabellen jeweils die spezifische Wiederholungsanzahl ausgewiesen. Zusätzlich werden Extremwerte und Kennzahlen zur Streuung der Messdaten (Standardabweichung sowie Variationskoeffizient (VK) als relative, normierte Standardabweichung) angegeben.

Die Einzeldarstellungen zeigen die berechneten mittleren Bodendruckwerte für die Messtiefen 0,15 m und 0,25 m. Die Streuung der Messwerte um den errechneten Mittelwert wird als einfache Standardabweichung in Form eines grau gefärbten Streubands in den Grafiken hinterlegt.

Die Wertetabellen sind fahrzeugabhängig unterschiedlich aufgebaut. Grundsätzlich erfolgt für die zweiachsigen Fahrzeuge eine Unterscheidung der Druckimpulse von Vorder- und Hinterachse. Für den Vierraupentraktor werden zusätzlich die Einzelrollen des Vorder- und Hinterachslaufwerks unterschieden. Für den Zweiraupentraktor werden jeweils die Druckimpulse der Einzelrollen des Gesamtlaufwerks dargestellt. Die gezeigten Einzeldruckimpulse waren in den Originaldaten der Messung in der Regel als lokale Druckmaxima identifizierbar. In Einzelfällen trat eine weitgehende Entlastung einzelner Laufwerksrollen der Raupenfahrzeuge auf. Somit verursachten diese keine eindeutigen Druckimpulse mehr, welche für die Auswertung herangezogen werden konnten. In diesen Fällen wurde die Lage der jeweiligen Laufwerksrolle aus der bekannten Laufwerksgeometrie (Abstand der Rollen untereinander) und der bekannten Fahrgeschwindigkeit abgeleitet und hieraus die korrespondierenden Werte berechnet und dargestellt.

4.5.1 Parameterabweichungen

Zwischen der gem. Versuchsplanung in Kapitel 3.8.2 angegebenen Zielgröße Verzögerungskraft F_V in den fahrzeugspezifischen Verzögerungsstufen (VS) und den tatsächlich im Praxisversuch erreichten Werten waren Abweichungen festzustellen, welche in Tab. 15 zusammenfassend dargestellt sind.

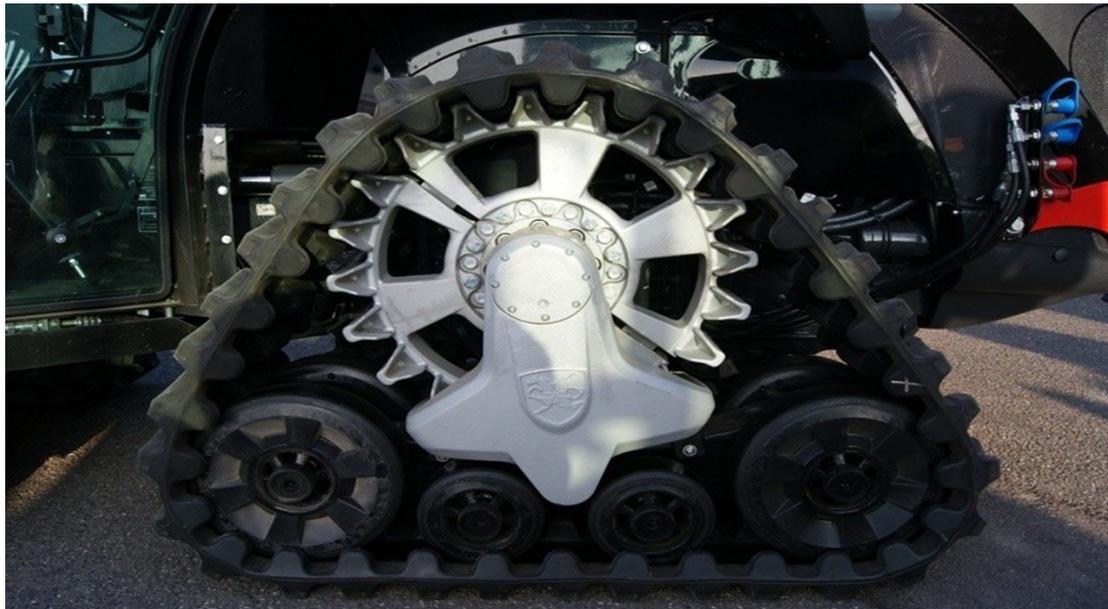
Tab. 15: Darstellung der im Praxisversuch erreichten Verzögerungskräfte F_V in Abhängigkeit zur Gewichtskraft F_G der Versuchsfahrzeuge. Die Prozentzahl gibt an, welchem Anteil der Gewichtskraft die erreichte Verzögerungskraft entsprach.

Fahrzeug	Gesamtfahrzeugmasse [M_{GG}]	Gewichtskraft [F_G]	F_V [kN]			% F_G		
			VS-1	VS-2	VS-3	VS-1	VS-2	VS-3
Fendt 211V Vario	3.245 kg	31,8 kN	8.2	12.0	13.7	26 %	38 %	43 %
Carraro Mach 4	3.465 kg	34,0 kN	10.6	15.6	17.9	31 %	46 %	53 %
Geier 60 TLY	1.796 kg	17,6 kN	7.8	9.2	11.7	44 %	52 %	66 %

Für die Versuchsfahrzeuge Fendt 211V Vario und Carraro Mach 4 wurden hohe Grade der Übereinstimmung zwischen Ziel- und Messgröße erreicht. Für das Raupenfahrzeug Geier 60 TLY konnten die massebedingt niedrigen angestrebten Verzögerungskräfte im Praxisversuch nicht erreicht werden. Eine konstante und gleichförmige Abbremsung erforderte die Einstellung einer minimalen Verzögerungskraft von rd. 8,0 kN durch das Bremsfahrzeug. Unter Berücksichtigung der geringen Fahrzeugmasse resultierte hieraus eine Verzögerungskraft, die rd. 10 - 15 % über der angestrebten Zielgröße lag.

4.5.2 Nomenklatur

Sofern im Rahmen der Ergebnisdarstellung auf einzelne Laufwerksrollen der Raupenfahrzeuge verwiesen wird, findet einheitlich die nachfolgend definierte und in den Abb. 56 und 57 dargestellte Nomenklatur Anwendung:



Fahrtrichtung

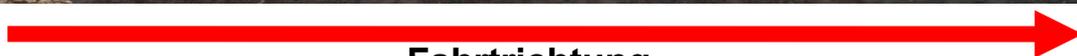
Hintere Umlenkrolle
(HU)

2. Stützrolle
(2. SR)

1. Stützrolle
(1. SR)

Vordere Umlenkrolle
(VU)

Abb. 56: Nomenklatur der Laufwerksrollen beim Vierraupentraktor Carraro Mach 4.



Fahrtrichtung

Hintere
Umlenkrolle
(HU)

5. Stützrolle
(5. SR)

4. Stützrolle
(4. SR)

3. Stützrolle
(3. SR)

2. Stützrolle
(2. SR)

1. Stützrolle
(1. SR)

Vordere
Umlenkrolle
(VU)

Abb. 57: Nomenklatur der Laufwerksrollen beim Zweiraupentraktor Geier 60 TLY.

4.5.3 Neigungskorrektur

Während der Überfahrten über die Bodendruckmessstellen wurde die spezifische Fahrzeugneigung aufgezeichnet. Die Kenntnis der exakten Fahrzeuglage zum Zeitpunkt der Überfahrt ermöglichte eine Korrektur der theoretischen Achs- bzw. Radlastverteilung. Der Betrag einer ggf. aufgetretenen neigungsbedingten Verlagerung wurde entsprechend den in Kapitel 3.2.1 dargestellten Zusammenhängen berechnet.

Das Vorgehen ermöglichte die Berechnung der tatsächlich zum Zeitpunkt der Messüberfahrt vorherrschenden Lastverteilungsverhältnisse. Tab. 16 zeigt die korrigierte Last- und Kontaktflächendruckverteilung (KFD).

Tab. 16: Theoretische und tatsächliche Rad- und Bandlasten zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung in VS-1 bis VS-3 (inkl. Fahrer Masse). Berechnet für die in Fahrtrichtung links orientierten Räder bzw. Bänder. Die Kontaktflächendrücke wurden aus den bekannten und korrigierten Fahrwerkslasten mit der Simulationssoftware TASC (Tyres/Tracks and Soil Compaction (DISERENS 2010)) berechnet.

Fahrzeug	n	Neigung [°]		Fahrwerkslast [kN]		KFD [kPa]		Δ KFD [kPa]
		Längsachse	Querachse	theo.	tat.	theo.	tat.	
Fendt 211V Vario	18	1,9 ° ± 0,4	0,5 ° ± 0,4	6,7 VA	6,6 VA	87,4 VA	86,4 VA	-1,0 VA
				8,8 HA	8,9 HA	58,4 HA	61,4 HA	3,0 HA
Carraro Mach 4	18	1,3 ° ± 0,4	2,4 ° ± 0,5	10,7 VA	10,9 VA	26,8 VA	27,2 VA	0,4 VA
				5,9 HA	6,6 HA	14,8 HA	16,6 HA	1,8 HA
Geier 60 TLY	18	0,7 ° ± 0,7	4,5 ° ± 0,6	8,4	8,9	17,3	18,3	1,0

Die Auswertung der Neigungsdaten ließ nur geringfügige Abweichungen von einer ebenen Ausrichtung der Messparzellen erkennen. Die Hangneigung konnte als Störgröße durch eine entsprechende Anlage der Versuchsblöcke auf der Gesamtfläche weitestgehend ausgeschlossen werden. Demzufolge zeigte auch das durchgeführte Korrekturverfahren zur Berechnung der tatsächlichen Lastverteilungsverhältnisse nur geringe Auswirkungen, insbesondere unter Berücksichtigung des Kontaktflächendrucks als relevanter Untersuchungsparameter.

4.5.4 Nullvarianten

Die Bestimmung der Druckverteilung unter den Fahrwerken erfolgte nach der in Kapitel 3.8.1 beschriebenen Methode. Die eingerichteten Messparzellen wurden mit dem jeweiligen Versuchsfahrzeug in freier Überfahrt zunächst ohne anliegende Verzögerungskraft überfahren.

4.5.4.1 Fendt 211V Vario

Die Überfahrt des zweiachsigen Radtraktors Fendt 211V Vario verursachte in beiden Messtiefen zwei deutlich differenzierbare Druckimpulse im Boden. Diese waren auf die Druckbelastung durch die darüber hinweg rollenden Reifen der Vorder- und Hinterachse zurückzuführen. Das Druckprofil zeigte einen zweigipfligen nahezu symmetrisch ausgeprägten Verlauf (Abb. 58, Tab. 17). In 0,15 m Messtiefe war der durch die Vorderachse induzierte Druckimpuls mit 117,0 kPa größer als derjenige der Hinterachse mit 92,8 kPa. In 0,25 m Tiefe war der Druck mit 83,3 kPa und 82,9 kPa zwischen beiden Achsen nahezu ausgeglichen.

Bezüglich des Druckabbauverhaltens im Bodengefüge war festzustellen, dass im Tiefenbereich zwischen 0,15 m und 0,25 m der vorderachsinduzierte Druck um 29 % und der hinterachsinduzierte Druck um 11 % vermindert wurde. Der persistente Restdruck betrug für den Messhorizont 0,15 m 4,9 kPa und für den Horizont 0,25 m 15,9 kPa.

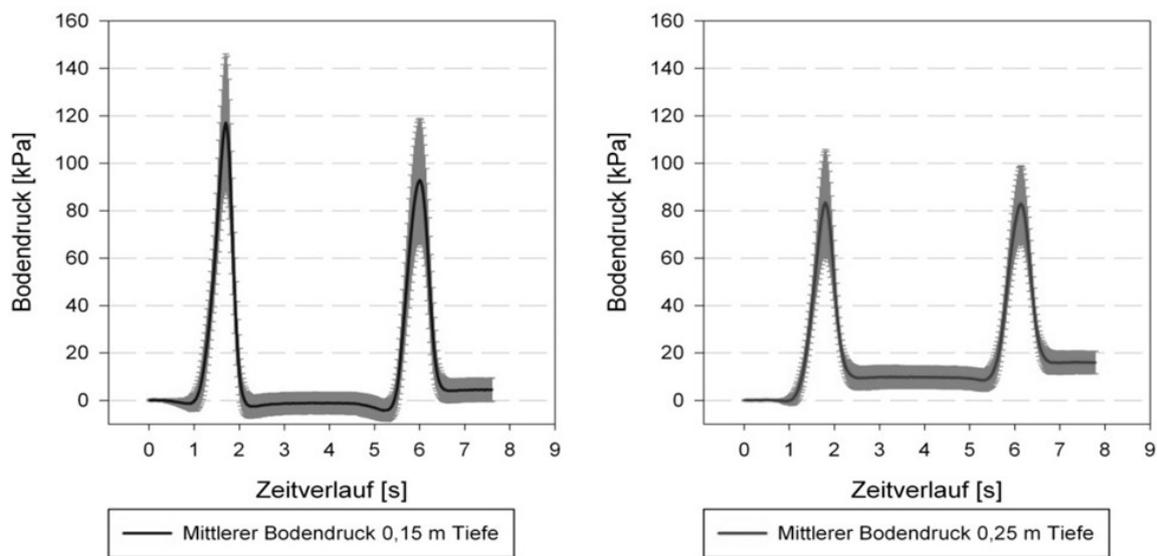


Abb. 58: Bodendruckprofil Fendt 211V Vario, VS-0 [Nullvariante]. Die Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.

Tab. 17: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Fendt 211V Vario, VS-0 [Nullvariante].

	Messtiefe 0,15 m		Messtiefe 0,25 m	
	VA	HA	VA	HA
n	20	20	21	21
Mittel	117,0	92,8	83,3	82,9
SD	29,0	26,0	22,5	16,1
VK	25 %	28 %	27 %	19 %
Min	69,4	54,1	52,1	45,7
Max	181,7	144,4	123,9	108,1

4.5.4.2 Carraro Mach 4

Analog zu den Ergebnissen des Radschleppers zeigte auch der neuartige Schmalspur-Knickschlepper ein bauartbedingt zweigeteiltes Druckprofil der Bodenbeanspruchung. Die im Vergleich zum Radtraktor grundlegend abweichende Art der Fahrzeugabstützung und Form der Laufwerkskontaktfläche verursachte für beide Achspassagen jeweils ein multimodales Druckprofil. Die unterscheidbaren Einzelpeaks spiegeln die durch Umlenk- und Stützrollen ausgelöste Bodenbelastung wider.

Für die Messtiefe 0,15 m konnten im Bereich der Vorder- und Hinterachse jeweils vier Einzelimpulse abgeleitet werden, wobei für die jeweils hintere Umlenkrolle nur ein gedämpfter Spannungsimpuls erkennbar war. In einer Tiefe von 0,25 m konnten die Peaks der Einzelrollen praktisch nicht mehr voneinander unterschieden werden. Das Druckprofil wies vielmehr eine glockenförmige Verteilung auf (Abb. 59, Tab. 18 und 19).

Die Überfahrt der Vorderachse resultierte in 0,15 m Bodentiefe in einer Druckbeanspruchung im Bereich von 31,3 - 53,1 kPa, wobei das Druckmaximum unterhalb der ersten Stützrolle lag. In einer Tiefe von 0,25 m war ausschließlich die erste Stützrolle der Vorderachse bei einem Bodendruck von 36,3 kPa sicher zu identifizieren. Die korrespondierende Überfahrt der Hinterachse verursachte in 0,15 m Tiefe eine insgesamt geringere Druckbeanspruchung von 27,3 - 43,9 kPa. Das lokale Druckmaximum war unterhalb der zweiten Stützrolle nachweisbar. In 0,25 m Tiefe zeigte die Hinterachse eine homogene Druckverteilung unterhalb der ersten drei Laufwerksrollen. Die gemessene Druckspannung betrug 28,7 kPa. Die vierte Rolle war weniger belastet und verursachte mit 16,0 kPa eine geringere Druckbeanspruchung.

Der Kurvenverlauf zeigte, dass die vordere Hälfte des Frontlaufwerks in beiden Messtiefen eine höhere Druckbeanspruchung des Bodengefüges auslöste als die hintere Hälfte. Das Hecklaufwerk verhielt sich in einer Messtiefe von 0,15 m gegenteilig: die erhöhte Beanspruchung lag im Bereich der hinteren Laufwerkshälfte. Auch in einer Tiefe von 0,25 m zeigte die Druckverteilung des Hecklaufwerks dieses Verhalten, doch war es deutlich schwächer ausgeprägt.

Für Vorder- und Hinterachse betrug der mittlere tiefenabhängige Druckabbau 32 % bzw. 30 %. Die Überfahrt resultierte in einem andauernden Bodenrestdruck von 8,5 kPa in 0,15 m und 7,1 kPa in 0,25 m Tiefe.

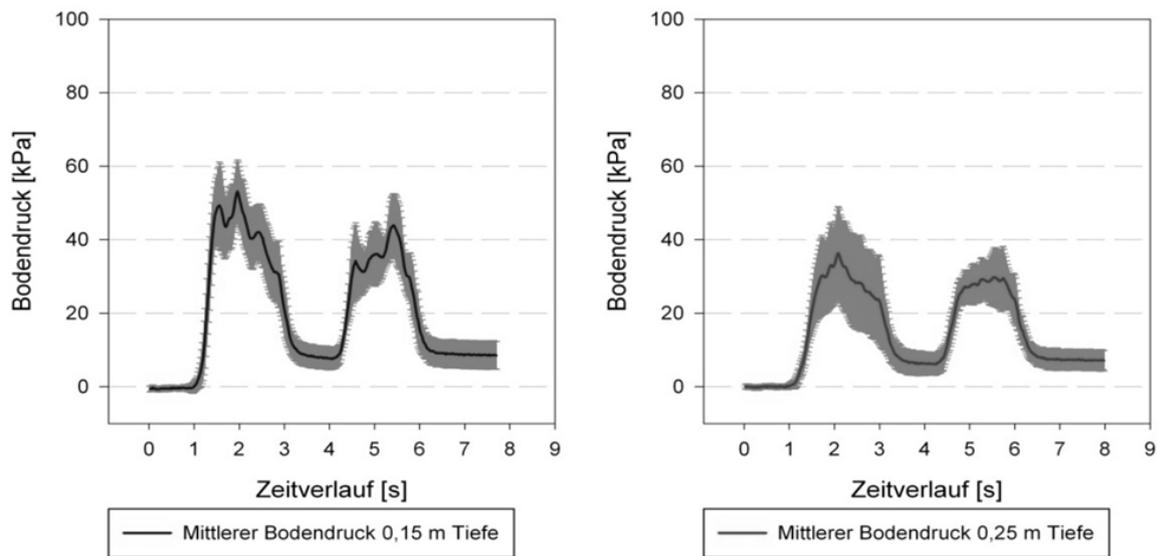


Abb. 59: Bodendruckprofil Carraro Mach 4, VS-0 [Nullvariante]. Die Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.

Tab. 18: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4, VS-0 [Nullvariante]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	Vorderachse				Hinterachse			
	VU	1. SR	2. SR	HU	VU	1. SR	2. SR	HU
n	11	11	11	11	11	11	11	11
Mittel	49,3	53,1	42,1	31,3	34,2	36,1	43,9	27,3
SD	11,8	8,6	7,5	7,9	10,3	8,2	8,6	8,2
VK	24 %	16 %	18 %	25 %	30 %	23 %	20 %	30 %
Min	32,0	42,0	30,9	19,8	22,5	21,6	30,1	8,0
Max	75,1	64,7	52,9	43,5	62,0	45,3	54,2	39,9

Tab. 19: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4, VS-0 [Nullvariante]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	Vorderachse				Hinterachse			
	VU	1. SR	2. SR	HU	VU	1. SR	2. SR	HU
n	9	9	9	9	9	9	9	9
Mittel	30,3	36,3	28,3	23,8	27,3	29,3	29,5	16,0
SD	10,9	12,7	13,0	11,8	4,5	5,3	8,6	4,1
VK	36 %	35 %	46 %	50 %	16 %	18 %	29 %	26 %
Min	15,2	21,6	9,2	5,3	19,2	20,7	17,4	9,0
Max	47,0	54,5	47,9	40,2	32,6	38,5	44,6	21,8

4.5.4.3 Geier 60 TLY

Die Überfahrt des Zweiraupentraktors erzeugte ein einteiliges, multimodales Druckprofil und ließ die Unterscheidung von Impulsen der einzelnen Laufwerksrollen zu.

Für die Messtiefe von 0,15 m konnten fünf Laufwerksrollen sicher unterschieden werden. Es handelte sich um die vordere Umlenk- sowie vier nachfolgende Stützrollen. Die Passage der fünften Stützrolle war angedeutet; die der hinteren Umlenkrolle nicht nachweisbar. Für die Tiefenzone 0,25 m war eine Unterscheidung einzelner Rollen nicht möglich. Beide Druckprofile zeigten eine deutlich linkssteile Verteilung der Druckmesswerte. Die Druckmaxima mit 54,5 kPa bzw. 26,3 kPa waren in beiden Messtiefen im Bereich der ersten Stütz- und vorderen Umlenkrolle lokalisiert. Für die nachfolgenden Laufwerksrollen war in 0,15 m Tiefe eine deutliche, nahezu lineare Verminderung der gemessenen Bodenspannung festzustellen. Eine vergleichbare, doch schwächere Abnahme war in 0,25 m Tiefe nachweisbar (Abb. 60, Tab. 20 und 21).

Im Mittel ließ das Raupenfahrwerk eine Verminderung der Bodenspannung im Tiefenbereich zwischen 0,15 m und 0,25 m von 42 % erkennen. Nach Abschluss der Überfahrt verblieb eine Restspannung von 7,3 kPa bzw. 12,8 kPa im Boden.

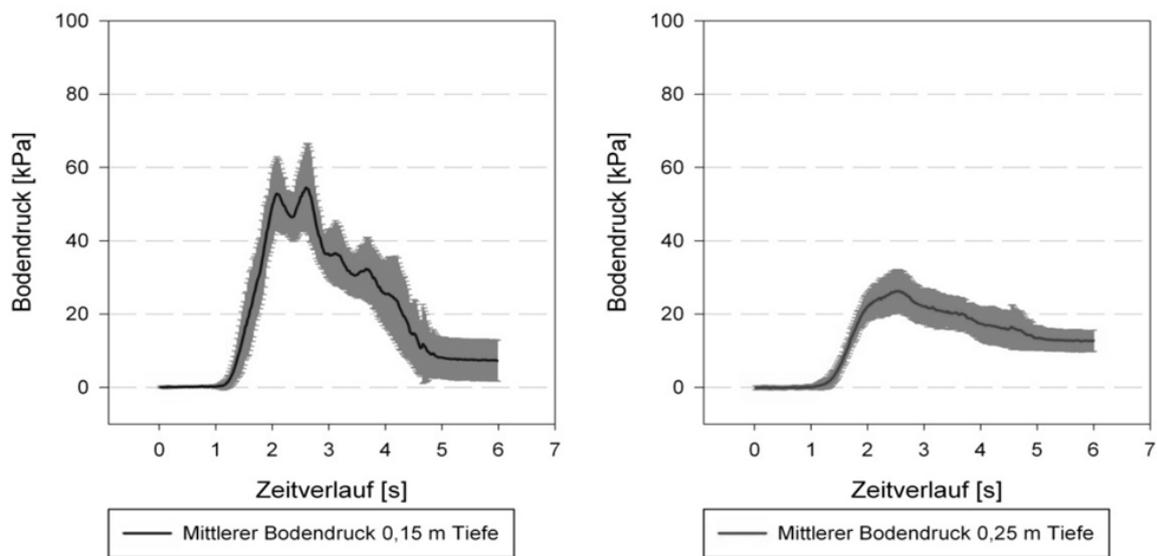


Abb. 60: Bodendruckprofil Geier 60 TLY, VS-0 [Nullvariante]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.

Tab. 20: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY, VS-0 [Nullvariante]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	VU	1. SR	2. SR	3. SR	4. SR	5. SR	HU
n	18	18	18	18	18	18	18
Mittel	52,9	54,5	36,7	32,4	24,3	11,9	7,8
SD	10,1	12,1	8,8	8,6	11,4	10,8	5,7
VK	19 %	22 %	24 %	24 %	47 %	91 %	73 %
Min	35,3	33,4	25,0	18,2	6,7	2,7	1,1
Max	76,3	81,3	55,8	50,0	45,6	51,0	19,6

Tab. 21: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY VS-0 [Nullvariante]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	VU	1. SR	2. SR	3. SR	4. SR	5. SR	HU
n	16	16	16	16	16	16	16
Mittel	26,3	22,2	20,4	17,0	16,5	13,0	12,6
SD	6,0	5,0	4,5	4,9	6,0	3,0	2,9
VK	23 %	23 %	22 %	29 %	36 %	23 %	23 %
Min	16,3	14,0	13,1	9,3	9,2	7,9	7,5
Max	35,9	29,9	27,4	27,0	30,1	17,1	16,4

4.5.5 Verzögerungsstufen

Der Versuchsplanung entsprechend, erfolgte die Einstellung der verschiedenen Verzögerungskräfte während der Überfahrten. Die tatsächlich erreichten Verzögerungskräfte sind der Tab. 15 in Kapitel 4.5.1 zu entnehmen. Weiterhin wird eine grafische Darstellung derselben zusammen mit den korrespondierenden Antriebsschlupfwerten jeweils einleitend zu Beginn der fahrzeugspezifischen Ergebnisbeschreibung vorgenommen. Aus der Darstellung können ebenfalls die spezifischen Grade der Kongruenz von planmäßiger und erreichter Verzögerungskraft in den Einzelvarianten abgelesen werden.

4.5.5.1 Fendt 211V Vario

Die in den Verzögerungsstufen gemessenen Antriebsschlupfwerte sind in Abb. 61 dargestellt. Mit zunehmender Verzögerungskraft in den Varianten VS-1 bis VS-3 nahm der mittlere Schlupf von 6 % auf 32 % zu. Die Einhaltung der Verzögerungskraft im Praxisversuch erfolgte äußerst präzise; die einfache Standardabweichung lag kontinuierlich im Bereich zwischen 0,3 und 0,4 kN.

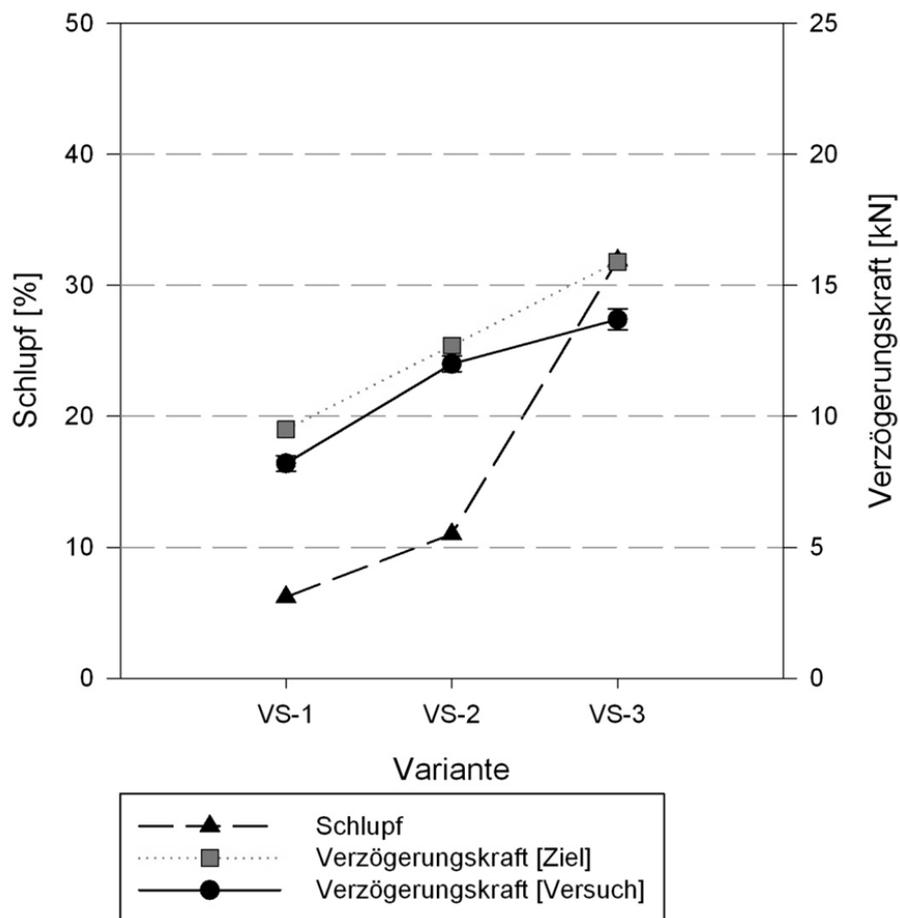


Abb. 61: Schlupf und Zugkraftverhältnisse in den jeweils dreimalig wiederholten Verzögerungsversuchen in VS-1 bis VS-3 für den Radtraktor Vario 211V.

In VS-1 mit 8,2 kN Verzögerungskraft zeigte sich eine relativ gleichartige Druckbeanspruchung des Bodengefüges unter beiden Fahrzeugachsen. Dies galt grundsätzlich für beiden Messtiefen, wobei das Druckniveau in 0,25 m Tiefe insgesamt geringer war. In einer Tiefe von 0,15 m wurde für die Vorderachse eine mittlere Druckbeanspruchung von 80,5 kPa, für die Hinterachse von 88,5 kPa gemessen. In 0,25 m Tiefe betrug der entsprechende Bodendruck 36,7 kPa bzw. 44,0 kPa. Als Folge der ungleichen Masseverteilung des Radtraktors auf die Fahrzeugachsen stützte die Hinterachse anteilig einen größeren Betrag ab. Die Druckbeanspruchung des Bodengefüges war hier entsprechend größer (Abb. 62, Tab 22).

Über die Tiefe erfolgte ein gleichmäßiger Druckabbau von 54 % unterhalb der Vorder- und 50 % unterhalb der Hinterachse. Nach erfolgter Überfahrt konnte kein Sondenrestdruck in beiden Tiefen registriert werden.

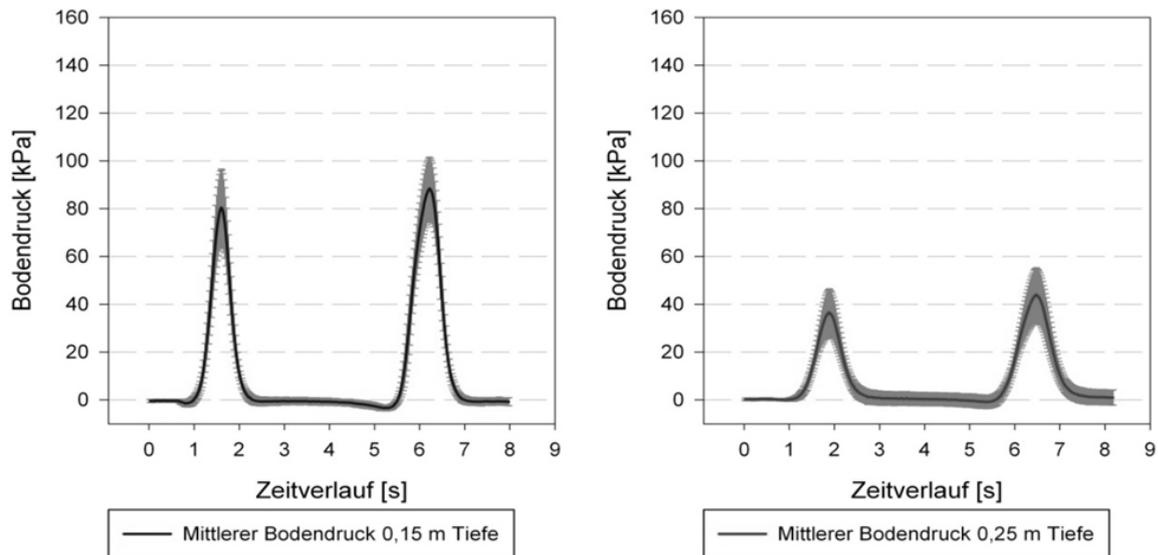


Abb. 62: Bodendruckprofil Fendt 211V Vario, VS-1 [8,2 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.

Tab. 22: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Fendt 211V Vario, VS-1 [8,2 kN].

	Messtiefe 0,15 m		Messtiefe 0,25 m	
	VA	HA	VA	HA
n	21	21	21	21
Mittel	80,5	88,5	36,7	44,0
SD	16,1	13,1	9,9	11,3
VK	20 %	15 %	27 %	26 %
Min	46,4	63,7	21,3	23,8
Max	108,4	114,3	57,3	67,9

Das Datenmaterial zu VS-2 mit 12,0 kN Verzögerungskraft bestätigte, dass sich mit Zunahme der Abbremsung die Zone des höchsten gemessenen Bodendrucks unter die Kontaktfläche der Hinterachse verschiebt. Die Vorderachse wurde zunehmend entlastet und induzierte folglich nur noch einen Druckimpuls von 62,4 kPa in 0,15 m Tiefe. In 0,25 m Tiefe war hingegen ein Druckanstieg auf 53,1 kPa zu beobachten. Für die Hinterachse wurden konstante bzw. steigende Drücke von 84,5 kPa bzw. 60,1 kPa gemessen. Der Verlauf der Druckkurve wies für den Impuls der Hinterachse

in beiden Messtiefen eine angedeutete Schiefe auf. Der Maximaldruck wurde somit zeitlich geringfügig verzögert erreicht (Abb. 63, Tab. 23).

Die angedeutete Vorderachsentslastung ging mit einer zunehmenden Hinterachsbelastung einher. Die oberflächennahe Messung zeigte vor diesem Hintergrund einen erwarteten Rückgang der vorderachsinduzierten Druckbeanspruchung gegenüber VS-1. Hingegen ließ die Hinterachse keinen verhältnismäßigen Anstieg erkennen. In 0,25 m Tiefe kam es zu einem Druckzuwachs unter den Rädern beider Achsen.

Der Druckabbau erfolgte heterogen. Für die Überfahrt der Vorderachse konnte eine Verminderung um 15 %, für die Hinterachse von 29 % festgestellt werden. Die Überfahrten induzierten wiederum keinen anhaltenden Restdruck im Boden.

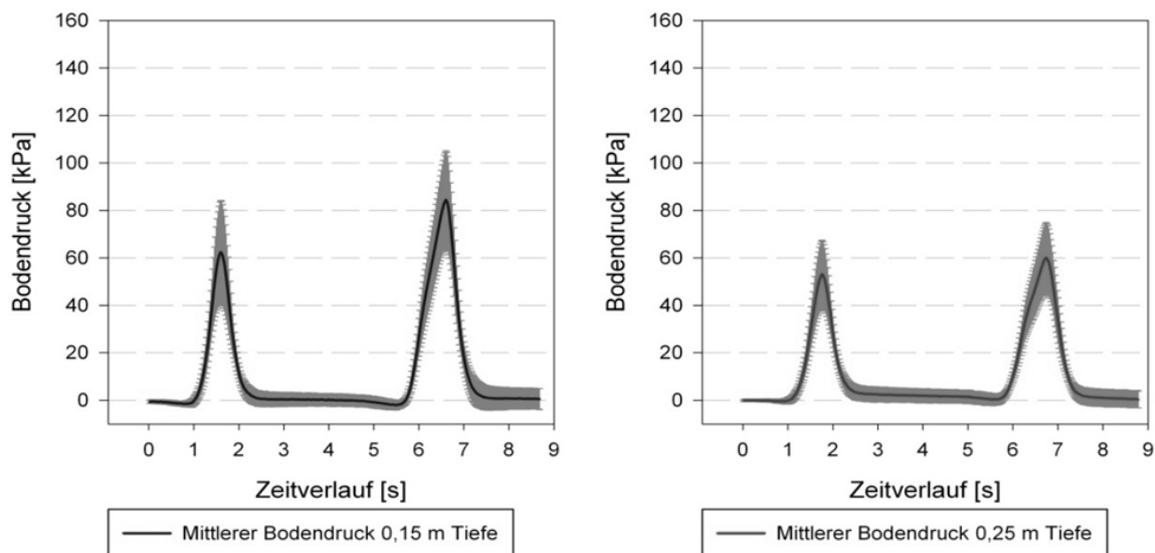


Abb. 63: Bodendruckprofil Fendt 211V Vario, VS-2 [12,0 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.

Tab. 23: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Fendt Vario 211V VS-2 [12,0 kN].

	Messtiefe 0,15 m		Messtiefe 0,25 m	
	VA	HA	VA	HA
n	21	21	21	21
Mittel	62,4	84,5	53,1	60,1
SD	21,8	20,7	14,3	14,8
VK	35 %	25 %	27 %	25 %
Min	29,7	53,3	27,4	31,2
Max	103,4	129,1	74,3	80,5

Bei maximaler Verzögerung mit 13,7 kN (VS-3) schritt die zugkraftbedingte dynamische Hinterachsbelastung fort. Für die Messtiefe 0,15 m resultierte die Vorderachspassage gegenüber VS-2 in einer moderaten, die Hinterachspassage in einer deutlichen Zunahme des Bodendrucks. Es wurden Drücke von 72,0 kPa und 132,8 kPa gemessen; gegenüber VS-2 entsprach dies einer Druckzunahme von 15 % bzw. 57 %. In einer Tiefe von 0,25 m war eine uneinheitliche Entwicklung zu erkennen. Der Bodendruck unterhalb der Vorderachse verminderte sich auf 41,1 kPa. Die Hinterachse induzierte konträr eine höhere Bodenspannung, welche mit 70,0 kPa zu quantifizieren war (Abb. 64, Tab. 24).

Der Druckabbau zeigte unter beiden Achsen ein ausgewogenes Verhältnis. Im Bodengefüge zwischen 0,15 m und 0,25 m Tiefe reduzierte sich der nachweisbare Bodendruck um 43 % bzw. 47 %. Für den tieferen Messhorizont konnte ein Sondenrestdruck von 4,2 kPa nach Abschluss der Überfahrten festgestellt werden.

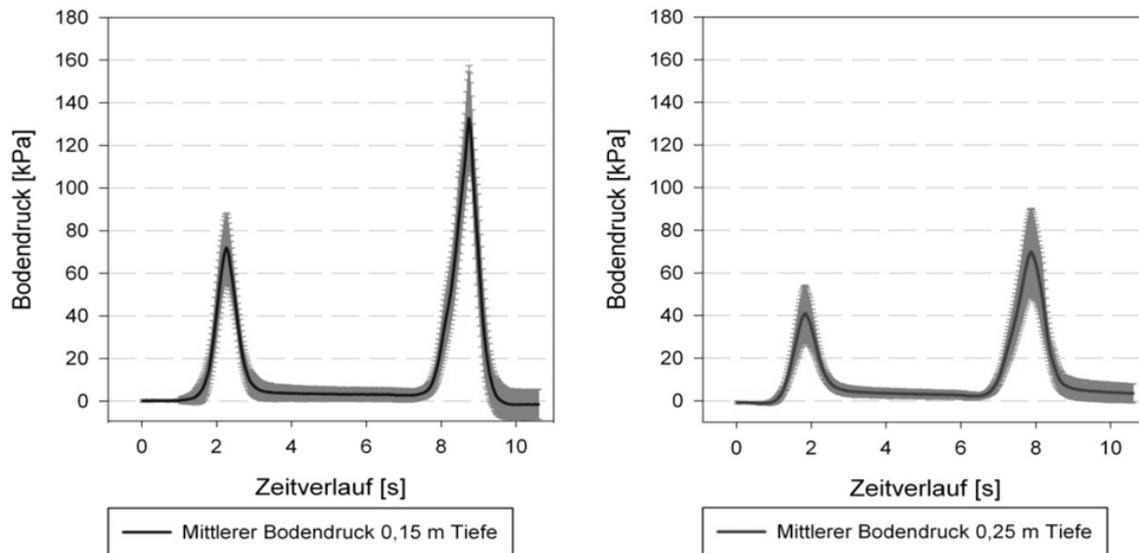


Abb. 64: Bodendruckprofil Fendt 211V Vario, VS-3 [13,7 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.

Tab. 24: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Fendt Vario 211V VS-3 [13,7 kN].

	Messtiefe 0,15 m		Messtiefe 0,25 m	
	VA	HA	VA	HA
n	21	21	20	20
Mittel	72,0	132,8	41,1	70,0
SD	16,3	24,7	13,2	20,3
VK	23 %	19 %	32 %	29 %
Min	47,6	97,8	17,7	27,4
Max	110,4	204,6	67,0	108,2

4.5.5.2 Carraro Mach 4

Wie beim Radtraktor nahm auch beim Carraro Mach 4 der Antriebsschlupf mit der Verzögerungsintensität zu (Abb. 65). Ausgehend von einem äußerst geringen Niveau von 2 % in VS-1 stieg er bis auf 44 % in VS-3 an. Die Übereinstimmung zwischen planmäßiger und erreichter Verzögerungskraft war hoch. Die einfache Standardabweichung der im Versuch erreichten Verzögerungskräfte betrug 0,6 - 1,1 kN.

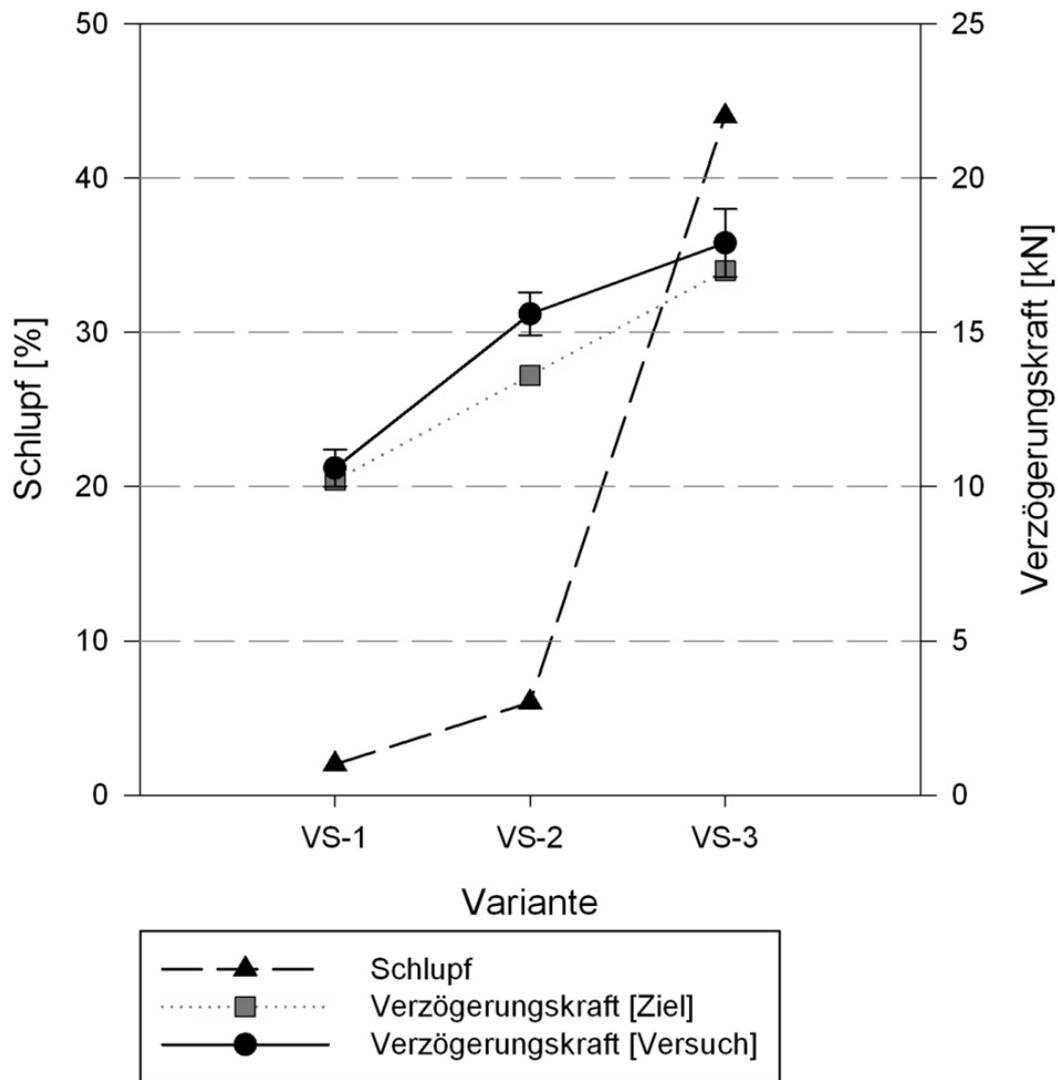


Abb. 65: Schlupf und Zugkraftverhältnisse in den jeweils dreimalig wiederholten Verzögerungsversuchen in VS-1 bis VS-3 beim Vierraupentraktor Carraro Mach 4.

In der Messtiefe von 0,15 m in VS-1 konnten die einzelnen Laufwerksrollen fallweise unterschieden werden. Die vordere Umlenkrolle und die erste Stützrolle des Vorderachslaufwerks waren durch ihre lokal ausgeprägten Druckmaxima von 22,9 kPa bzw. 33,0 kPa identifizierbar. Unterhalb der zweiten Stützrolle und der hinteren Umlenkrolle wurden deutlich geringere Drücke gemessen. Der Kurvenverlauf für die Messtiefe 0,25 m folgte annähernd der Kurve für 0,15 m Messtiefe. Die vordere Stützrolle zeigte wiederum ein lokales Druckmaximum auf einem gegenüber der Messtiefe 0,15 m leicht verminderten Niveau (Abb. 66, Tab. 25 und 26).

Das durch die Hinterachse verursachte Druckprofil war deutlicher ausgeprägt als das korrespondierende Profil der Vorderachse. In 0,15 m Tiefe waren sowohl unter der vorderen Umlenkrolle als auch unter den beiden folgenden Stützrollen lokale Druckmaxima zu erkennen. Die Impulsintensität nahm von der ersten (46,2 kPa) bis zur dritten Laufwerksrolle (32,1 kPa) kontinuierlich ab. Die hintere Umlenkrolle verursachte nur einen schwach ausgeprägten Druckimpuls.

Der Druckverlauf in der Messtiefe 0,25 m folgte annähernd dem Verlauf in 0,15 m Tiefe. Die vordere Umlenkrolle zeigte analog ein lokales Druckmaximum auf einem gegenüber der Messtiefe 0,15 m verminderten Niveau (28,0 kPa). Durch die nachfolgenden Stützrollen wurden weitestgehend konstante Druckbeanspruchungen hervorgerufen. Wie auch in 0,15 m Tiefe rief die Passage der hinteren Umlenkrolle keine eindeutig quantifizierbare Druckspannung im Boden hervor.

Insbesondere in einer Messtiefe von 0,15 m war ein temporärer Druckabfall im Zwischenrollenbereich erkennbar. Der Grad der Druckentlastung erreichte jedoch zu keinem Zeitpunkt ein Niveau von mehr als 10 kPa, lag also weiterhin deutlich über dem standardisierten Vordruckniveau.

Nach der Überfahrt verblieb ein Restdruck von 2,5 kPa bzw. 1,6 kPa in 0,15 m bzw. 0,25 m Tiefe. Für das Vorderachslaufwerk wurde ein Druckabbau von 5 %, für das Hinterachslaufwerk ein Abbau von 30 % mit zunehmender Messtiefe ermittelt.

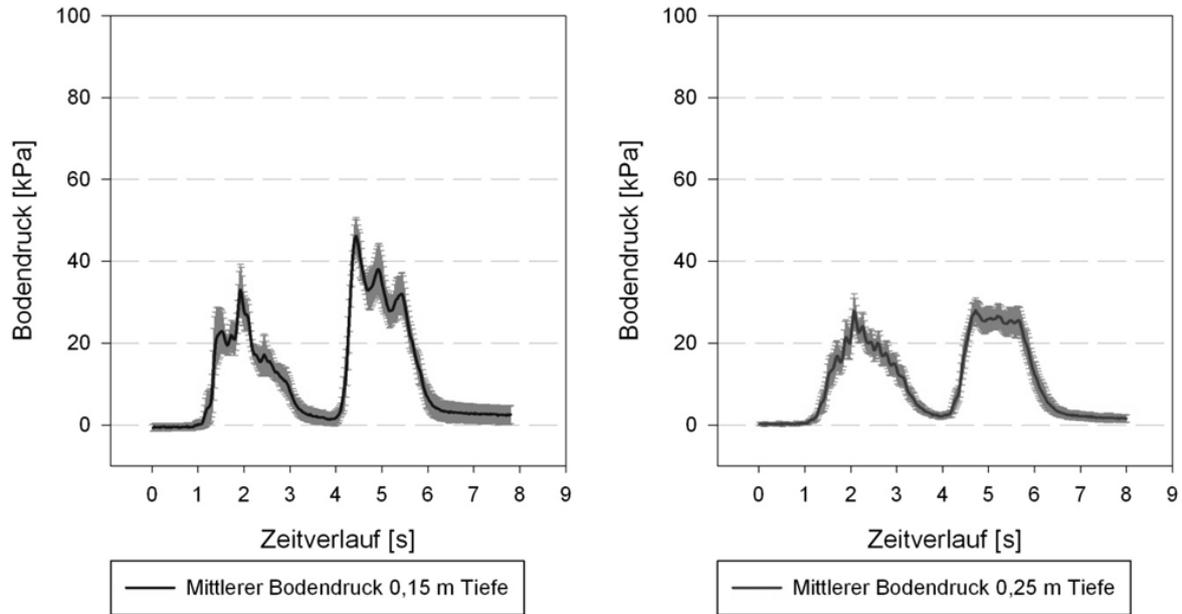


Abb. 66: Bodendruckprofil Carraro Mach 4, VS-1 [10,6 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.

Tab. 25: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4 VS-1 [10,6 kN]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	Vorderachse				Hinterachse			
	VU	1. SR	2. SR	HU	VU	1. SR	2. SR	HU
n	9	9	9	9	9	9	9	9
Mittel	22,9	33,0	17,2	10,8	46,2	38,1	32,1	12,8
SD	5,1	6,2	5,0	3,3	4,5	6,1	4,9	3,4
VK	22 %	19 %	29 %	31 %	10 %	16 %	15 %	27 %
Min	14,7	24,4	10,9	6,5	40,0	29,9	24,5	6,3
Max	29,6	44,1	29,4	15,9	56,1	48,0	41,8	15,8

Tab. 26: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4 VS-1 [10,6 kN]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	Vorderachse				Hinterachse			
	VU	1. SR	2. SR	HU	VU	1. SR	2. SR	HU
n	10	10	10	10	10	10	10	10
Mittel	16,8	27,9	20,0	15,1	28,0	26,6	25,6	10,1
SD	3,4	4,2	2,5	2,5	3,0	3,0	3,3	3,0
VK	20 %	15 %	13 %	17 %	11 %	11 %	13 %	30 %
Min	11,9	23,0	15,0	11,6	24,0	21,1	21,0	5,3
Max	23,0	37,3	23,5	18,7	33,9	30,0	31,9	15,7

Gegenüber VS-1 ließ das Druckprofil des Frontlaufwerks für VS-2 in 0,15 m Tiefe eine eindeutige Zuordnung der Druckmaxima zu den einzelnen Laufwerksrollen zu. Die Hauptdruckbeanspruchung war vergleichbar mit VS-1 weiterhin unter der ersten Stützrolle lokalisiert (41,6 kPa). Die Passage der übrigen Rollen des Frontlaufwerks rief mit rd. 30,0 kPa eine nahezu ausgeglichene Druckbeanspruchung hervor (Abb. 67, Tab. 27 und 28).

In 0,15 m Tiefe rief die Passage der Hinterachse in VS-2 eine deutlich größere Druckbeanspruchung als die Überfahrt in VS-1 hervor. Dabei wurde eine vergleichbare Charakteristik des Druckprofils erkennbar. Ausgehend von dem absoluten Druckmaximum unter der vorderen Umlenkrolle mit 70,3 kPa sank die messbare Druckbeanspruchung in Richtung der zweiten Stützrolle auf 40,8 kPa ab. Die hintere Umlenkrolle war wiederum nur angedeutet.

Die Messkurve für die Tiefe 0,25 m zeigte für die Vorderachse einen glockenförmigen Verlauf mit zentral lokalisiertem Druckplateau; das mittlere Druckniveau betrug rd. 15,3 kPa. Eine Abgrenzung der Einzelrollen war nicht möglich. Im Vergleich mit den Beobachtungen bei VS-1 war festzustellen, dass sich die relativen Druckmaxima tendenziell von der vorderen Laufwerkshälfte zur hinteren Laufwerkshälfte verschieben.

Für die Hinterachse folgte der Druckverlauf in 0,25 m Tiefe nahezu parallel dem Verlauf in 0,15 m Tiefe, allerdings auf einem verminderten Niveau. Im Bereich der ersten

drei Laufwerksrollen unterlag die Druckspannung einem Abbau von 46,1 kPa auf 35,0 kPa.

Nach Abschluss der Überfahrten verblieben Restdrücke von 4,2 kPa sowie von 5,6 kPa in einer Tiefe von 0,15 m bzw. 0,25 m. Der Druckabbau unter den beiden Einzellaufwerken mit zunehmender Bodentiefe unterschied sich von den in VS-1 beschriebenen Beobachtungen. Nachgewiesen wurde ein Druckabbau von 51 % unter dem Frontlaufwerk sowie von 16 % unter dem Hecklaufwerk.

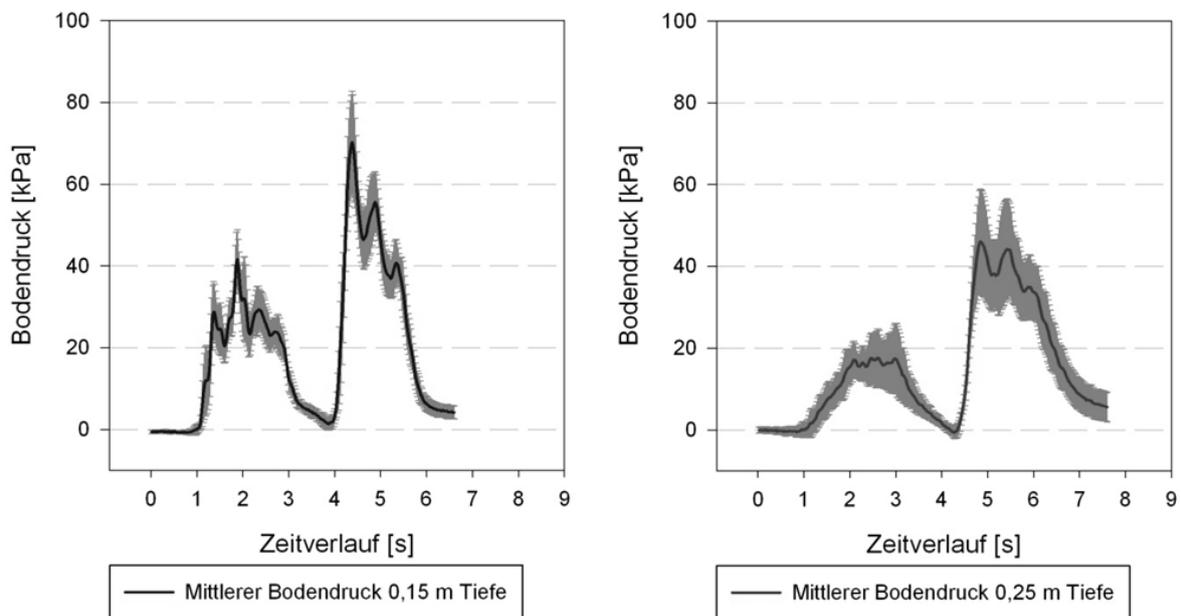


Abb. 67: Bodendruckprofil Carraro Mach 4, VS-2 [15,6 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.

Tab. 27: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4 VS-2 [15,6 kN]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	Vorderachse				Hinterachse			
	VU	1. SR	2. SR	HU	VU	1. SR	2. SR	HU
n	9	9	9	9	9	9	9	9
Mittel	28,7	41,6	29,4	23,9	70,3	55,6	40,8	11,9
SD	7,4	7,3	5,7	3,3	12,5	7,4	5,6	3,1
VK	26 %	18 %	19 %	14 %	18 %	13 %	14 %	26 %
Min	19,5	29,8	23,1	19,2	56,0	46,4	33,4	7,8
Max	41,4	50,7	42,2	28,5	93,7	70,8	49,6	17,6

Tab. 28: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4 VS-2 [15,6 kN]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	Vorderachse				Hinterachse			
	VU	1. SR	2. SR	HU	VU	1. SR	2. SR	HU
n	10	10	10	10	10	10	10	10
Mittel	8,8	17,2	17,6	17,5	46,1	44,3	35,0	24,1
SD	3,4	4,6	7,0	8,6	12,8	12,3	7,7	7,8
VK	39 %	27 %	40 %	49 %	28 %	28 %	22 %	32 %
Min	5,0	11,9	7,6	6,5	25,2	24,0	21,7	11,4
Max	14,7	29,2	31,5	35,8	64,4	63,2	48,8	36,3

Die Verzögerung mit 17,9 kN in VS-3 rief gegenüber VS-2 eine Entlastung der beiden vorderen Laufwerksrollen des Frontlaufwerks hervor; die gemessenen Drücke unterhalb der beiden nachfolgenden Rollen blieben annähernd konstant. Gleichzeitig kam es zu einem Anstieg des Bodendrucks unter den beiden hinteren Rollen. Dieser Effekt war sowohl für die Messtiefe 0,15 m, als auch für 0,25 m in abgeschwächter Form zu beobachten. Einzelrollen innerhalb des Frontlaufwerks waren nicht mehr zu identifizieren. In 0,15 m Tiefe wurde ein Maximaldruck von 28,0 kPa, in 0,25 m Tiefe von 21,9 kPa gemessen (Abb. 68, Tab. 29 und 30).

Das Hecklaufwerk ließ eine fortschreitende Abstützung der Laufwerkslast über die vordere Umlenkrolle erkennen. Maximal wurde hier ein Bodendruck von 165,9 kPa in einer Tiefe von 0,15 m sowie von 66,3 kPa in einer Tiefe von 0,25 m gemessen. Auffällig war die starke Zunahme der Bodenbeanspruchung im oberflächennahen Bereich bis 0,15 m Tiefe. In dieser Zone rief die 15 %-ige Steigerung der Verzögerungskraft von 15,6 kN auf 17,9 kN einen Anstieg der Maximaldrücke um bis zu 240 % hervor. Für die nachfolgenden Laufwerksrollen war eine nahezu lineare Degression des messbaren Bodendrucks nachweisbar.

Nach Abschluss der Überfahrten verblieb in 0,15 m Tiefe ein leicht unterhalb des Vordruckniveaus liegender Restdruck von -5,0 kPa. In 0,25 m Tiefe betrug dieser 6,9 kPa. Für die Vorderachse wurde ein Druckabbau von 12 %, für die Hinterachse von 50 % über die Tiefe ermittelt.

Die Verzögerungskraft von 17,9 kN stellte das am gewählten Versuchsstandort spezifisch erreichbare Maximum dar. Die Abbremsung resultierte in einem nachweisbaren Antriebsschlupf von 44 %, einhergehend mit entsprechenden Bodenscherungs- und Bodenverlagerungsprozessen. Durch die Tendenz des Laufwerks, sich bei sinkendem Anteil an effektiver Vorwärtsfahrt in den Boden einzugraben, bestand die Gefahr einer Zerstörung der Schlauchdrucksonden. Vor diesem Hintergrund musste die Messung während der ersten der regulär dreifach wiederholten Passage abgebrochen werden. In der Konsequenz waren ausschließlich die Ergebnisse dreier Sensoren in einer Messtiefe von 0,15 m auszuwerten; in 0,25 m Tiefe lag die Anzahl der Wiederholungen bei sechs.

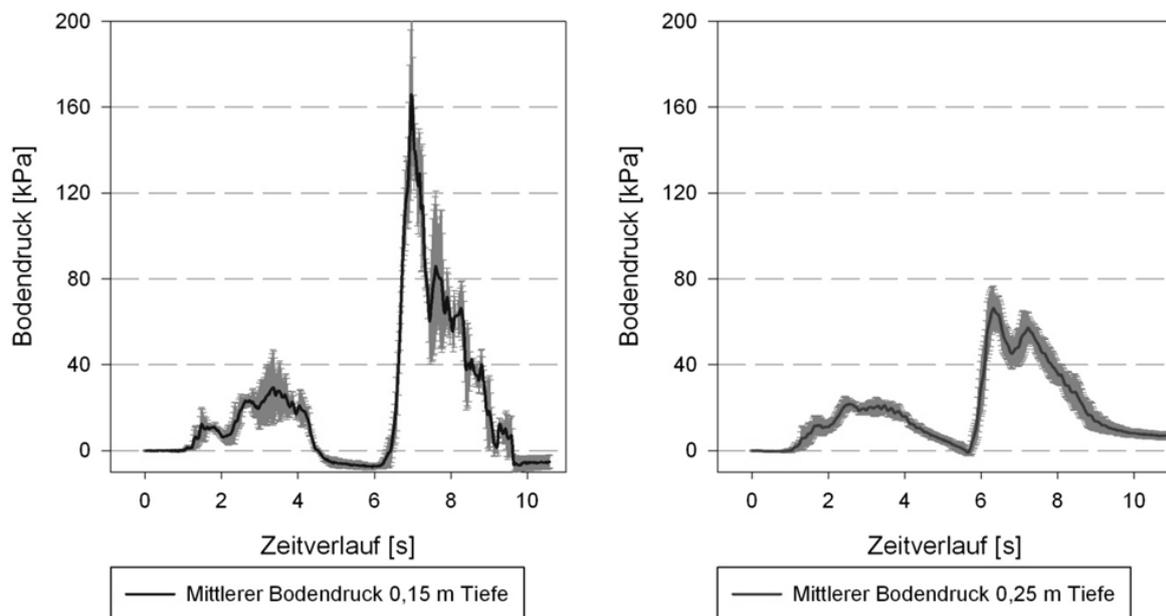


Abb. 68: Bodendruckprofil Carraro Mach 4, VS-3 [17,9 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe. Gegenüber den vorherigen Diagrammen ist die abweichende Skalierung der Ordinate zu beachten.

Tab. 29: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4 VS-3 [17,9 kN]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	Vorderachse				Hinterachse			
	VU	1. SR	2. SR	HU	VU	1. SR	2. SR	HU
n	3	3	3	3	3	3	2	2
Mittel	10,9	13,8	28,0	21,7	165,9	86,0	66,4	31,8
SD	1,0	8,6	13,4	4,0	45,9	34,9	12,1	5,6
VK	9 %	62 %	48 %	18 %	28 %	41 %	18 %	18 %
Min	9,4	7,3	15,8	16,8	106,5	57,4	54,4	26,2
Max	11,8	26,0	46,6	26,7	218,4	135,2	78,5	37,4

Tab. 30: Datenanalyse der durch Vorder- und Hinterachspassage ausgelösten Druckereignisse. Carraro Mach 4 VS-3 [17,9 kN]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	Vorderachse				Hinterachse			
	VU	1. SR	2. SR	HU	VU	1. SR	2. SR	HU
n	6	6	6	6	6	6	6	6
Mittel	11,9	21,9	21,2	10,5	66,3	57,2	35,5	16,7
SD	4,5	2,5	2,2	2,2	10,3	7,5	4,9	6,3
VK	38 %	11 %	10 %	21 %	16 %	13 %	14 %	38 %
Min	6,4	18,2	18,7	6,6	47,2	43,5	26,3	7,8
Max	19,3	25,6	25,4	13,2	78,0	68,4	39,8	29,2

Nachfolgend werden die gemessenen Maximalbodendrucke der jeweils dreifach wiederholten Messüberfahrten in VS-1 bis VS-3 in Abhängigkeit zur spezifisch erreichten Verzögerungskraft dargestellt. Abb. 69 zeigt eine annähernd exponentielle Progression der Bodenspannung mit zunehmender Verzögerungsintensität. Der Effekt war für beide Tiefenzonen nachweisbar. Eine logarithmisch gewählte Skalierung der Ordinatenachse bewirkte eine weitestgehende Linearisierung des ursprünglichen Kurvenverlaufs. Das Modell zeigte für beide Messtiefen ein hohes bis sehr hohes Bestimmtheitsmaß und somit die Qualität der vorgenommenen linearen Approximation (Abb. 70). Einzig das Druckverhalten der vierten Hinterachsrolle (hintere Umlenkrolle) in einer Tiefe von 0,15 m ließ nur ein mittleres Bestimmtheitsmaß erkennen.

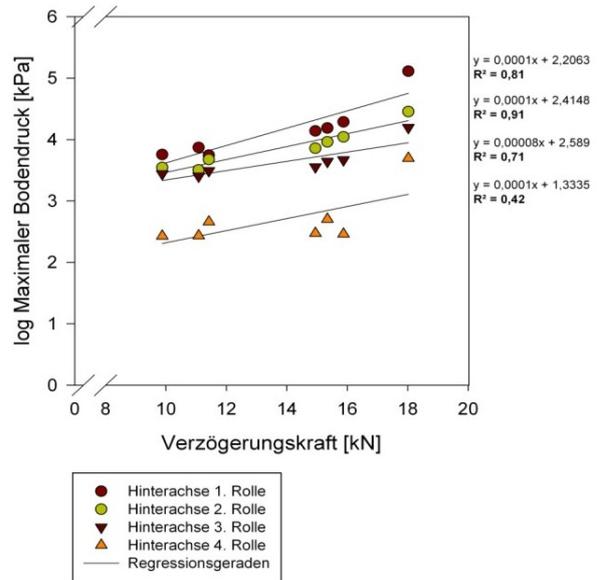
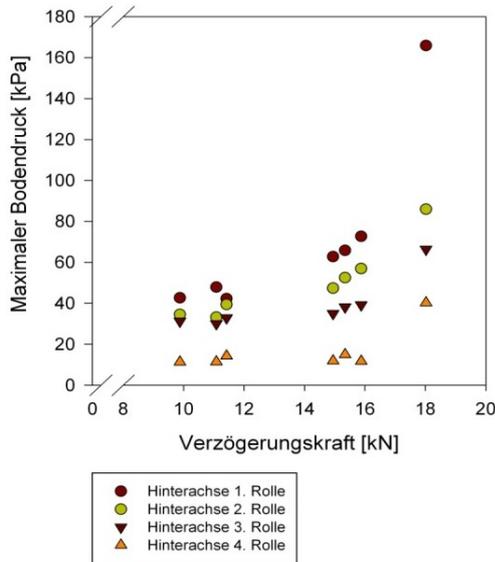


Abb. 69: Druckimpulse der Stützrollen am Hinterachslaufwerk des Carraro Mach 4 als Funktion der Verzögerungskraft. Messtiefe 0,15 m.

Abb. 70: Korrelation aus Abb. 69 in halb-logarithmischer Darstellung.

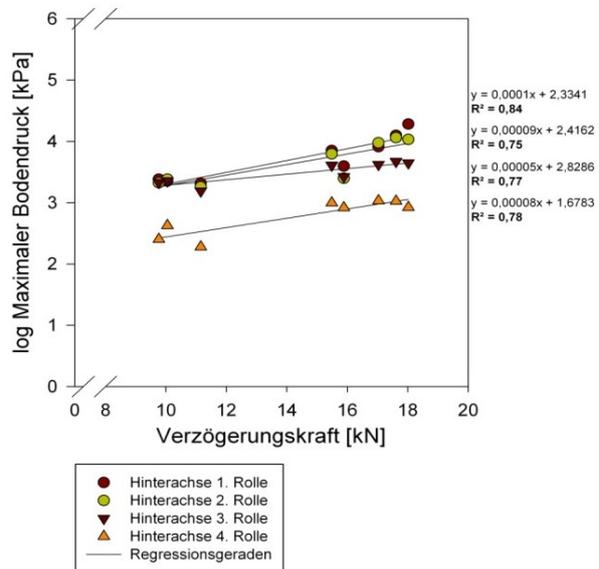
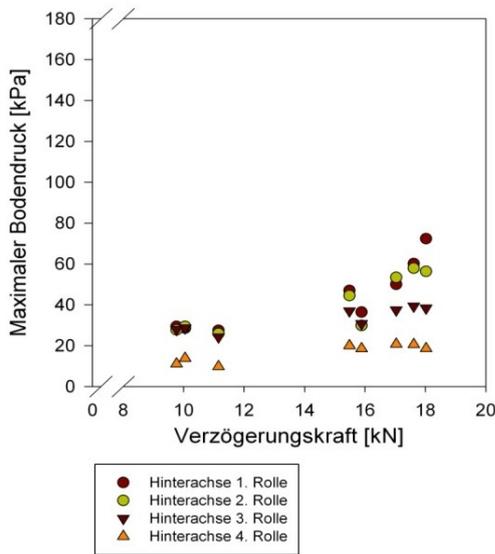


Abb. 71: Druckimpulse der Stützrollen am Hinterachslaufwerk des Carraro Mach 4 als Funktion der Verzögerungskraft. Messtiefe 0,25 m.

Abb. 72: Korrelation aus Abb. 71 in halb-logarithmischer Darstellung.

Insgesamt konnte mit zunehmender Verzögerung ein für alle Einzelrollen der Hinterachse nachweisbarer Druckanstieg belegt werden. Für die vordere Laufwerkshälfte fiel dieser Anstieg überproportional stark aus, wohingegen die hintere Laufwerkshälfte eine relative Druckkonstanz bzw. eine Progression auf geringerem Niveau zeigte. Diese Beobachtung war analog auf die Messtiefe 0,25 m übertragbar (Abb. 71 und 72). Der mit steigender Abbremsung einhergehende Druckanstieg zwischen den Varianten VS-1, VS-2 und VS-3 war für die jeweils vordere Umlenkrolle in beiden Messtiefen signifikant ($p < 0,001$, via H-Test; Abb. 73).

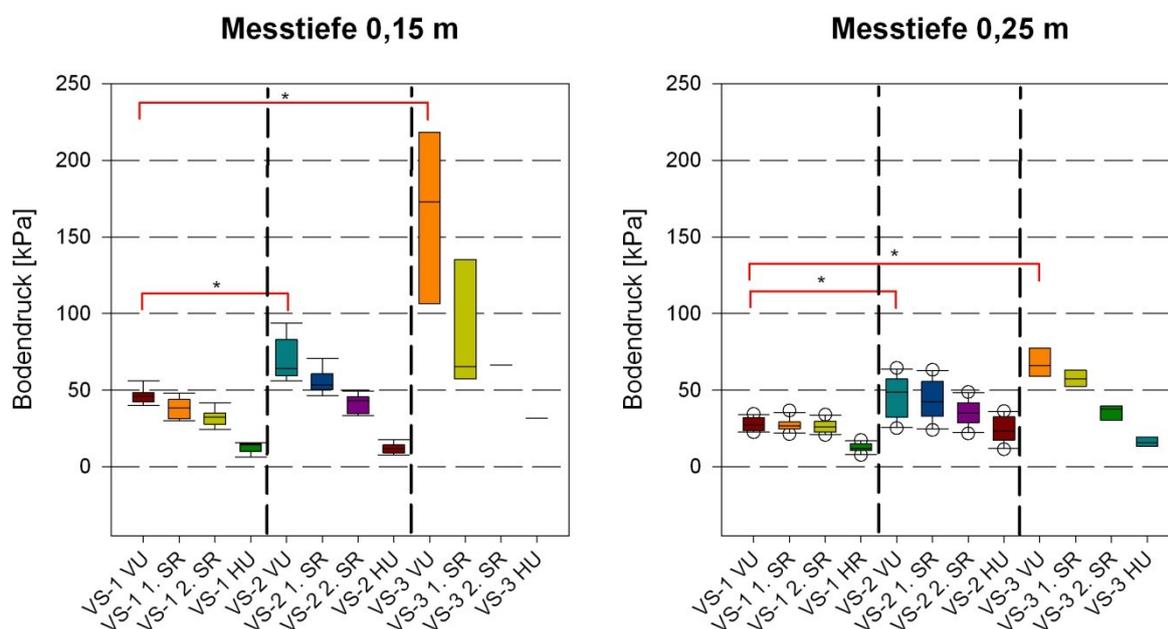


Abb. 73: Gegenüberstellung der mittleren Bodendruckimpulse des heckseitig links angebrachten Bandlaufwerks des Versuchsfahrzeugs Carraro Mach 4. Die Darstellung erfolgt für die verschiedenen Verzögerungsstufen jeweils einzelrollenspezifisch differenziert. Die Daten sind den entsprechenden Wertetabellen in Kapitel 4.5 entnommen. Die Nomenklatur folgt der dort vorgenommenen Definition.

4.5.5.3 Geier 60 TLY

Der Zweiraupentraktor Geier 60 TLY zeigte im Vergleich mit dem Rad- und Vierraupentraktor die geringsten Antriebsschlupfwerte (Abb. 74). In VS-1 war kein nennenswerter Schlupf nachweisbar; in der maximalen Verzögerungsstufe VS-3 betrug dieser 15 %. Abweichungen traten zwischen der tatsächlich erreichten und planmäßig vorgesehenen Verzögerungsintensität auf. Im Versuchsbetrieb wurden jeweils rd.

10 - 15 % höhere Verzögerungskräfte erreicht. Die einfache Standardabweichung der Verzögerungskraft im dreimalig wiederholten Einzelversuch betrug 0,5 - 0,6 kN.

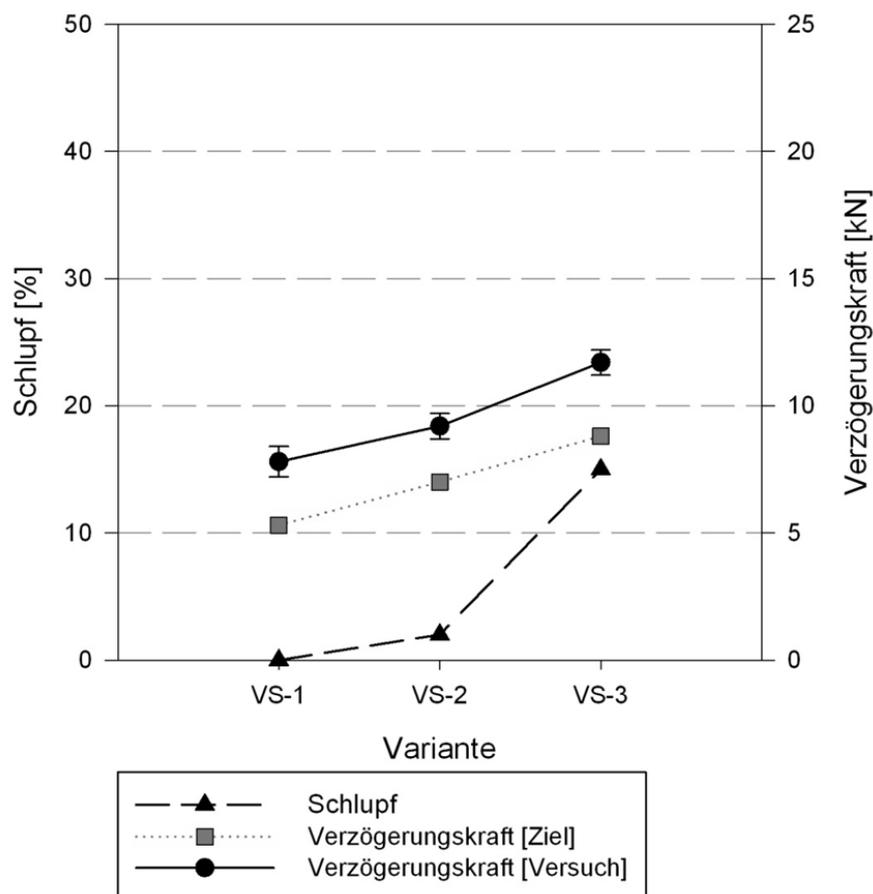


Abb. 74: Schlupf und Zugkraftverhältnisse in den jeweils dreimalig wiederholten Verzögerungsversuchen in VS-1 bis VS-3 beim Zweiraupentraktator 60 TLY.

In VS-1 mit einer Verzögerungskraft von 7,8 kN waren in einer Tiefe von 0,15 m sechs einzelne Umlenk- und Stützrollen des Laufwerks deutlich zu erkennen. Die Druckimpulse wurden verursacht durch die fünf Stützrollen des Fahrwerks sowie die hintere Umlenkrolle. Die vordere Umlenkrolle war hingegen nahezu vollständig entlastet; ein korrespondierender Druckimpuls nicht nachweisbar. Die Position dieser Umlenkrolle konnte ausschließlich aus der Fahrgeschwindigkeit und der bekannten Laufwerksgeometrie hergeleitet werden. In 0,15 m Tiefe zeigte das Laufwerk eine verhältnismäßig gleichmäßige Druckverteilung, wobei für die zweite Stützrolle ein lokales Druckmaximum von 29,2 kPa nachzuweisen war. Unterhalb der quasi vollständig entlasteten vorderen Umlenkrolle wurde ein Bodendruck von

1,6 kPa gemessen. Zwischen den Einzelimpulsen der Laufwerksrollen war ein Abfall des Bodendrucks auf ein Grundniveau von etwa 17,0 kPa zu beobachten (Abb. 75, Tab. 31 und 32).

In der Messtiefe 0,25 m zeichneten sich die Einzelrollen auf abgeschwächtem Niveau ebenfalls ab. Vergleichbar mit dem Druckverlauf in 0,15 m Tiefe trat eine überdurchschnittlich starke Entlastung im Bereich der vorderen vorderen Umlenkrolle auf. Die Druckimpulse der nachfolgenden Stützrollen erreichten ein mittleres Niveau von etwa 15,0 kPa. Der maximal in 0,25 m Tiefe gemessene Druck betrug 19,9 kPa, unterhalb der hinteren Umlenkrolle. Dieser Wert war vergleichbar mit dem an selbiger Position gemessenen Wert in 0,15 m Tiefe.

Nach Abschluss der Messüberfahrten verblieb ein Restdruckniveau von 2,5 kPa in 0,15 m Tiefe sowie von 5,0 kPa in 0,25 m Tiefe. Der durchschnittliche Druckabbau zwischen 0,15 m und 0,25 m Tiefe wurde mit 32 % berechnet.

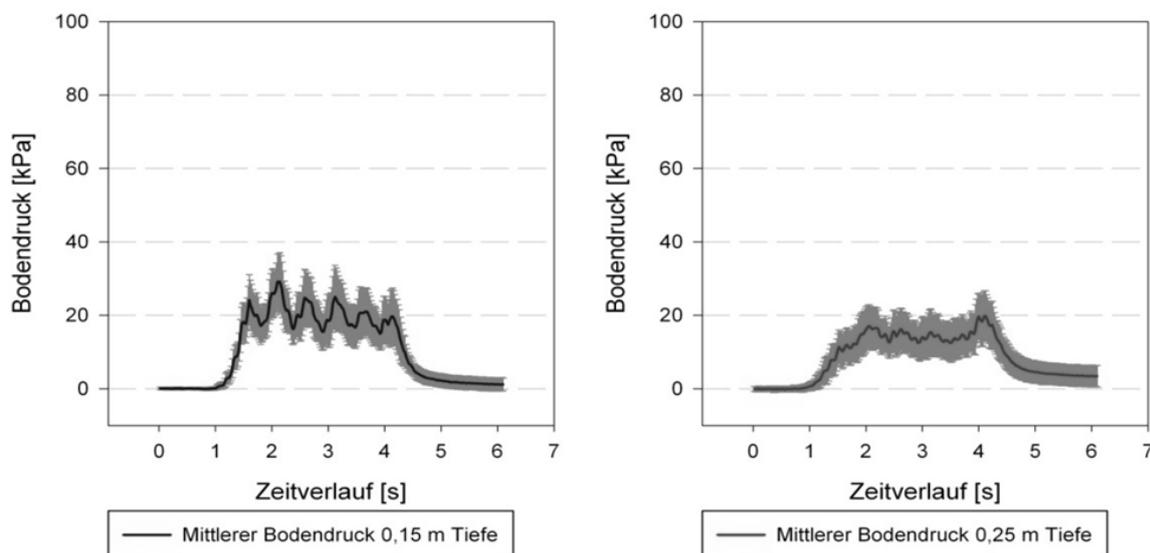


Abb. 75: Bodendruckprofil Geier 60 TLY, VS-1 [7,8 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.

Tab. 31: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY VS-1 [7,8 kN]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	VU	1. SR	2. SR	3. SR	4. SR	5. SR	HU
n	28	28	28	28	28	28	28
Mittel	1,6	24,2	29,2	24,8	25,0	21,1	19,7
SD	1,3	6,9	7,9	7,8	8,6	6,5	7,7
VK	81 %	29 %	27 %	31 %	34 %	31 %	39 %
Min	0	13,3	16,5	13,7	11,1	11,8	4,6
Max	3,9	35,3	41,2	38,8	40,9	35,0	34,0

Tab. 32: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY VS-1 [7,8 kN]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	VU	1. SR	2. SR	3. SR	4. SR	5. SR	HU
n	19	19	19	19	19	19	19
Mittel	3,7	12,0	17,1	16,3	15,4	14,8	19,9
SD	2,7	4,6	5,8	5,7	6,4	5,5	6,9
VK	73 %	38 %	34 %	35 %	42 %	37 %	35 %
Min	0,3	5,1	8,7	8,6	7,8	8,0	10,8
Max	8,8	19,2	28,3	28,0	31,2	28,8	33,1

Gegenüber den vorherigen Verzögerungsversuchen resultierte die Abbremsung mit 9,2 kN in einer deutlich erhöhten Druckbeanspruchung des Oberbodens. Die Passage der Einzelrollen des Bandlaufwerks verursachte Bodendrucke von 22,8 - 40,1 kPa in einer Messtiefe von 0,15 m. Die vordere Umlenkrolle wurde vollständig entlastet; zum Zeitpunkt der Überfahrt wurden 1,1 kPa gemessen. Analog zur vorherigen Überfahrt erfolgte der Nachweis des Druckmaximums mit 40,1 kPa unter der zweiten Stützrolle. Die folgenden Stützrollen induzierten kontinuierlich abnehmende Druckspannungen im Oberboden. Im Bereich der hinteren Umlenkrolle zeichnete sich ein relatives Druckmaximum mit 35,9 kPa ab. Im Zwischenrollenbereich wurden vergleichbar mit VS-1 Drücke um 17,0 kPa gemessen (Abb. 76, Tab. 33 und 34).

In einer Tiefe von 0,25 m war der Druckverlauf nahezu identisch mit dem Verlauf bei VS-1. Das mittlere Druckniveau betrug rd. 13,0 kPa. Wie auch in 0,15 m Tiefe war ein Nachweis der vorderen Umlenkrolle nicht möglich; das Vordruckniveau der

Schlauchdrucksonden wurde mit 1,9 kPa faktisch nicht überschritten. Die höchste Bodenspannung mit 18,2 kPa trat unterhalb der hinteren Umlenkrolle auf.

Für 0,15 m Tiefe war nach Abschluss der Überfahrten kein residualer Bodendruck nachweisbar. In 0,25 m Tiefe blieb ein Restdruck von 2,5 kPa erhalten. Der tiefenabhängige Druckabbau über die Beobachtungstiefe war mit 53 % zu quantifizieren.

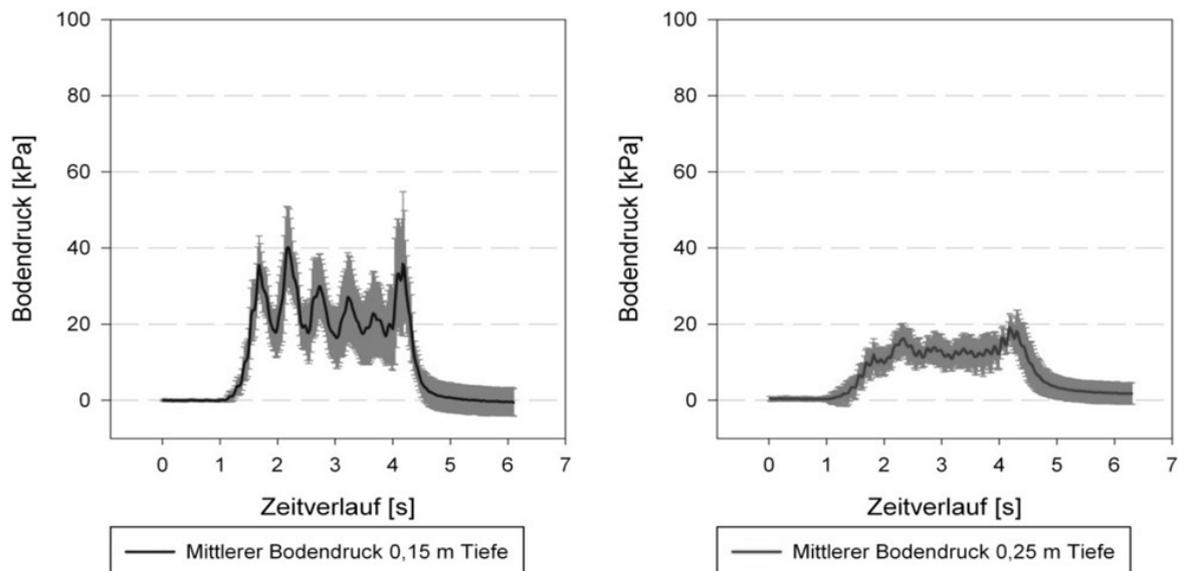


Abb. 76: Bodendruckprofil Geier 60 TLY, VS 2 [9,2 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.

Tab. 33: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY VS-2 [9,2 kN]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	VU	1. SR	2. SR	3. SR	4. SR	5. SR	HU
n	21	21	21	21	21	21	21
Mittel	1,1	35,5	40,1	30,0	27,2	22,8	35,9
SD	1,4	7,6	10,6	8,5	11,6	11,1	18,9
VK	127 %	21 %	26 %	28 %	43 %	49 %	53 %
Min	-0,2	19,7	21,1	13,7	6,0	4,9	9,8
Max	6,7	51,8	64,2	47,8	55,8	48,2	81,7

Tab. 34: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY VS-2 [9,2 kN]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	VU	1. SR	2. SR	3. SR	4. SR	5. SR	HU
n	21	21	21	21	21	21	21
Mittel	1,9	12,1	16,3	13,9	13,6	14,3	18,2
SD	2,4	4,1	3,9	4,2	4,1	3,8	5,5
VK	126 %	34 %	24 %	30 %	30 %	27 %	30 %
Min	-0,1	7,5	10,7	7,3	6,2	9,0	9,1
Max	11,5	24,4	24,7	21,8	22,3	22,1	28,1

Die Überfahrt bei maximaler Verzögerung führte im Oberboden zu einer homogenen Verteilung der Bodenspannung zwischen der zweiten Stützrolle und der hinteren Umlenkrolle. Der gemessene Bodendruck betrug rd. 34,0 kPa. Ein durch Überfahrt der vorderen Umlenkrolle hervorgerufener Druckimpuls war analog zu VS-1 und VS-2 nicht nachweisbar bzw. bewegte sich dieser im Bereich der Sondenvorspannung. Zusätzlich ließ die erste Stützrolle einen verminderten Druckimpuls von 23,8 kPa als Folge einer zunehmenden Lastverlagerung in Richtung des hinteren Laufwerksbereichs erkennen. Das Druckmaximum in einer Tiefe von 0,15 m betrug 36,6 kPa und war unterhalb der zweiten und dritten Stützrolle lokalisiert (Abb. 77, Tab. 35 und 36).

In 0,25 m Tiefe war einen Anstieg der gemessenen Bodenspannung ausgehend von der ersten Stützrolle zu erkennen. Die Überfahrt der vorderen Umlenkrolle verursachte analog zum Oberboden keine messbare Bodenbeanspruchung. Mit 17,4 kPa lag das Druckmaximum im Bereich der hinteren Umlenkrolle. Die übrigen Laufwerksrollen riefen eine konstant niedrige Druckspannung im Boden um 8,0 kPa hervor.

Nach Abschluss der Überfahrten blieb ein Restdruck von 3,5 kPa in 0,15 m bzw. 2,7 kPa in 0,25 m Tiefe im Bodengefüge nachweisbar. Der tiefenabhängige Druckabbau betrug 72 %.

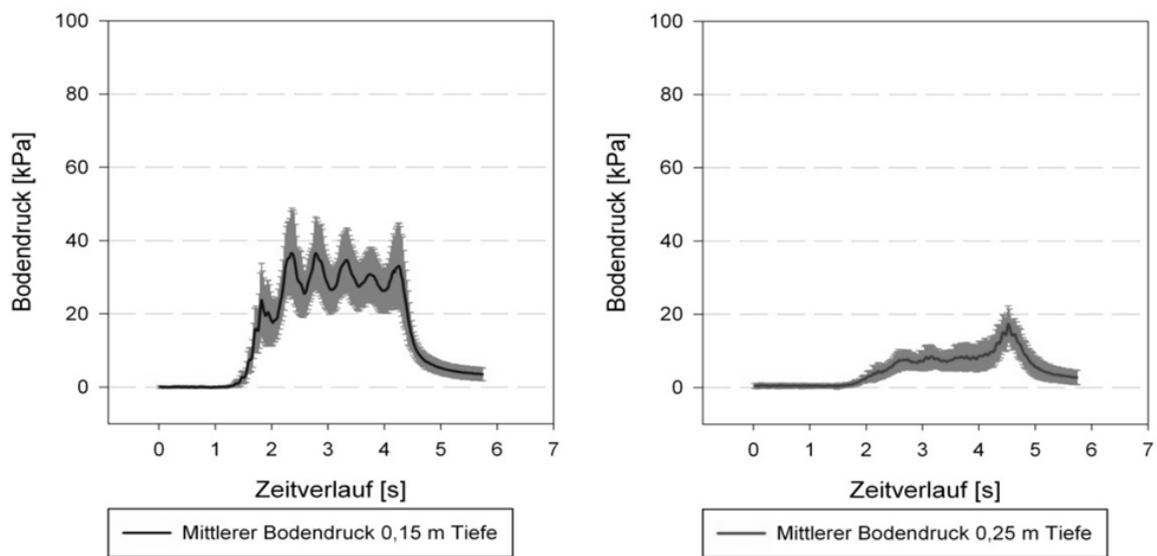


Abb. 77: Bodendruckprofil Geier 60 TLY, VS-3 [11,7 kN]. Schlauchdrucksonden lagen in 0,15 m und 0,25 m Tiefe.

Tab. 35: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY VS-3 [11,7 kN]. Messtiefe 0,15 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	VU	1. SR	2. SR	3. SR	4. SR	5. SR	HU
n	32	32	32	32	32	32	32
Mittel	2,8	23,8	36,6	36,6	34,7	30,8	33,1
SD	1,7	10,0	12,3	9,9	8,6	7,4	11,7
VK	61 %	42 %	34 %	27 %	25 %	24 %	35 %
Min	0,5	9,1	16,2	16,6	16,8	15,5	13,9
Max	7,3	49,2	59,6	51,7	48,6	42,3	56,9

Tab. 36: Datenanalyse der fahrwerksinduzierten Druckereignisse. Geier 60 TLY VS-3 [11,7 kN]. Messtiefe 0,25 m. Einzelrollenspezifisch differenziert.

	VU	1. SR	2. SR	3. SR	4. SR	5. SR	HU
n	14	14	14	14	14	14	14
Mittel	1,0	4,2	7,6	8,5	8,4	9,2	17,4
SD	0,7	1,9	2,5	2,9	3,8	4,2	4,9
VK	70 %	45 %	33 %	34 %	45 %	46 %	28 %
Min	0,1	2,5	4,2	5,5	4,8	4,9	9,7
Max	2,3	9,4	13,8	16,7	19,6	18,8	26,5

4.6 Gewichteter mittlerer Bodendruck

Die Ergebnisdarstellung der durchgeführten Berechnungsprozedur zum gewichteten mittleren Bodendruck wird gesondert für die fahrzeugspezifischen Nullvarianten und die Verzögerungsstufen vorgenommen. Datengrundlage waren die in Kapitel 4.5.4 und 4.5.5 gezeigten Messwerte zu den dynamischen Bodendruckmessungen.

4.6.1 Nullvarianten

Für alle Fahrzeuge nahm der mittlere gewichtete Bodendruck (GMP) mit zunehmender Messtiefe ab. Der Radschlepper verursachte die höchste zeitgewichtete Druckbeanspruchung des Bodens. Die beiden Raupenfahrzeuge zeigten eine gegenüber dem Radschlepper geringere Beanspruchung. Dabei wurde für beide Raupenfahrzeuge ein annähernd vergleichbarer GMP berechnet (Abb. 78).

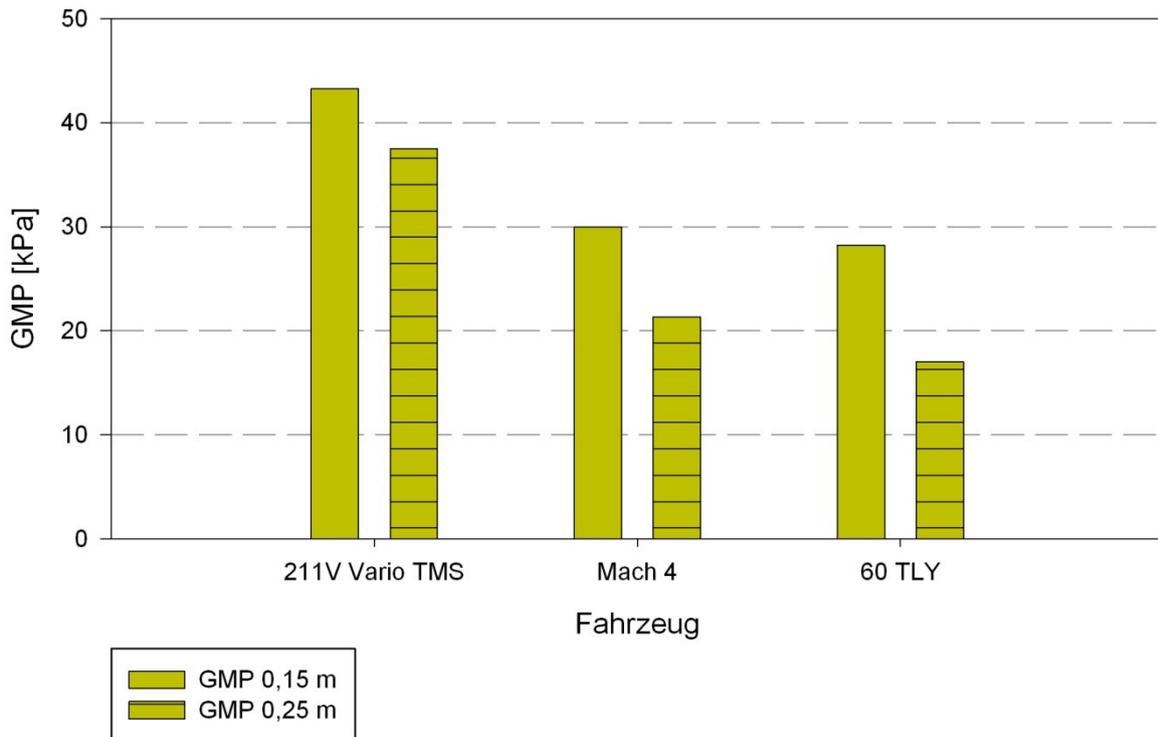


Abb. 78: Mittlerer fahrzeuginduzierter Bodendruck unter Berücksichtigung der Einwirkdauer für die Messtiefen 0,15 m und 0,25 m (Nullvarianten ohne Verzögerung).

4.6.2 Verzögerungsstufen

Die Analyse des GMP unter Einbeziehung der verschiedenen Verzögerungsvarianten ermöglichte eine Klassifizierung des Bodendruckverhaltens der einzelnen Fahrwerke unter Berücksichtigung der spezifisch einwirkenden äußeren Belastung. Der Radtraktor wies über die verschiedenen Varianten hinweg ein relativ homogenes Druckverhalten in der jeweils oberen und unteren Bodenzone auf. Für den Vierraupentraktor nahm die Druckbeanspruchung kontinuierlich mit zunehmender Verzögerungskraft in beiden Messtiefen zu. In 0,15 m Tiefe war diese in VS-1 geringer als beim Radtraktor; in VS-2 und VS-3 zeigte die Gesamtbeanspruchung für Rad- und Vierraupentraktor ein vergleichbares Niveau. Die geringsten gewichteten Drücke wurden für den Zweiraupentraktor ermittelt. Die Druckbeanspruchung in 0,15 m Tiefe nahm mit anwachsender Verzögerung kontinuierlich zu. Für 0,25 m Tiefe konnte eine relative Homogenität festgestellt werden (Abb. 79).

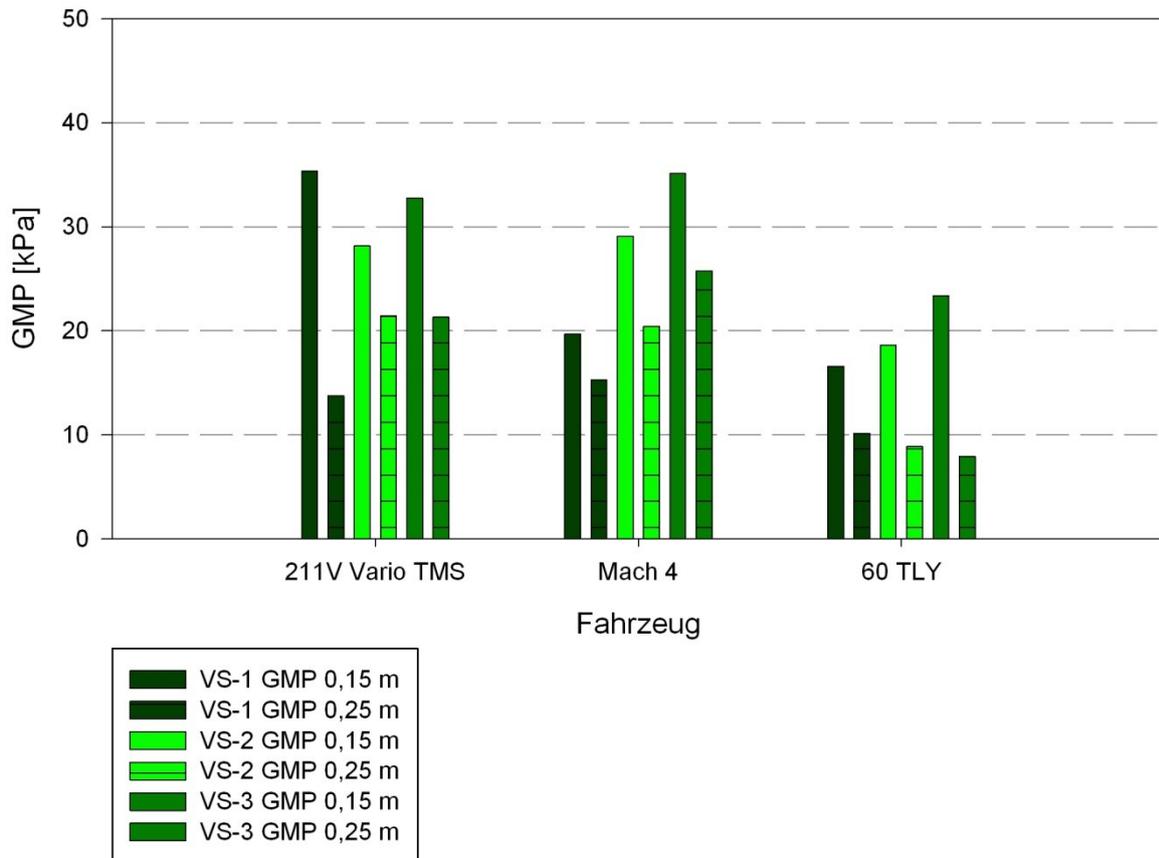


Abb. 79: Mittlere fahrzeuginduzierte Bodenspannung unter Berücksichtigung der Einwirkdauer für die Messtiefen 0,15 m und 0,25 m (Verzögerungsvarianten).

In den ungebremsten Nullvarianten war für alle Fahrzeuge eine höhere Druckbeanspruchung des Bodens nachweisbar als in den Verzögerungsvarianten VS-1 und VS-2. Für die Versuchsfahrzeuge Fendt 211V Vario und Geier 60 TLY galt dies ebenfalls in VS-3. Für den Carraro Mach 4 wurde in VS-3 hingegen eine um bis zu 21 % höhere Druckbeanspruchung berechnet (Tab. 37).

Tab. 37: Gegenüberstellung des GMP bei nicht verzögerter (GMP_0) und verzögerter Überfahrt (GMP_{VS}) der Versuchsfahrzeuge. Dargestellt sind die GMP-Werte für die Tiefen 0,15 m und 0,25 m. GMP_0 ist als Referenzwert jeweils mit 100 % angegeben.

Fahrzeug	GMP_0 [kPa]		GMP_{VS} [kPa]					
			VS-1		VS-2		VS-3	
	0,15 m	0,25 m	0,15 m	0,25 m	0,15 m	0,25 m	0,15 m	0,25 m
Fendt 211V Vario	100 %	100 %	82 %	37 %	65 %	57 %	76 %	57 %
Carraro Mach 4	100 %	100 %	66 %	71 %	97 %	96 %	117 %	121 %
Geier 60 TLY	100 %	100 %	59 %	60 %	66 %	52 %	83 %	47 %

4.7 Penetrometrie

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Erhebungen mit dem Konus-Penetrometer in den einzelnen Versuchsvarianten fahrzeug- und belastungs-spezifisch dargestellt. Dabei werden zusammengehörige Messungen jeweils in einer Abbildung gruppiert. Die Art und Weise der Datenaufbereitung erlaubt somit einen unmittelbaren Vergleich der einzelnen Varianten. Gezeigt werden jeweils die Mittelwerte aus mehreren Einstichen. Die Stichprobengröße der Datengrundlage variierte und wird daher jeweils gesondert angegeben.

Die in den Penetrogrammen gezeigten Kontrollvarianten sind als unabhängig von den untersuchten Verzögerungsvarianten anzusehen (Abb. 81, 84 und 87). Diese dienen im Wesentlichen der Darstellung der Lockerungsergebnisse der Bodenbearbeitung vor Versuchsbeginn. Die statistische Auswertung der Einzelversuche berücksichtigt hiervon abweichend jeweils eine eigene variantenspezifische Kontrolle.

Die Ergebnisdarstellung weicht von der üblichen Vorgehensweise ab. Der Eindringwiderstand ist als abhängige Variable auf der Abszisse aufgetragen. In Verbindung mit der gespiegelt skalierten Ordinate resultiert so eine bildliche Darstellung des Penetrometerwiderstands unter Berücksichtigung des vertikal geschichteten Bodenaufbaus.

Als weiterer Parameter wurde die überfahrtsinduzierte plastische Verformungen innerhalb der Fahrspuren vermessen und die jeweiligen Mittelwerte grafisch in Abb. 80 zusammengefasst. Der Radtraktor verursachte die insgesamt größte Fahrspursetzung; die Überfahrten mit den Kettenfahrzeugen führten zu einer jeweils geringeren Verformung. Die Unterschiede in der Verformung zwischen dem Zweiraupenfahrzeug Geier 60 TLY und Fendt 211V Vario bzw. Carraro Mach 4 waren als signifikant zu bezeichnen ($p = 0,002$ bzw. $p = 0,026$).

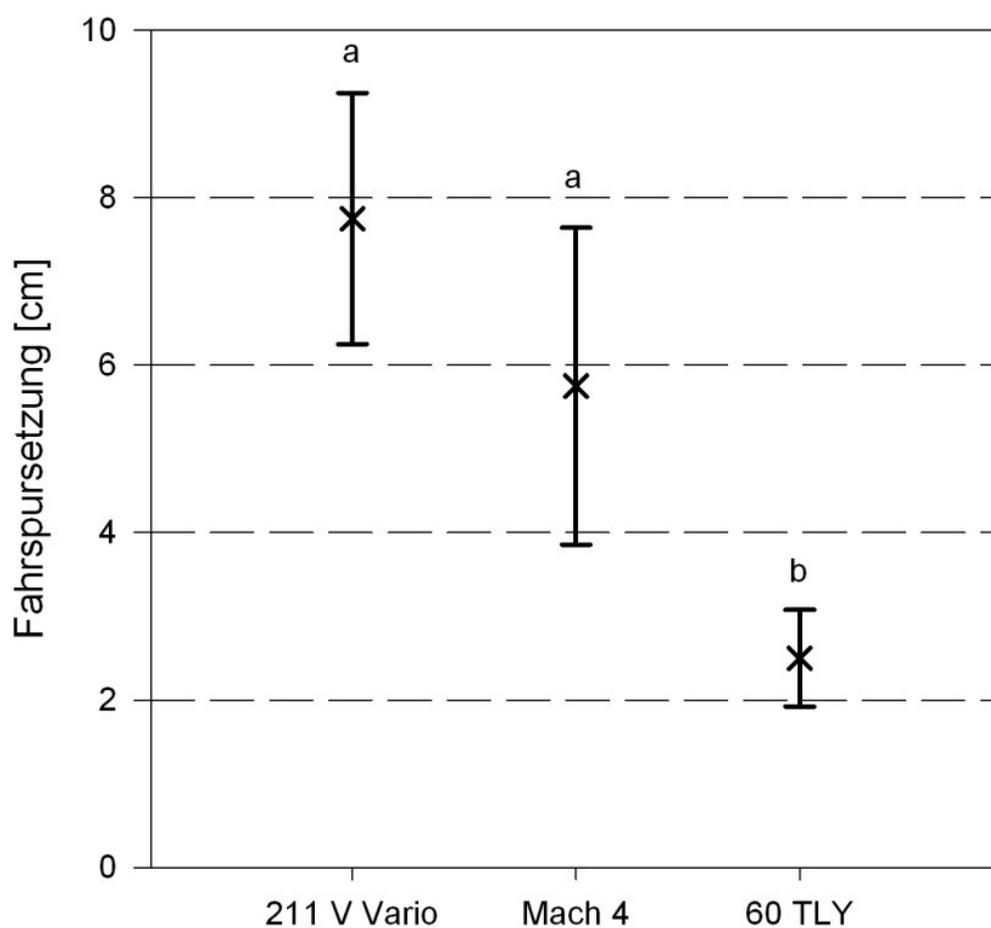


Abb. 80: Darstellung der mittleren überfahrtsinduzierten Fahrspursetzung der Versuchsfahrzeuge.

4.7.1 Fendt 211V Vario

Der Radtraktor verursachte eine auflastabhängige Setzung des Bodengefüges. Die ausgebildeten Fahrspuren wiesen in den verschiedenen Varianten eine Tiefe von

6 - 9 cm auf. Die Bodensetzung ist in der Darstellung durch einen Versatz der Graphen VS-0 bis VS-3 gegenüber der unbefahrenen Kontrollvariante zu erkennen (Abb. 81).

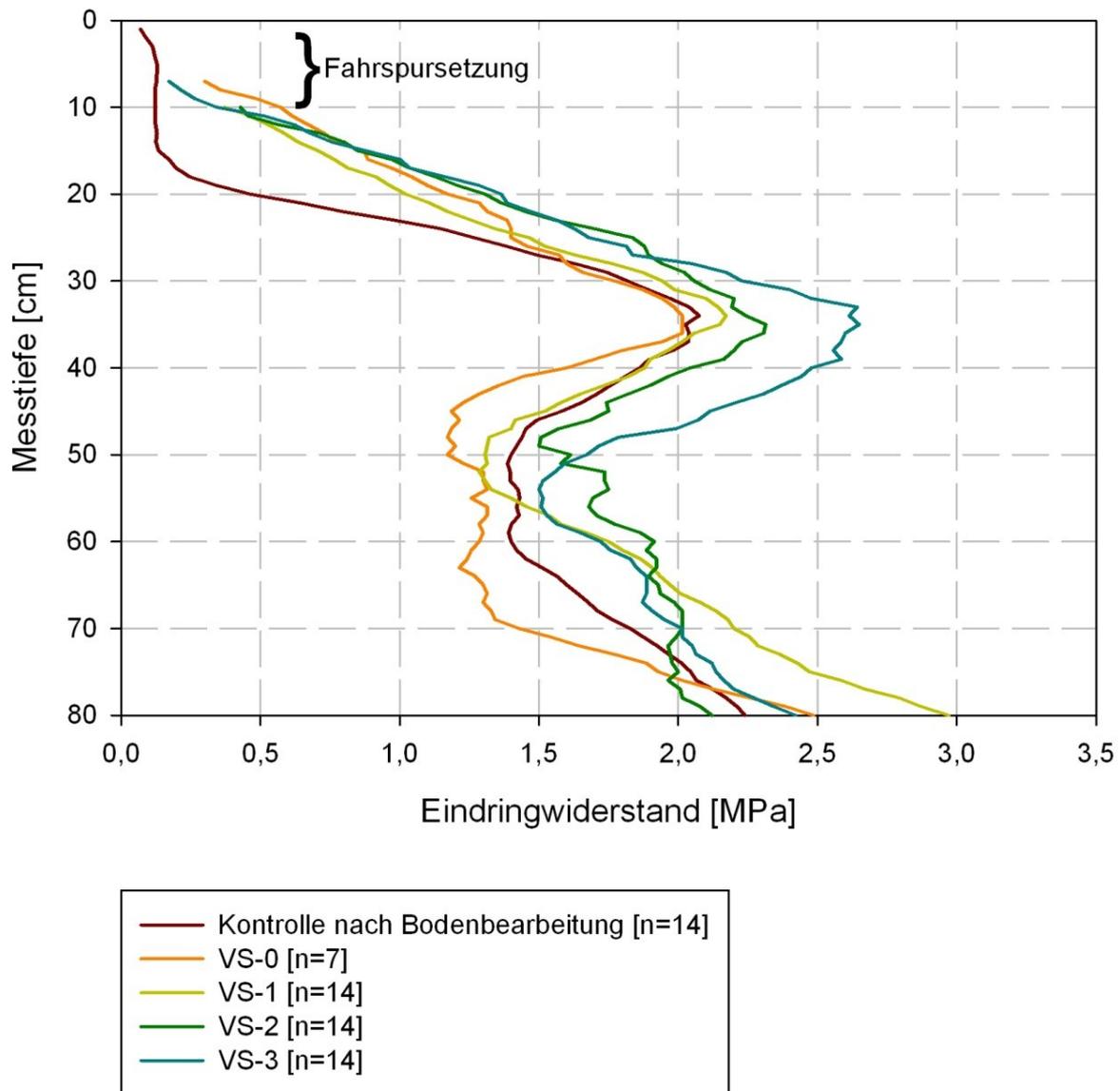


Abb. 81: Penetrogramm zur Versuchseinheit Fendt 211V Vario.

Für die Datenauswertung wurde der insgesamt untersuchte Tiefenbereich in drei Horizonte gegliedert: Oberboden 0 - 25 cm, Krumbasis 26 - 50 cm und Unterboden 51 - 80 cm.

Im Oberboden waren alle befahrenen Varianten von den jeweils korrespondierenden unbefahrenen Kontrollen zu unterscheiden. Der geringe Eindringwiderstand der gezeigten Kontrolle bis in eine Tiefe von etwa 15 cm war auf die definierte Bodenbearbeitung im Zuge der Vorbereitung der Versuchsfläche zurückzuführen. Ab einer Tiefe von 15 cm lagen die Eindringwiderstände für VS-2 und VS-3 höher als in den übrigen Varianten. Im Bereich der Krumenbasis war ein belastungsabhängiger Anstieg der gemessenen Eindringwiderstände, ausgehend von VS-0 kennzeichnend. Dies galt insbesondere für die Zone der größten Eindringwiderstände in etwa 35 cm Tiefe. Die höchsten Widerstandswerte wurden in VS-3 gemessen. Mit zunehmender Messtiefe wies der gemessene Bodeneindringwiderstand eine nahezu parallele Entwicklung auf. Die im Bereich der Krumenbasis augenscheinliche Ausdifferenzierung wurde im Unterboden weitestgehend aufgelöst.

Die Einzelmessungen wurden einer statistischen Analyse zum Nachweis signifikanter Variantenunterschiede unterzogen; diese folgte der dargestellten dreigliedrigen Horizontierung des Gesamtmessbereichs. Das gewählte Signifikanzniveau betrug einheitlich $p < 0,05$.

Für den Oberboden war die überfahrtsinduzierte Zunahme des Eindringwiderstands für alle Varianten im Vergleich zur unbefahrenen Kontrolle signifikant ($p < 0,001$). Eine Unterscheidung der verschiedenen Verzögerungsstufen untereinander war hingegen nicht möglich (Abb. 82).

Im Bereich der Krumenbasis war für VS-0 keine Veränderung des Eindringwiderstands nachzuweisen. VS-1 zeigte eine geringfügige Zunahme; VS-2 und VS-3 ließen diese deutlich erkennen. Die Beobachtungen in diesem Tiefenhorizont konnten gegenüber den unbefahrenen Kontrollen jedoch nicht mehr als signifikant bestätigt werden.

Im Unterboden waren keine Abweichungen zwischen Kontroll- und Verzögerungsvarianten feststellbar.

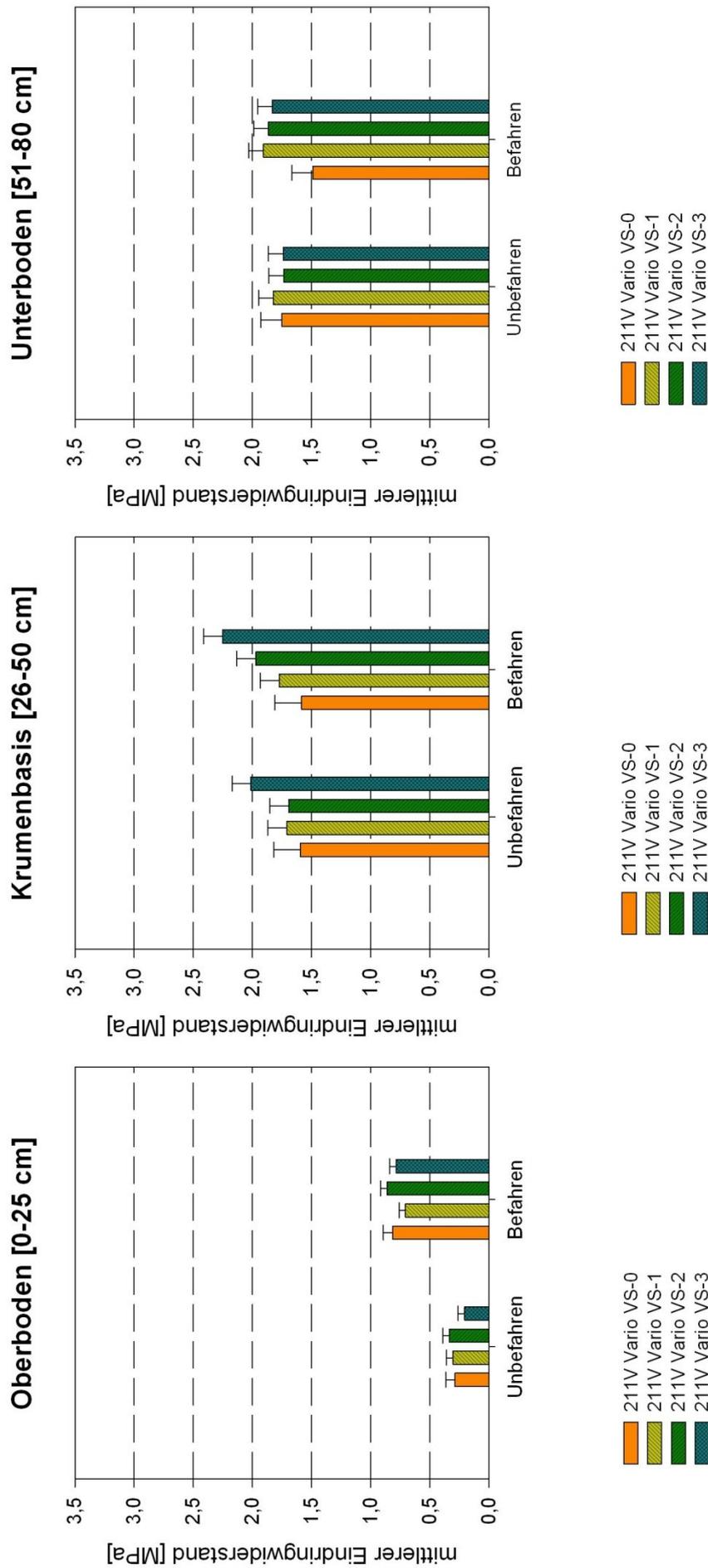


Abb. 82: Auswertung der belastungsabhängigen Eindringwiderstände in den Bodenhorizonten für das Fahrzeug Fendt 211V Vario.

Abb. 83 zeigt die Entwicklung der mittleren Eindringwiderstände in den verschiedenen Verzögerungsstufen im Zuge der Überfahrt. Die Steigung der Geraden gibt die Diskrepanz zwischen Ausgangs- und Endzustand des Bodengefüges an. Im Oberboden war für die Verzögerungsstufen ein nahezu identischer Einfluss auf den Eindringwiderstand nachweisbar (paralleler Geradenverlauf). Im Bereich der Krumbasis zeigte VS-0 keinen Effekt; für VS-1 war dieser nur gering. Die stark verzögerten Varianten VS-2 und VS-3 ließen noch Auswirkungen der jeweiligen Überfahrten erkennen. Im Unterboden traten keine Effekte auf.

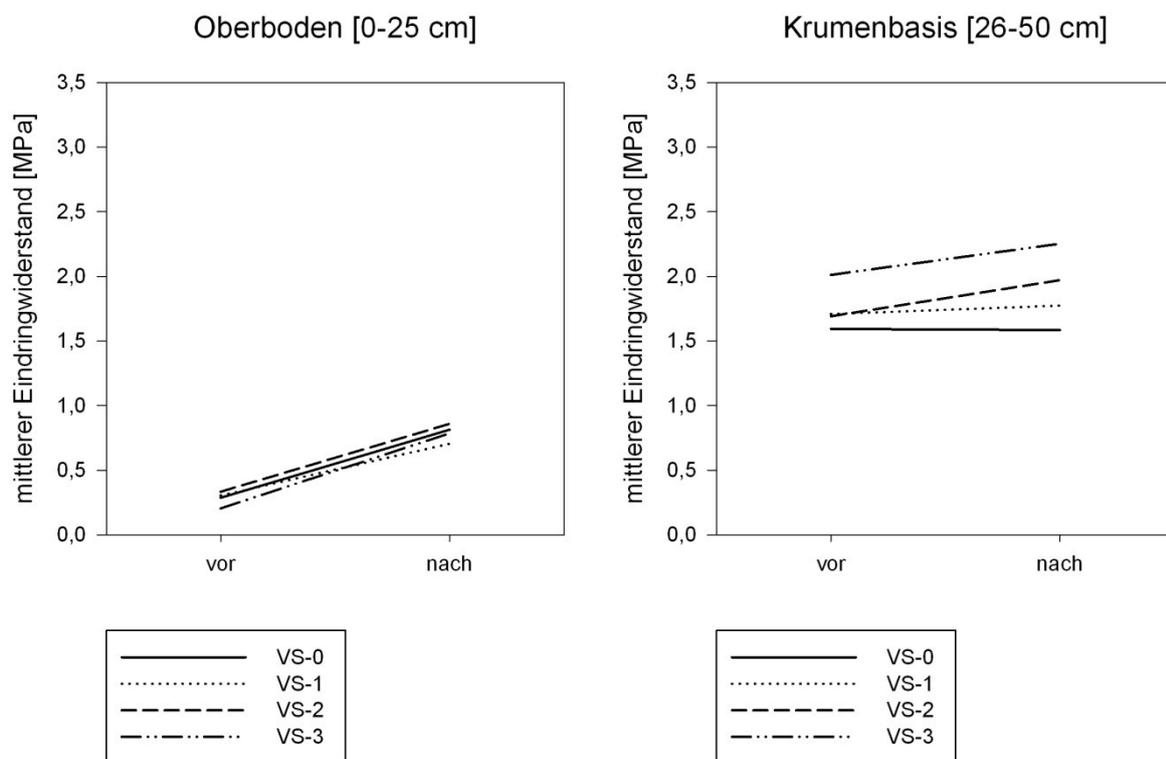


Abb. 83: Entwicklung des Bodeneindringwiderstands vor und nach Überfahrt des Versuchsfahrzeugs Fendt 211V Vario.

4.7.2 Carraro Mach 4

Die Überfahrt mit dem Versuchsschlepper Carraro Mach 4 resultierte in der Ausbildung von Fahrspuren mit einer Tiefe von 3 - 7 cm (Abb. 84).

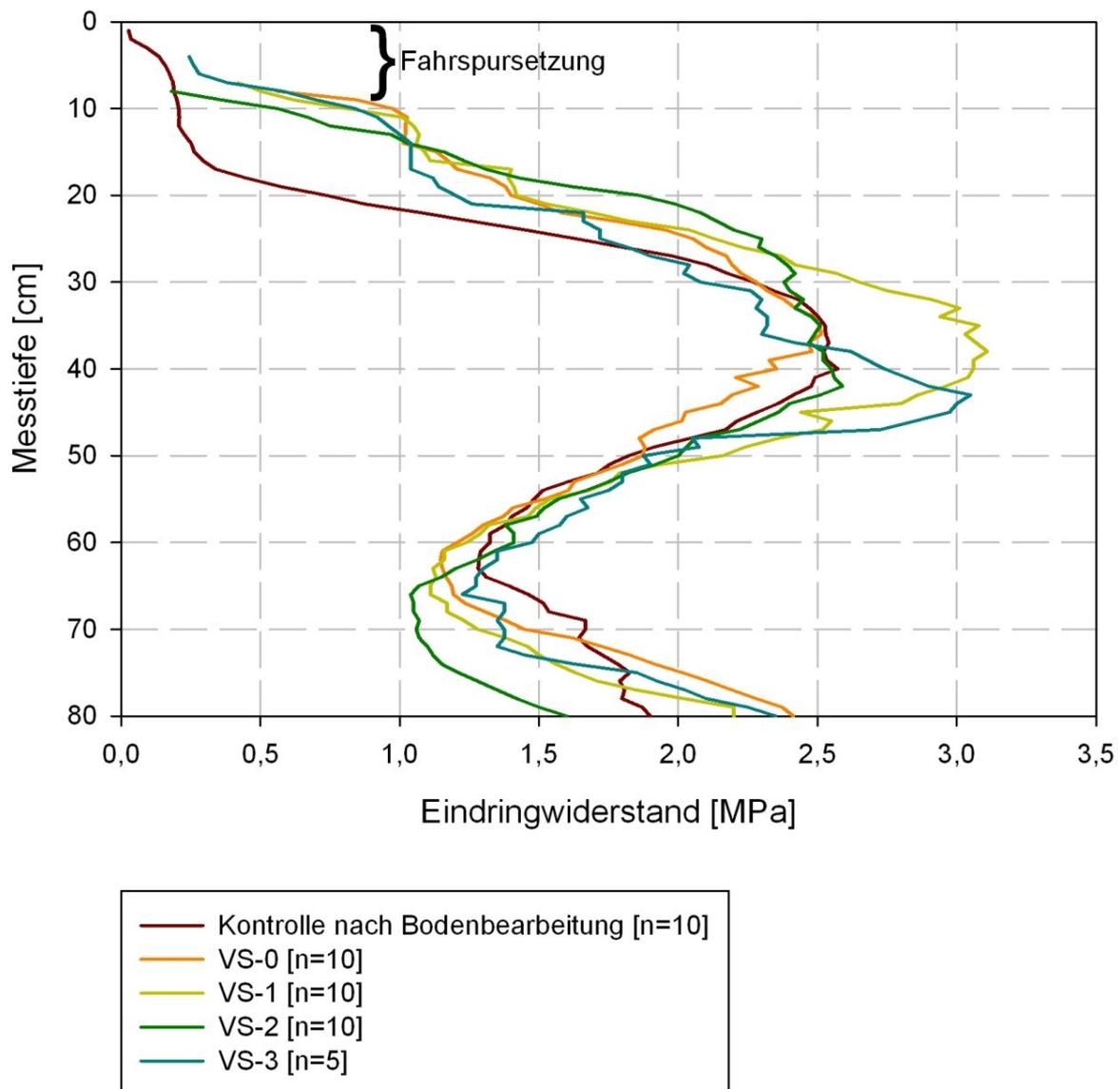


Abb. 84: Penetrogramm zur Versuchseinheit Carraro Mach 4.

Alle Verzögerungsstufen führten im Oberboden zu einer deutlichen Zunahme der Bodeneindringwiderstände gegenüber den Kontrollvarianten. Gleichzeitig unterschieden sich die Verzögerungsstufen nur marginal. Ab einer Tiefe von 19 cm ließ VS-2 den insgesamt höchsten Eindringwiderstand erkennen.

Im Bereich der Krumbasis konnten VS-1 und VS-3 mit einem deutlich höheren Eindringwiderstand von den übrigen Varianten abgegrenzt werden. Eine eindeutig verzögerungsabhängige Unterscheidung war hingegen nicht möglich.

Im Unterboden glichen sich die einzelnen gemessenen Eindringwiderstände weitestgehend an. Die entsprechenden Messkurven zeigen einen annähernd parallelen Verlauf.

Die statistische Datenauswertung bestätigte Signifikanz für die im Oberboden festgestellte Zunahme der Eindringwiderstände in den befahrenen Varianten gegenüber den unbefahrenen Kontrollen ($p < 0,001$). Die Abb. 85 und 86 zeigen für den Oberboden eine stärkere Zunahme des Eindringwiderstands in den höheren Verzögerungsstufen. Die angedeuteten Unterschiede waren jedoch nicht als signifikant zu bestätigen.

Im Bereich der Krumbasis war keine einheitliche Entwicklung der mittleren Eindringwiderstände mehr zu erkennen. Für VS-1 und VS-2 konnten noch geringe Steigerungen der Penetrometerwiderstände in den befahrenen Varianten belegt werden, wohingegen VS-0 und VS-3 keine Effekte zeigten. Die Unterschiede der Eindringwiderstände in der Krumbasiszone waren nicht als signifikant zu bestätigen.

Im Unterboden waren keine Abweichungen zwischen unbefahrenen und befahrenen Varianten festzustellen.

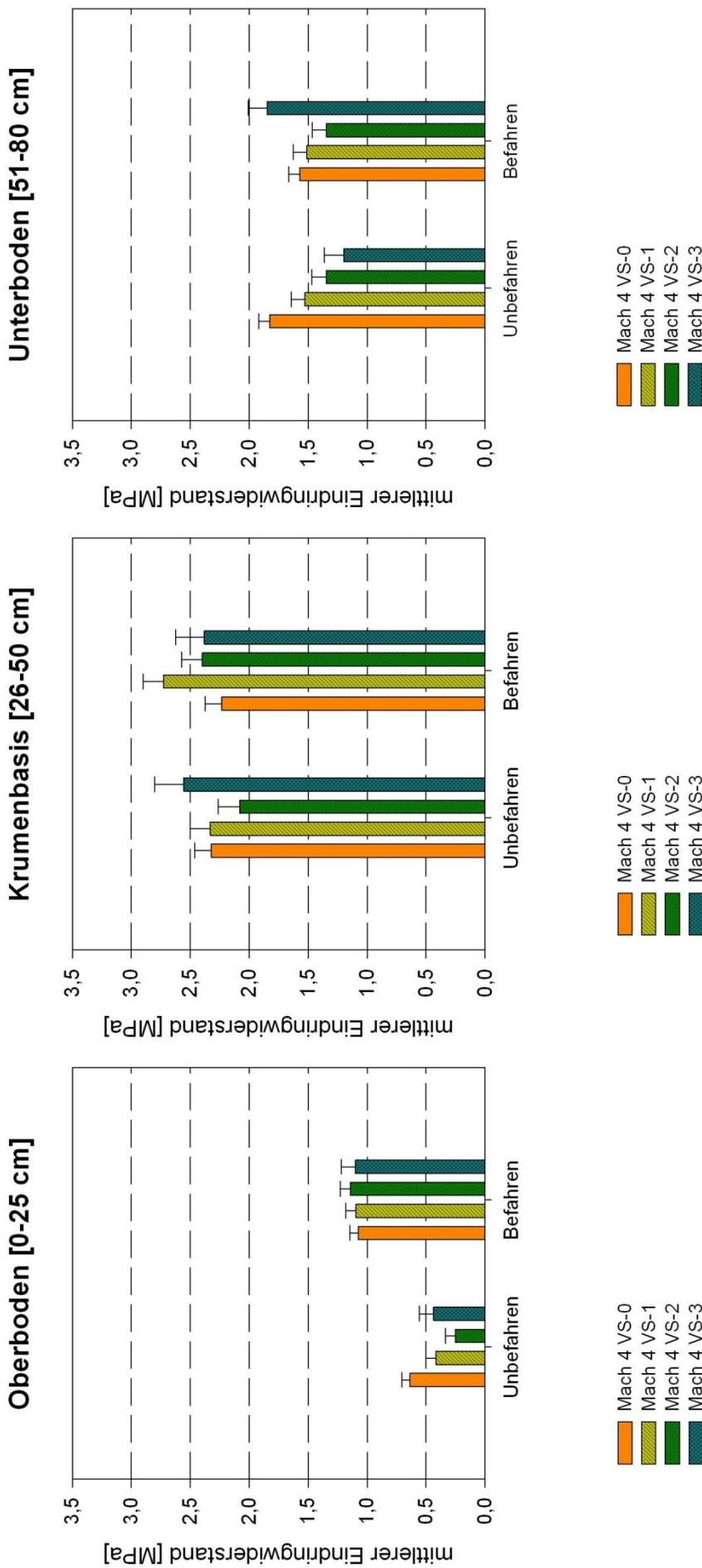


Abb. 85: Auswertung der belastungsabhängigen Eindringwiderstände in den Bodenhorizonten für das Fahrzeug Carraro Mach 4

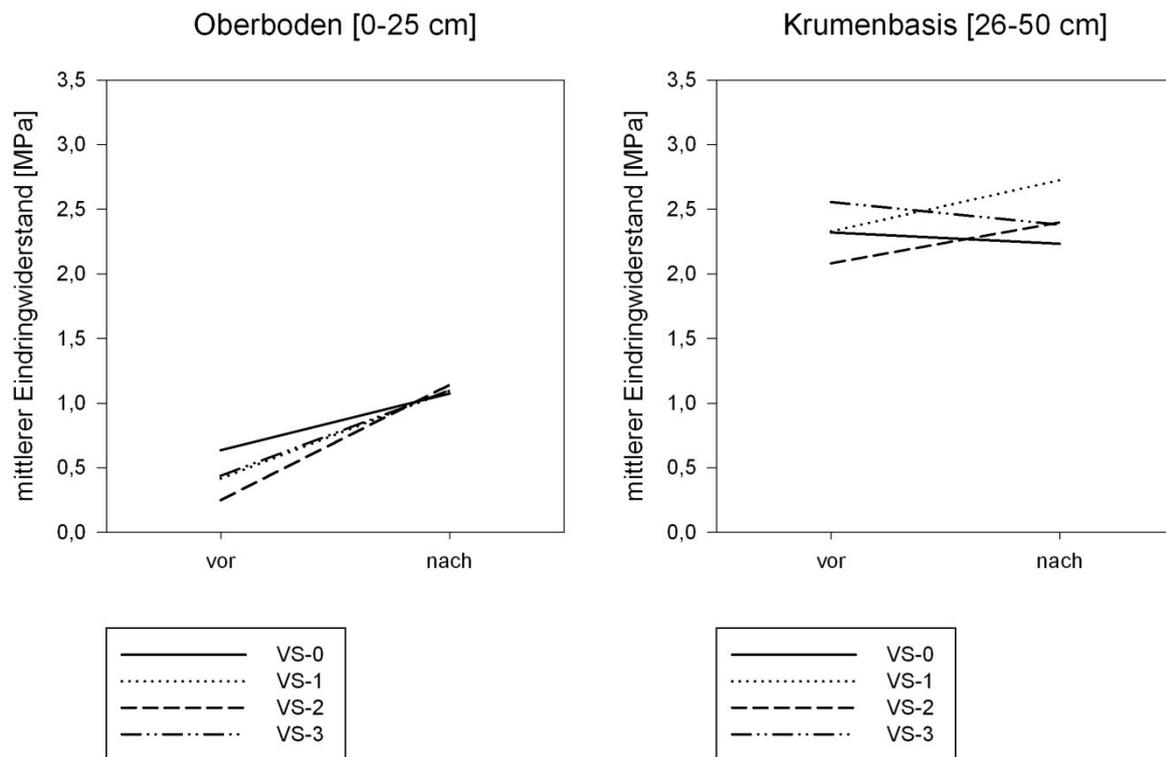


Abb. 86: Entwicklung des Bodeneindringwiderstands vor und nach Überfahrt des Versuchsfahrzeugs Carraro Mach 4.

4.7.3 Geier 60 TLY

Die durch den Zweiraupentraktor hervorgerufene Bodensetzung zeigte mit 2 - 3 cm im Vergleich mit den beiden Vergleichsfahrzeugen die geringste Ausprägung.

Analog zu den beiden vorherigen Fahrzeugen war im Oberboden eine Unterscheidung der befahrenen von den jeweiligen unbefahrenen Kontrollvarianten in allen Fällen möglich. Bis zu einer Tiefe von 20 cm zeigten die Belastungsvarianten einen vergleichbaren Einfluss auf den Eindringwiderstand; darunter wurden für VS-0 und VS-3 abweichend höhere Werte gemessen.

Im Bereich der Krumenbasis ließ der Bodeneindringwiderstand eine belastungsabhängige Beeinflussung erkennen. Im Zentrum der offensichtlichen Krumenbasisverdichtung in 35 cm Tiefe wiesen VS-0 und VS-1 gegenüber der Kontrolle einen leicht verminderten Eindringwiderstand auf, wohingegen VS-2 und VS-3 größere Widerstände erkennen ließen.

Im Unterboden konnte eine vergleichbare Entwicklung der Bodeneindringwiderstände in den verschiedenen Varianten nachgewiesen werden. Die Messkurven zeigten eine fortschreitender Annäherung sowie einen nahezu parallelen Verlauf (Abb. 87).

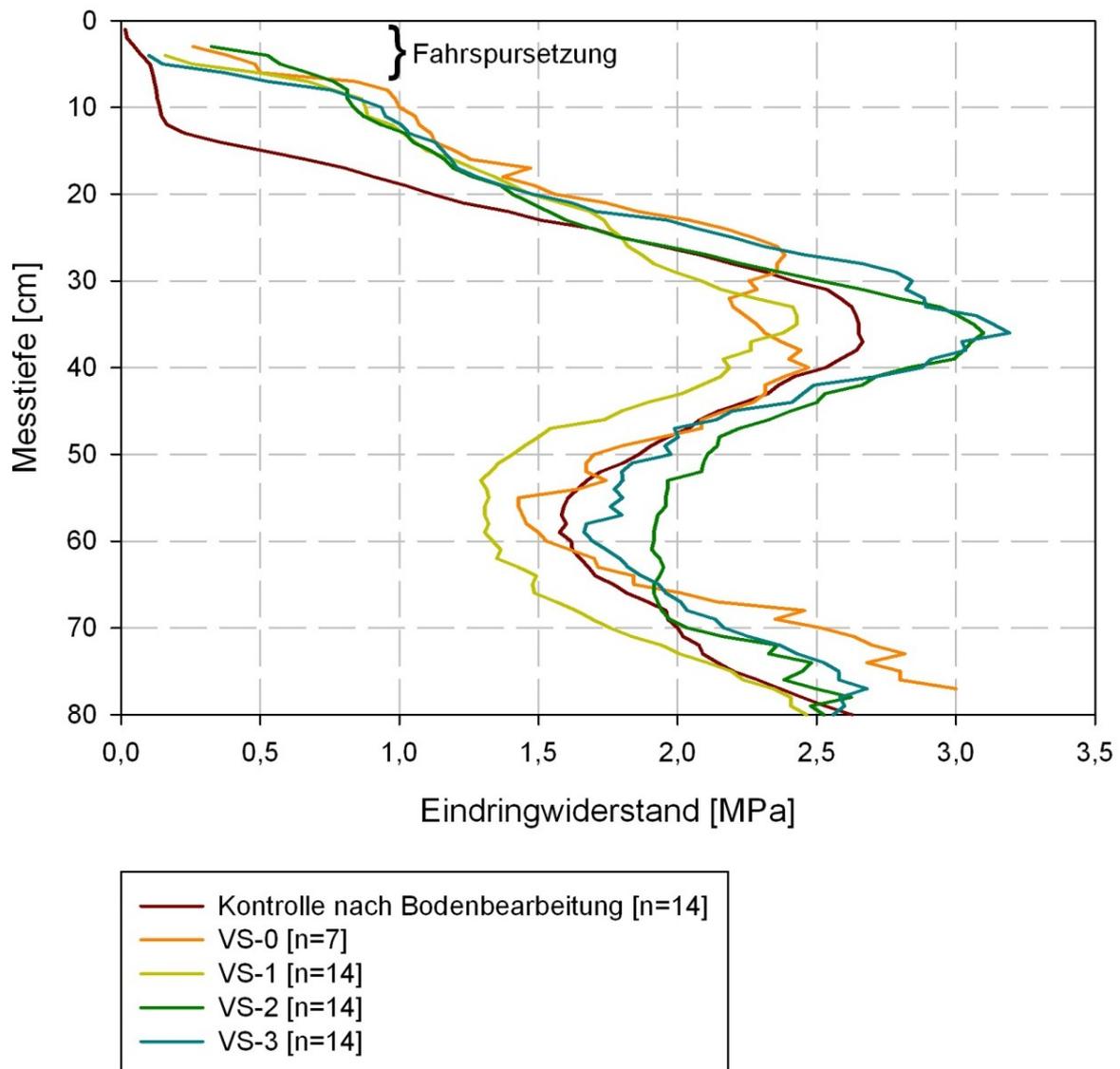


Abb. 87: Penetrogramm zur Versuchseinheit Geier 60 TLY.

Im Oberboden waren die Unterschiede zwischen befahrenen und unbefahrenen Varianten als signifikant zu bestätigen ($p < 0,001$). Zusätzlich zeigte VS-3 eine tendenziell stärkere Zunahme des gemessenen Eindringwiderstands, wobei diese Beobachtung nicht statistisch abgesichert werden konnte (Abb. 88 und 89).

Analog wurde für das Bodengefüge im Bereich der Krümmenbasis eine stärkere Zunahme des Penetrometerwiderstands in VS-3 gegenüber den übrigen Belastungsvarianten festgestellt. Auch diese Beobachtung war jedoch nicht statistisch zu belegen.

Der Unterboden zeigte keine Beeinflussung durch die erfolgten Überfahrten.

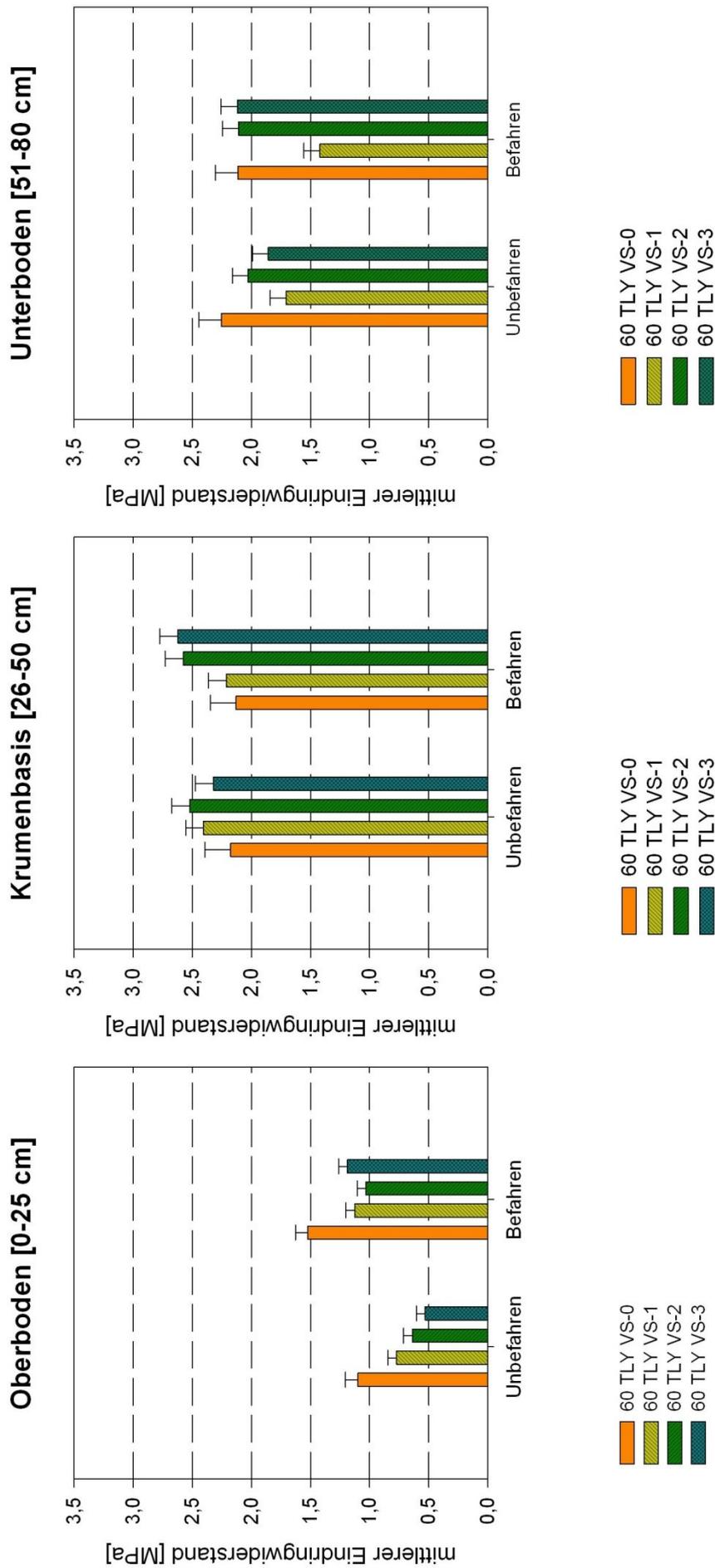


Abb. 88: Auswertung der belastungsabhängigen Eindringwiderstände in den Bodenhorizonten für das Fahrzeug Geier 60 TLY.

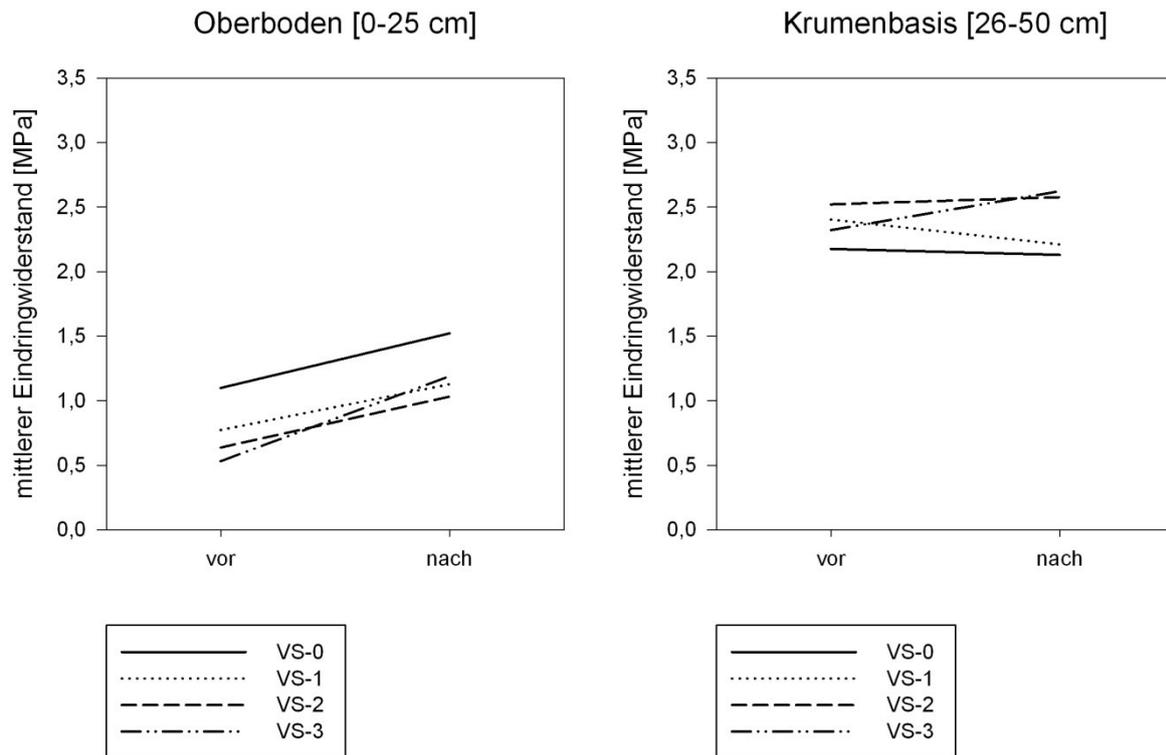


Abb. 89: Entwicklung des Bodeneindringwiderstands vor und nach Überfahrt des Versuchsfahrzeugs Geier 60 TLY.

4.8 Analyse der Eindringwiderstände

Die bisherige Analyse beschränkte sich auf eine fahrzeugzentrische Darstellung der belastungsinduzierten Veränderungen der gemessenen Eindringwiderstände.

Nachfolgend wird im Hinblick auf den vorzunehmenden Vergleich der verschiedenen Fahrwerkstechnologien eine fahrwerksübergreifende Gegenüberstellung vorgenommen.

4.8.1 Oberboden

Für den Oberboden war analog Kapitel 4.7 festzustellen, dass alle Überfahrten mit den unterschiedlichen Fahrzeugen einen signifikanten Anstieg des Eindringwiderstands gegenüber den jeweils unbefahrenen Kontrollen hervorriefen. Bei direkter Gegenüberstellung der Rad- und Raupentraktoren ließ die Oberbodensondierung höhere Eindringwiderstände nach Überfahrt der Raupenfahrzeuge erkennen (Abb. 90).

Unter Berücksichtigung der spezifischen Kontrollvarianten konnten die Abweichungen jedoch ausschließlich für VS-2 als signifikant bestätigt werden ($p = 0,004$).

Die Analyse der verzögerungsabhängigen Entwicklung der Eindringwiderstände in Abb. 91 zeigt für VS-0 und VS-3 einen annähernd parallelen Geradenverlauf und somit eine gleichartige Veränderung der gemessenen Eindringwiderstände.

Für VS-2 konnte der im Rahmen der Varianzanalyse detektierte Unterschied einer signifikant höheren Zunahme der Eindringwiderstände infolge der Überfahrt des Carraro Mach 4 zugeordnet werden. Der entsprechende Geradenverlauf wies gegenüber den Vergleichsfahrzeugen eine deutlich größere Steigung auf.

Außerhalb der statistisch abgesicherten Erkenntnisse war für VS-1 eine vergleichbare Entwicklung festzustellen.

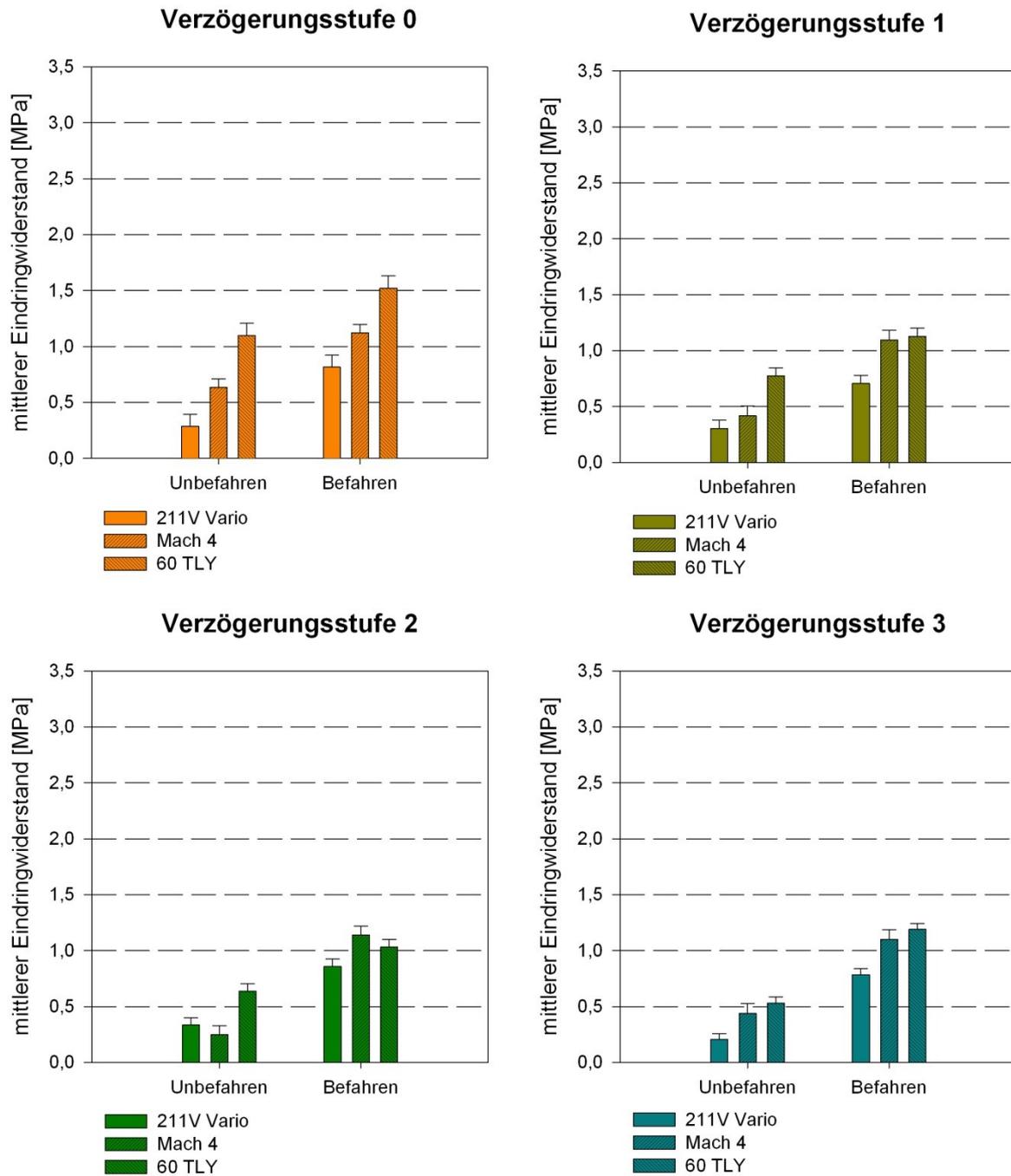


Abb. 90: Vergleich der nachgewiesenen Eindringwiderstände im Oberboden.

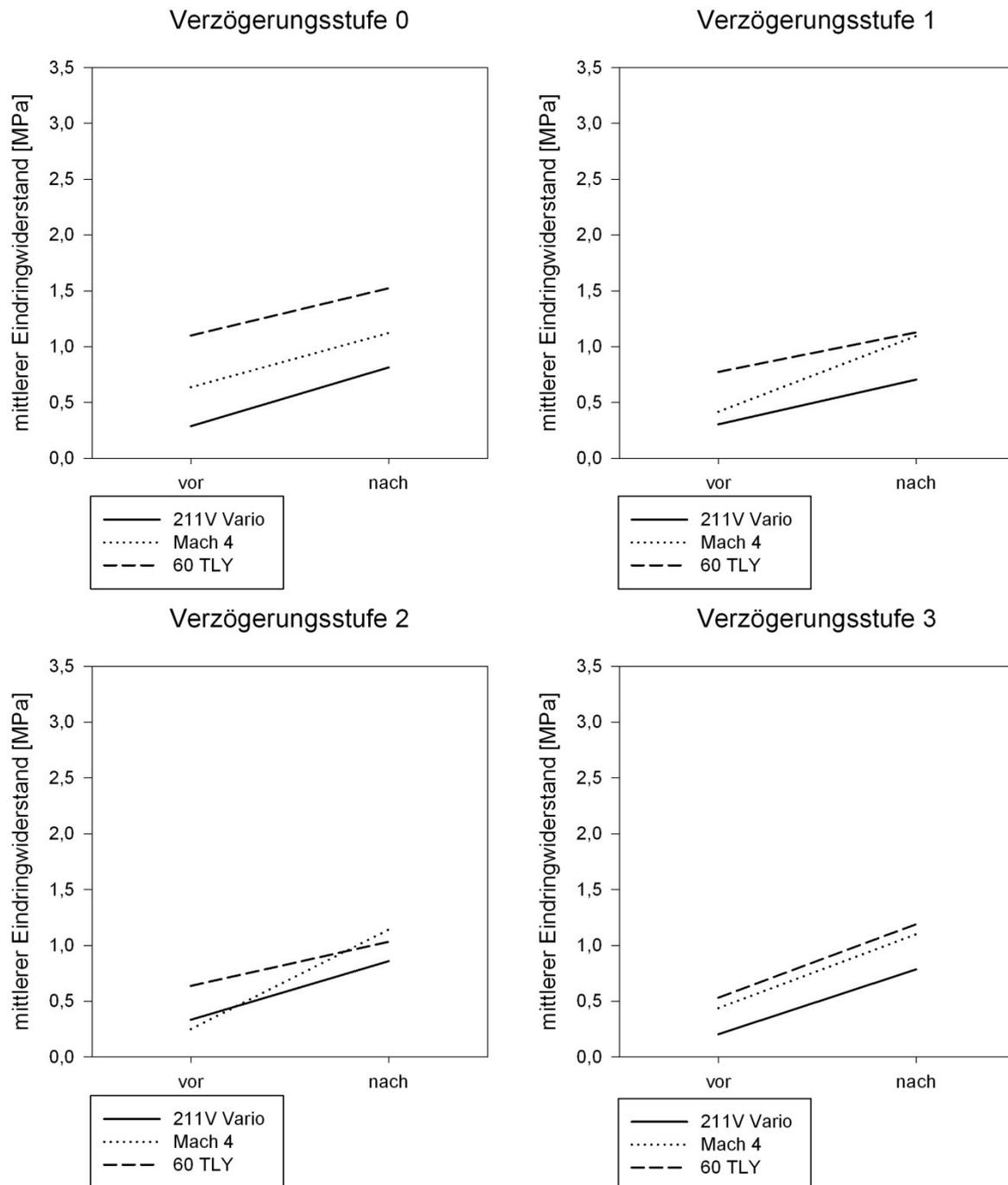


Abb. 91: Entwicklung des mittleren Bodeneindringwiderstands im Oberboden vor und nach Überfahrt der Versuchsfahrzeuge.

4.8.2 Krumenbasis

Im Bereich der Krumenbasis setzte sich der bereits im Oberboden erkennbare Trend fort. Mit Ausnahme des Fahrzeugs Carraro Mach 4 in VS-3 zeigten alle Varianten eine überfahrtsinduzierte Zunahme des Bodeneindringwiderstands. Während eine visuelle Unterscheidung unbefahrener und befahrener Varianten möglich war,

konnten die detektierten Unterschiede statistisch jedoch nicht mehr als signifikant bestätigt werden (Abb. 92). In VS-0 ließen alle Fahrzeuge einen nahezu identischen Einfluss auf das Bodengefüge erkennen. Während diese Beobachtung für den Rad- und Zweiraupentraktor auch in den übrigen Verzögerungsstufen nachweisbar war, verursachte der Vierraupentraktor in VS-1 und VS-2 eine tendenziell stärkere Zunahme des Eindringwiderstands. Für VS-3 war dieser Effekt nicht mehr nachweisbar (Abb. 93).

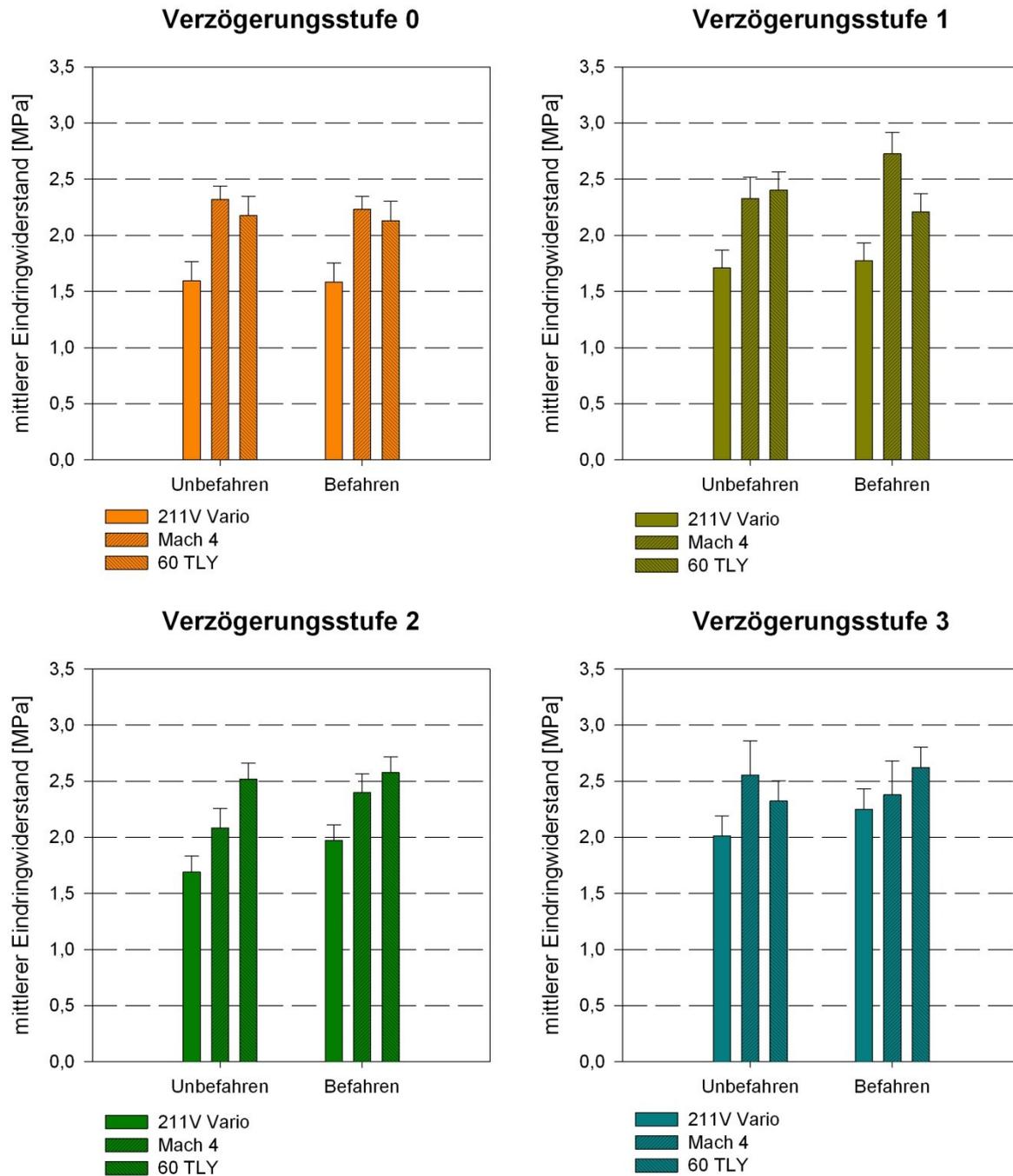


Abb. 92: Vergleich der nachgewiesenen Eindringwiderstände in der Krumbasis.

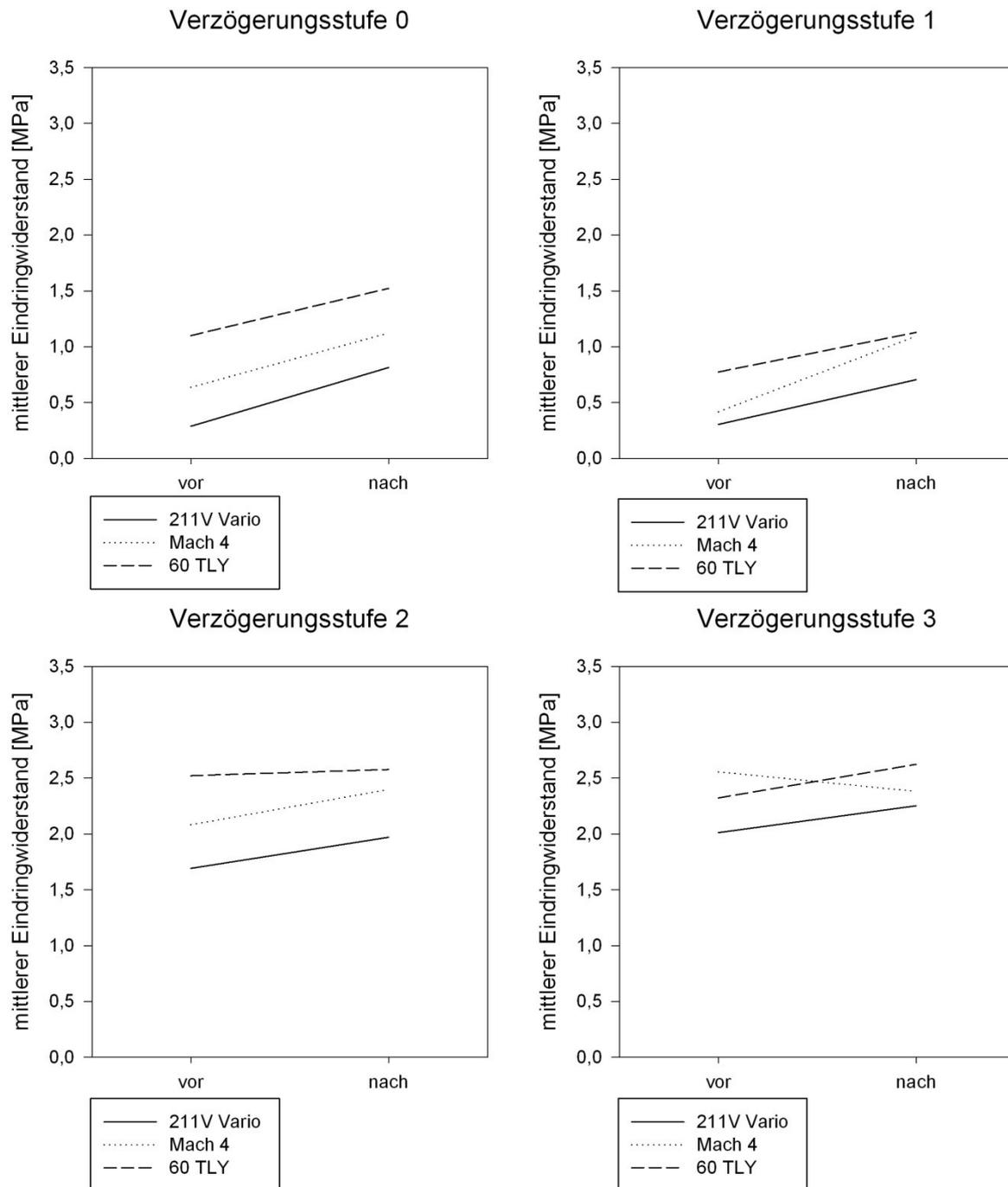


Abb. 93: Entwicklung des mittleren Bodeneindringwiderstands in der Krumenbasis vor und nach Überfahrt der Versuchsfahrzeuge.

4.8.3 Unterboden

Die Analyse der Widerstandsverhältnisse im Unterboden ließ keine überfahrtsinduzierten Auswirkungen auf die Gefügeverhältnisse respektive den Bodeneindringwiderstand feststellen (Abb. 94). Die Darstellung der Entwicklung der Bodeneindringwiderstände im Unterboden entfällt somit.

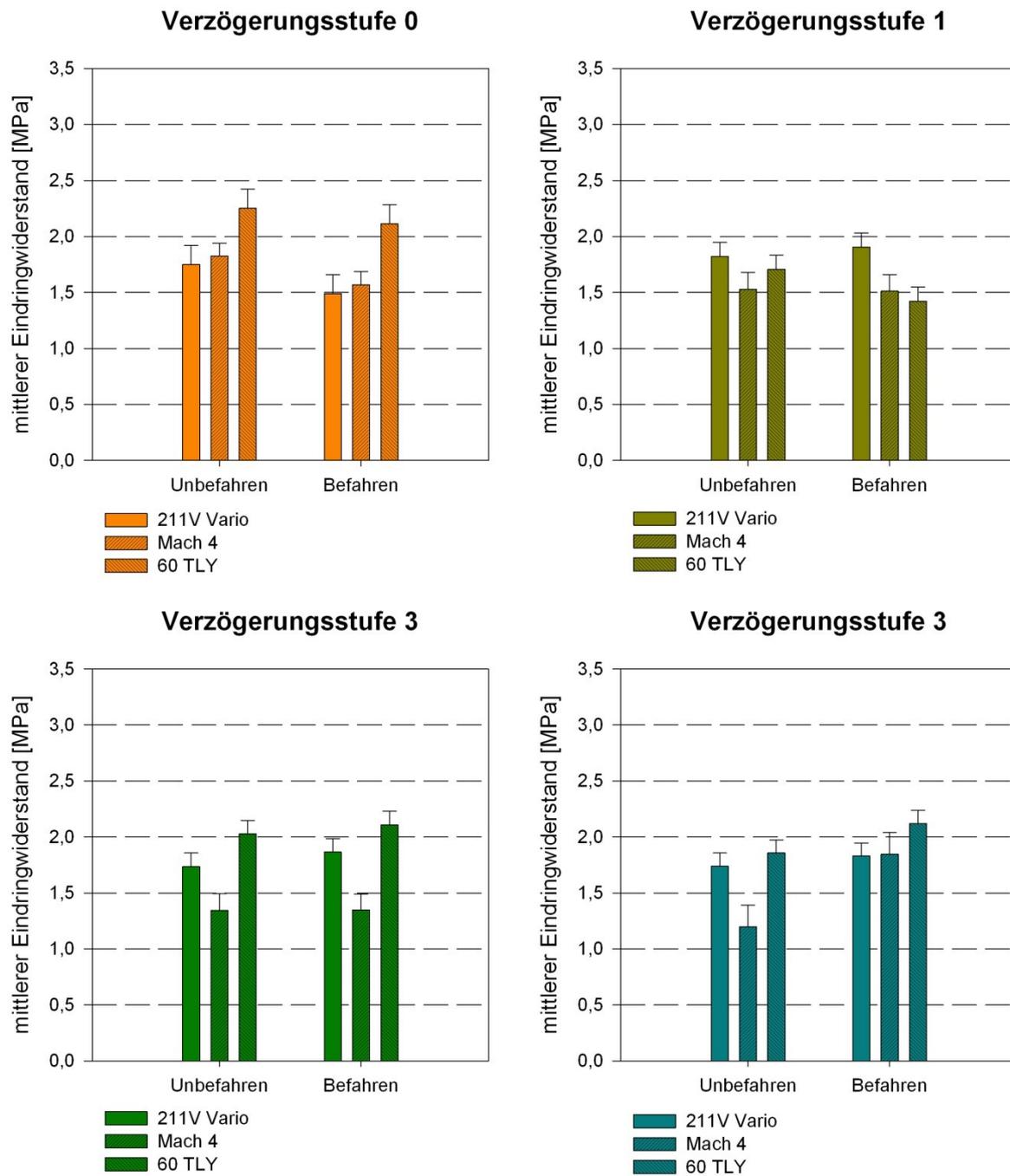


Abb. 94: Vergleich der nachgewiesenen Eindringwiderstände im Unterboden.

5 Diskussion

5.1 Standort- und Rahmenbedingungen

Der ausgewählte Versuchsstandort wurde bis einschließlich 2011 weinbaulich genutzt. Nach Abschluss der Traubenernte erfolgte die Rodung der aufstehenden Rebstöcke. Zur Durchführung der Rodung wurde auf einen U-förmigen Stockrodepflug zurückgegriffen; dieser unterschneidet die Hauptrebwurzeln und ermöglichte somit ein Herausziehen der einzelnen Rebstöcke. Die Rodung führte zu einer linienhaften Auflockerung des ehemaligen Unterstockstreifens in etwa 0,5 m Breite und 0,3 m Tiefe. Nach Entfernung der Rebstöcke und -wurzeln wurde der Standort einer natürlichen Selbstbegrünung überlassen. Witterungsbedingt trat eine Einebnung und Setzung der gelockerten Streifen bis zum darauffolgenden Frühjahr ein.

Die Standorteigenschaften stimmten sehr gut mit den für die Durchführung der Versuche notwendigen Anforderungen überein. Insbesondere die vorherrschende sandgeprägte Bodenart war von Vorteil für die standardisierte Durchführung der Versuche. Als nichtbindige Bodenart war das Einzelkorngefüge in tieferen Bereichen relativ dicht gelagert; dies ging einher mit einer hohen Bodentragfähigkeit. Durchgeführte Lockerungsmaßnahmen zeigten eine gute und weitestgehend homogene Lockerungswirkung im Oberboden; dieser wies somit zunächst eine hohe Sensitivität gegenüber Wiederverdichtungsereignissen auf. Mechanische Auflasten z. B. durch Befahrung resultierten in der Regel in einer unmittelbaren Bodenreaktion und ermöglichten somit eine reproduzierbare Quantifizierung und Differenzierung der Auswirkungen der verschiedenen Fahrwerks- und Belastungsvarianten.

Die Auswahl eines tiefgründigen und skelettfreien Versuchsstandorts erfolgte zusätzlich auf Basis der Ergebnisse einer Vorversuchsreihe, welche im Frühjahr 2011 mit dem Vierraupentraktor Carraro Mach 4 und einem bis auf die Bandlaufwerke baugleichen Radtraktor durchgeführt worden waren. Hierzu stand ein weinbaulich genutzter Standort auf dem zum Staatsweingut Weinsberg gehörigen Versuchsgut Burg Wildeck zur Verfügung. Beim Boden handelte es sich um einen grauroten Keupermergel mit Verwitterungsanteilen von Kieselsandstein. Der Mergelboden setzte sich als verfestigtes Sedimentgestein überwiegend aus Bestandteilen geringer

Korngröße zusammen. Daraus resultierte ein schwerer sowie tendenziell nur termingenau und eingeschränkt zu bearbeitender Boden (Minutenboden).

Die Vorstudien führten zu der Erkenntnis, dass diese Böden im abgetrockneten Zustand eine außerordentlich hohe Tragfähigkeit aufweisen. In Verbindung mit den im Weinbau verhältnismäßig geringen Fahrzeugmassen, konnte in keiner der ursprünglich berücksichtigten Messtiefen (0,3 m; 0,2 m; 0,1 m) eine überfahrtsinduzierte Bodenspannung auch nur andeutungsweise nachgewiesen werden. Dies galt sowohl für Versuchsvarianten in offenen, als auch bereits längerfristig dauerbegrüntem Bodenpflegesystemen. Erst eine anthropogene Störung des Bodens ermöglichte den Nachweis quantifizierbarer Spannungsbeträge in den Bodenschichten.

Die Hauptversuchsreihen mit den unterschiedlichen Fahrzeugen fanden zu verschiedenen Zeitpunkten im Vegetationsjahr 2012 statt. Die gravimetrischen Bodenwasseranalysen wiesen witterungsbedingt divergierende Wassergehalte zu den unterschiedlichen Zeitpunkten auf. Für die einzelnen Fahrzeuge waren diese jedoch überwiegend vergleichbar. Abweichungen bestanden primär zwischen den Fahrzeugvarianten und erforderten im Hinblick auf die vergleichend angelegten Untersuchungen eine entsprechende Berücksichtigung. Bezüglich einer Vergleichbarkeit der durchgeführten Bodendruck- und Penetrometermessungen sei auf Ergebnisse von WEYER und BOEDDINGHAUS (2010) verwiesen, welche die Variabilität des Bodeneindringwiderstands in Abhängigkeit des spezifisch vorherrschenden Bodenwassergehalts untersuchten. Demnach zeigen ausgetrocknete Böden durch höhere Eindringwiderstände stärkere Verdichtungen an, wohingegen wassergesättigte Böden tendenziell zu geringen Eindringwiderständen vermitteln. Valide und reproduzierbare Messungen setzen jeweils vergleichbare Wassergehalte zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung voraus, wobei Gehalte zwischen 80 und 100 % der standortspezifischen Feldkapazität (FK) anzustreben sind.

Abb. 95 zeigt die Bandbreite der Bodenwassergehalte bei Feldkapazitäten für die verschiedenen Hauptbodenarten.

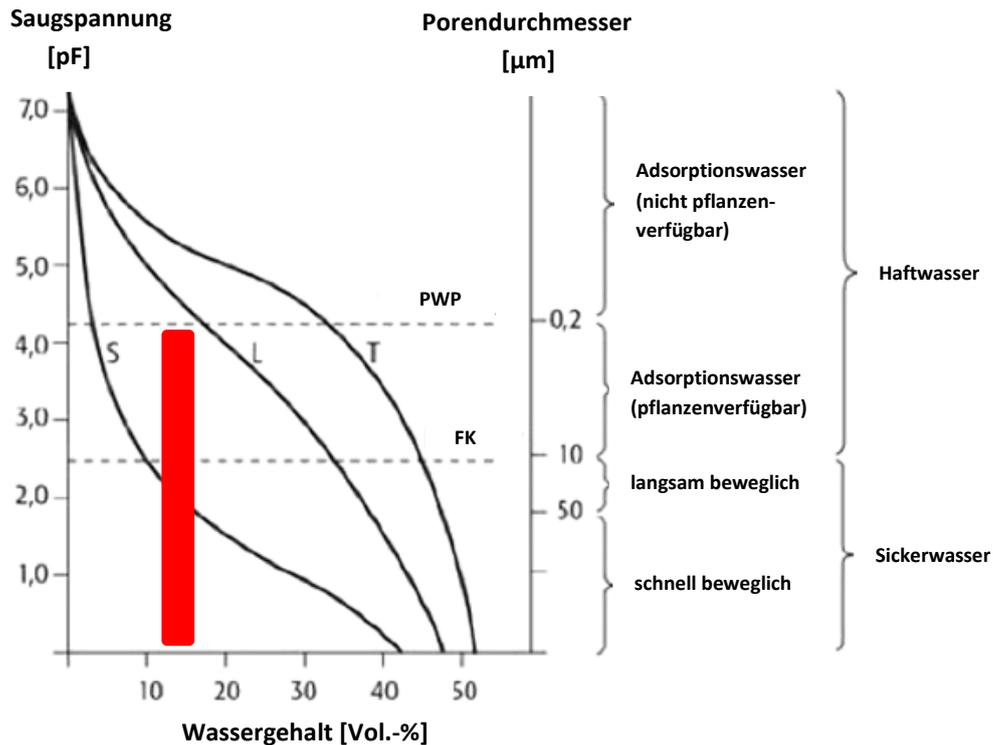


Abb. 95: Saugspannungskurven eines Sandbodens (S), eines Lehmbodens (L) und eines Tonbodens (T) mit Darstellung des permanenten Welkepunkts (PWP) und der spezifischen Feldkapazität (FK). Der optimale Wassergehalt für vergleichende Untersuchungen am Standort ist rot hervorgehoben (modifiziert nach SCHROEDER 1992).

Für den am Versuchsstandort anliegenden leicht lehmigen Sandboden war eine spezifische FK um 15 Vol.-% Wassergehalt anzunehmen (FIEDLER 2001); der optimale Bodenwassergehalt für vergleichbare Messungen lag somit zwischen 12 Vol.-% und 15 Vol.-% (rot hervorgehoben in Abb. 95). Diese Voraussetzung war für die Versuchsreihe mit dem Radtraktor erfüllt. Für den Vierraupentraktor waren in beiden Messhorizonten nur rd. 50 - 60 % FK bzw. für den Zweiraupentraktor nur rd. 33 % FK im Oberboden sowie rd. 65 % FK im Unterboden nachzuweisen. Die divergierenden Bodenwassergehalte ließen somit Auswirkungen auf die gemessenen Bodeneindringwiderstände erwarten und zwar sowohl in den Kontroll- als auch den Versuchsvarianten. Durch die Wahl der zweifaktoriellen ANOVA als statistisches Testverfahren wurde eine adäquate Berücksichtigung des Sachverhalts im Rahmen der Ergebnisanalyse sichergestellt.

5.2 Fahrwerksspezifische Kenngrößen

Wie die ausführliche Literaturrecherche zeigte, geht weder die landtechnische Grundlagenliteratur noch die weinbauliche Fachliteratur explizit auf fahrwerksspezifische Kenngrößen der Weinbautraktoren ein. Eine vollständige Evaluation der essenziellen Parameter hätte den Umfang der vorliegenden Arbeit überschritten, doch wurden entsprechende Teilversuche in die Versuchsplanung integriert. Insbesondere der neuartige und bis dato im Weinbau weitestgehend unbekannt Vierraupentruktor Carraro Mach 4 sollte untersucht werden.

Die geringsten Schlupfwerte zeigten erwartungsgemäß die Kettenfahrzeuge. Zwischen Zwei- und Vierraupentruktor traten keine nennenswerten Unterschiede auf. Der Radschlepper hatte einen bis zu sechsfach höheren Schlupf als die Kettenfahrzeuge. Unabhängig von der Fahrwerksbauart verminderten befestigte Fahrbahnen den nachweisbaren Schlupf; beim Radschlepper wirkte sich zusätzlich der zugeschaltete Allradantrieb schlupfmindernd aus. Die zugrundeliegenden Zusammenhänge sind von verschiedenen Autoren bereits in der früheren landtechnischen Grundlagenliteratur dargestellt worden (SÖHNE 1964; SONNEN 1962, 1968; STEINKAMPF 1974). Für den geschleppten Carraro Mach 4 war ein negativer Schlupf als Folge der zu überwindenden Widerstände in Laufwerk und Antriebsstrang nachweisbar. Dies war im Hinblick auf die Veröffentlichung von RENIUS (1985) erwartet worden.

Für den Radtraktor war das Ergebnis nicht eindeutig. Auf der Sandfahrbahn wurden bei niedrigster Geschwindigkeit analog zum Carraro Mach 4 geringfügig negative Schlupfwerte gemessen; auf der Asphaltfahrbahn hingegen ausschließlich positive. Als mögliche Ursache hierfür ist die mechanisch bedingte Voreilung von etwa 3 % der Reifen der Vorderachse gegenüber denen der Hinterachse anzuführen. Unter Berücksichtigung der deutlich größeren Achslast, Kontaktfläche und des damit verbundenen Kraftschlussverhaltens kann die Hinterachse als dominierend gegenüber der Vorderachse angesehen werden. Den geschleppten Hinterachsrädern wurde folglich ein Drehmoment zur Überwindung der inneren Widerstände im Antriebsstrang sowie zusätzlich ein Moment zum Antrieb der voreilenden Vorderachse abgenommen. Für die Hinterachse rief dies lokal einen negativen Antriebsschlupf hervor, wohingegen dieser für die Vorderachse zeitgleich positiv war. Zu ein und demselben Beobachtungszeitpunkt lagen somit unterschiedliche Schlupfbedingungen vor.

STEINKAMPF (1972) beschrieb vergleichbare Beobachtungen für Allradtraktoren mit abweichenden Umfangsgeschwindigkeiten an einzelnen Antriebsrädern. Im Rahmen der hier dargestellten Versuche war anzunehmen, dass die installierte Sensorik somit keinen achsspezifischen Schlupf, sondern vielmehr einen mittleren Antriebsschlupf beider Achsen registrierte. Dieser war voreilungsbedingt im positiven Bereich angesiedelt. Zur Klärung des beobachteten Anstiegs der Schlupfwerte mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit sind hingegen weitergehende Untersuchungen anzuraten.

Der installierte Radarsensor zur Dokumentation der tatsächlich zurückgelegten Wegstrecke der Versuchsfahrzeuge lieferte eine mittlere Impulszahl von rd. $130 \text{ Imp} \cdot \text{m}^{-1}$. Hieraus resultierte eine Auflösung von $\pm 0,8 \text{ cm}$ Wegstrecke/Impuls. Hingegen erforderte das zur Auswertung der theoretischen Wegstrecke herangezogene Geschwindigkeitssignal der Fahrzeugelektronik eine kritische Betrachtung.

Der Fahrzeugsensor des Radtraktors stellte das fahrzeuginterne Geschwindigkeitssignal über eine Signalsteckdose zur Verfügung. Dessen Frequenz betrug analog zum Radarsensor rd. $130 \text{ Imp} \cdot \text{m}^{-1}$. An den übrigen Fahrzeugen wurde ein Eingriff in die Fahrzeugelektronik vorgenommen und das spezifische Sensorsignal abgegriffen. Für den Vierraupentraktor Carraro Mach 4 wurde mit rd. $100 \text{ Imp} \cdot \text{m}^{-1}$ eine Auflösung von $\pm 1,0 \text{ cm}$ je Impuls erreicht. Der Schlepper Geier 60 TLY stellte hingegen nur rd. $40 \text{ Imp} \cdot \text{m}^{-1}$ mit einer resultierenden Auflösung von $\pm 2,5 \text{ cm}$ je Einzelimpuls zur Verfügung. Diese Konstellation erschwerte den Nachweis kleiner Schlupfwerte bei den Kettentraktoren; insbesondere bei dem Zweiraupenfahrzeug Geier 60 TLY. Schlupfwerte nahe dem Nullpunkt konnten somit auflösungsbedingt auch teilweise in einen geringfügig negativen Bereich tendieren.

Der Antriebsschlupf wurde für die verschiedenen Geschwindigkeitsbereiche jeweils als durchschnittlicher Schlupf über die betrachtete Messstrecke berechnet. Die zugrundeliegende Methodik ist anerkannt und auch in der Literatur entsprechend beschrieben (TURNER 1995).

Für zukünftige Messungen sollte eine hochauflösende Sensorik zur Dokumentation der theoretisch zurückgelegten Fahrstrecke verwendet werden, um die Messgenauigkeit zu erhöhen. Die zur Erfassung der tatsächlichen Wegstrecke verwendete Radartechnologie zeigte hingegen eine gute Eignung. Alternativ werden vereinzelt zur

Schlupfmessung auch Drehgeber beschrieben (JACKE et al. 2004; WEISE und JIRIKOWSKI 2008a, 2008b).

Die spezifische Kontaktfläche der Bandlaufwerke des Carraro Mach 4 konnte unter Anwendung der Simulationssoftware TASC (DISERENS 2002, 2010) auf $1,60 \text{ m}^2$ bestimmt werden. Hiervon standen unter Praxisbedingungen jedoch lediglich $1,26 \text{ m}^2$ in Bodenkontakt. Die Gesamtfläche verteilte sich anteilig auf die vier Laufwerke. Die übrige Bandfläche war im Bereich der Umlenkrollen bereits von der Fahrbahn abgehoben und trug somit nicht zur Abstützung der Laufwerkslast bei.

Der Radtraktor hatte eine Gesamtkontaktfläche von nur $0,46 \text{ m}^2$, welche sich zu einem Drittel auf die Vorder- und zu zwei Dritteln auf die Hinterachse verteilte. Die Kontaktfläche des Vierraupentraktors war somit rd. 2,7-fach größer. In einer vergleichbaren Größenordnung entwickelte sich auch der Rollwiderstandskoeffizient auf der Asphaltbahn. Mit einem c_R -Wert von 0,09 zeigte der Vierraupentraktor einen dreifach höheren Rollwiderstand als der Radtraktor. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu Veröffentlichungen von SCHILLING (1960) sowie KOOLEN und KUIPERS (1983), welche stets vergleichbare Rollwiderstandskoeffizienten für landwirtschaftliche Rad- und Bandfahrwerke auf befestigten Fahrbahnen ermittelt hatten. Die Angaben der Autoren bezogen sich jedoch auf konventionelle Zweiraupenfahrzeuge und berücksichtigten nicht die bauartbedingten Besonderheiten der Vierraupenfahrzeuge. Während der Rollwiderstand des Vierraupentraktors folglich höher als erwartet ausfiel, entsprach derjenige des Radtraktors den publizierten Werten.

Für die Sandfahrbahn bewegte sich der Rollwiderstandskoeffizient für beide Fahrzeuge auf einem vergleichbaren Niveau. Die berechneten Werte stimmen mit den gängigen Literaturangaben überein. Aufgrund der größeren Aufstandsfläche sowie der damit einhergehenden Minderung des theoretischen Kontaktflächendrucks und der elastoplastischen Verformungsvorgänge in Band und Fahrbahn wurde hingegen ein tendenziell günstigeres Rollwiderstandsverhalten des Vierraupentraktors erwartet.

Nach SCHLÖR (1959) sowie MERHOF und HACKBARTH (1985) sind auch fahrwerskimmanente Widerstände maßgeblich an der Entstehung des Rollwiderstands von Bandlaufwerken beteiligt. Diese resultieren insbesondere aus Reibungsvorgängen zwischen Band und Laufwerksrollen. Höher als erwartet ausfallende

Rollwiderstände des Vierraupentraktors könnten auf eine hohe Bandvorspannung zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung zurückzuführen sein; allerdings wurde diese gemäß Herstellerangaben eingestellt.

Ein weiterer Erklärungsansatz bezieht sich auf die theoretischen Angriffspunkte der Bodenreaktionskraft unter den einzelnen Bandlaufwerken der Vorder- und Hinterachse. Im geschleppten Zustand wanderten diese gedachten Punkte in Richtung des jeweils vorderen Laufwerksbereichs und somit aus dem Zentrum der Kontaktfläche heraus. Dieser Effekt führt nach KOOLEN und KUIPERS (1983) ebenfalls zu einem Anstieg des spezifischen Rollwiderstands (vgl. Kräfteverhältnisse in Abb. 23).

Bezüglich des Triebkraftverhaltens zeigten der Radtraktor Fendt 211V Vario sowie der Zweiraupentruktor Geier 60 TLY ein mit publizierten Daten übereinstimmendes Verhalten. Hingegen wich der Vierraupentruktor Carraro Mach 4 ebenso wie beim Rollwiderstand von gängigen Erfahrungswerten ab. Unter den Versuchsbedingungen auf der Sandfahrbahn erreichte der Vierraupentruktor einen Triebkraftkoeffizienten um 0,5. Für den Radtraktor konnte ein maximaler Triebkraftkoeffizient von ebenfalls rd. 0,5 und für den Zweiraupenschlepper von rd. 0,7 ermittelt werden. Somit zeigte der Vierraupentruktor, trotz einer wesentlich größeren Kontaktfläche, ein mit dem Radtraktor vergleichbares Triebkraftverhalten. Eine verschleißbedingte Minderung der erreichten Triebkräfte war auszuschließen, da die zum Einsatz kommenden Gurtbänder nahezu neuwertig waren, insbesondere wies das Stollenprofil keine bedeutsamen Abnutzungserscheinungen auf. Das vielmehr dem Radtraktor entsprechende Triebkraftverhalten könnte auf die gegenüber Zweiraupentruktoren verminderte Kontaktfläche der Gurtbänder zurückgeführt werden. Während das Verhältnis zwischen Länge der Antriebsbänder und Fahrzeuggesamtlänge für konventionelle Zweiraupentruktoren i. d. R. um 80 % beträgt, betrug es beim Carraro Mach 4 nur rd. 65 %. Auch berichteten PLATZER und LIND (2011) von einem eingeschränkten Triebkraftverhalten des Fahrzeugs auf ausgetrockneten Böden. Dieser Effekt ist insbesondere auf nichtbindigen Böden auf eine Minderung der bodenfeuchtebedingten Scheinkohäsion und einer damit einhergehenden Verringerung der Bodenscherfestigkeit zurückzuführen (KIESLINGER 1962; TRÜCKMANN und HORN 2009). Unter diesen Bedingungen gleitet das Band ohne nennenswerte Kraftübertragung über den Boden hinweg.

Beide Kettenfahrzeuge ließen gegenüber dem Radtraktor jedoch einen verhältnismäßig steilen Anstieg der verfügbaren Zugkraft - insbesondere im unteren Schlupfbereich bis etwa 10 % - erkennen. In diesem günstigen Einsatzbereich standen bereits rd. 65 - 80 % der maximalen Zugkraft zur Verfügung. Vor dem Hintergrund einer Vermeidung von Gefügeschäden im Oberboden durch schlupfbedingte Scherbeanspruchung waren beide untersuchten Bandlaufwerke dem Radtraktor überlegen.

Für die verschiedenen Fahrwerke wurden maximale Wirkungsgrade von 40 - 55 % ermittelt. Dabei erreichte der Radtraktor das spezifische Wirkungsgradmaximum von 40 % in einem für Radschlepper typischen Schlupfbereich von rd. 20 % auf leichten Böden. Im Vergleich mit Standardkennzahlen und unter Berücksichtigung der Standortbedingungen ist dieses insgesamt jedoch als eher gering einzustufen. Ein identischer Wirkungsgrad konnte für den Vierraupentraktor ermittelt werden. Gegenüber dem Radtraktor war dessen ausgeprägter, nahezu parallel mit dem Zugkraftverlauf einhergehender, Anstieg des Wirkungsgrades bei niedrigen Antriebsschlupfwerten als günstig zu bewerten. Zusätzlich ließ der Vierraupentraktor einen konstant hohen Wirkungsgrad über einen weiten Betriebsbereich erkennen. Der Zweiraupentraktor erreichte mit rd. 55 % den höchsten Wirkungsgrad bei einer dem Vierraupentraktor vergleichbaren schlupfabhängigen Entwicklung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Charakteristika der Raupenfahrzeuge einen effizienten Fahrzeugeinsatz über einen praxistauglichen Einsatzbereich hinweg ermöglicht. Die erzielten Wirkungsgrade sind gegenüber dem Radtraktor als vorteilhaft zu beurteilen.

5.3 Dynamische Bodendruckmessungen

Der Fokus der vorliegenden Arbeit lag auf der Messung der technogen verursachten Spannungsverhältnisse im Boden, mit dem Ziel das Ausmaß der Bodenbeanspruchung durch verschiedene Fahrwerke zu vergleichen. Für die Messung der Bodenspannung wurden die bekannten und etablierten hydraulischen Schlauchdrucksonden verwendet, wie sie unter anderem von BOLLING und SÖHNE (1982) und BOLLING (1984, 1986, 1987) beschrieben wurden. Seither werden diese regelmäßig im landwirtschaftlichen Kontext zur Bodenspannungsmessung eingesetzt.

Die mit der Schlauchdrucksonde gemessenen Drücke waren als Summe der im unmittelbaren Sondenumfeld angreifenden Bodenspannungen zu interpretieren. Dabei war die Unterscheidung einzelner Spannungskomponenten bzw. eine Aussage zur Wirkrichtung nicht möglich. Dies war im Hinblick auf die Zielsetzung - einen Vergleich der relativen Druckbeanspruchung - jedoch auch nicht gefordert.

Die Messung absolut herrschender Bodendruckverhältnisse setzte den Einbau der Schlauchdrucksonden in ein ungestörtes Bodengefüge voraus. Hierzu beschrieb BOLLING (1987) einen Installationsprozess unter Verwendung einer Bohrlanze mit konzentrischer Spitze. Dabei beschränkt sich die Störung des Bodengefüges auf den unmittelbar durch die Kegelspitze tangierten Bohrkanal. Auswirkungen auf die gemessenen Druckverhältnisse werden weitestgehend vermieden. Grundsätzlich unterliegt die Quantifizierung fahrzeuginduzierter Bodendrucke einer hohen standort- und bewirtschaftungsabhängigen Variabilität. So kann eine gleichartige Belastung des Bodens auf unterschiedlichen Standorten oder zu unterschiedlichen Zeitpunkten eine augenscheinlich abweichende Beanspruchung induzieren (WEIßBACH 1994; WIERMANN 1998; HORN und ROSTEK 2000).

Die in Kapitel 3.8 dargelegte Methodik der Messung mittlerer Normalspannungsverhältnisse im Boden war somit für den Fahrzeugvergleich unter ansonsten Ceteris-paribus-Annahmen besonders geeignet. Dies galt insbesondere für den Vergleich der überfahrtsinduzierten relativen Druckbeanspruchungen. Das beschriebene Vorgehen zur Installation der Schlauchdrucksonden unter Berücksichtigung einer vergleichbaren Standortvorbereitung gewährleistete valide Ergebnisse. Die Ergebnisanalyse ließ eine sehr gute Reproduzierbarkeit bei geringer Streuung der wiederholten Messungen erkennen. Indikatoren hierfür waren insbesondere die für Feldmaßstäbe günstigen und geringen Variationskoeffizienten. Eine höhere Streuung der Einzelmesswerte trat regelmäßig nur unter entlasteten Laufwerksrollen auf, welche infolge dessen eine höhere Schwankungsbreite der gemessenen Druckwerte zeigten. Die berechneten Variationskoeffizienten bewegten sich in einer vergleichbaren Größenordnung, wie sie auch OLF (1993) ermittelte. Auch konnte die Tendenz nachgewiesen werden, dass die Standardabweichung der Messwerte mit zunehmender Messtiefe meist abnimmt. Der Variationskoeffizient als normierte Standardabweichung hingegen nahm mit zunehmender Messtiefe meist zu.

Zusammenfassend war zu konstatieren, dass die gewählte Art und Weise der Vorbereitung der Messparzellen zwar eine lokale Störung des Bodengefüges am Ort der Installation hervorrief, deren Auswirkung auf die Messungen durch die vorgeschaltete Standortrückverdichtung jedoch weitestgehend eliminiert werden konnte.

Im Kontrast zu Traktoren und Arbeitsmaschinen der Flächenlandwirtschaft ist die Masse der Weinbautraktoren deutlich geringer. Demzufolge lässt die Überfahrt der Weinbautraktoren eine nur begrenzte Tiefenwirkung der Druckspannungen im Boden erwarten. Dies machte eine Spannungsmessung in den oberen Bodenschichten zwingend erforderlich. Absolute Druckmessungen im Oberboden sind jedoch aufgrund der zu erwartenden Gefügeveränderungen im Zuge des Sondeneinbaus nur eingeschränkt möglich (BOLLING 1987). Die grundsätzliche Eignung des Versuchsaufbaus wurde hierdurch jedoch nicht beeinträchtigt. Vergleichbares berichtete auch GEYER (1990), welcher den Einsatz hydraulischer Schlauchdrucksonden zur Bodenspannungsmessung in anthropogen beeinflussten Pflanzfurchen beschreibt.

Vorversuche zur Sondeninstallation nach der von BOLLING (1987) beschriebenen Vorgehensweise konnten am Versuchsstandort nicht erfolgreich abgeschlossen werden. Bedingt durch den hohen Sandanteil des Bodens floss regelmäßig Bodenmaterial in den angelegten Bohrkanal nach und verschloss diesen bereits vor Abschluss der Installation.

Es wurde eine bewusst niedrige Überfahrtsgeschwindigkeit gewählt. Die damit einhergehende längere Einwirkzeit der Bodenbelastung ließ tendenziell höhere Bodendrücke und eine klar differenzierte Ausformung der Druckprofile erwarten. Die Fahrspuren wurden dahingehend ausgerichtet, dass die Zonen der zu erwartenden Maximaldrücke im Zentrum der Druckaufnehmer lokalisiert waren. Durch diese Vorgehensweise wurde die Aufzeichnung eines eindeutigen und belastungsabhängig veränderlichen Druckprofils sichergestellt. Bei den Reifenfahrwerken war gemäß Veröffentlichungen von WEIßBACH (1994), DEGRELL (2006) und EBEL (2006) der höchste Druck in der Kontaktfläche senkrecht unter dem Reifenmittelpunkt zu erwarten. Hingegen war für die Bandlaufwerke eine grundsätzlich abweichende Druckverteilung anzunehmen. Insbesondere stützt die freitragende Bandfläche im Rollenzwischenbereich im Vergleich zur Bandfläche unterhalb einer Laufwerksrolle nur einen geringeren Anteil der Fahrzeugmasse ab. Entsprechend niedriger fallen auch die in diesem

Bereich nachweisbaren Kontaktflächen- und Bodendrücke aus, wie WEIßBACH und WINTER (1996) ausführlich untersucht und dargestellt haben.

Die im weinbaulichen Kontext verbreiteten Bandlaufwerke zeigten hingegen nur geringe Anteile eines freitragenden Gurtbands im Zwischenrollenbereich; demzufolge war eine Beeinflussung der Messergebnisse aufgrund dieses Sachverhaltes bereits konstruktiv begrenzt.

Vor Beginn der Messüberfahrten war jeweils eine vollständige Entlüftung der Sonden vorzunehmen sowie deren Dichtheit zu überprüfen. Insbesondere eingeschlossene Luftblasen hätten aufgrund ihrer Kompressibilität die Messergebnisse dahingehend verfälscht, dass tendenziell zu niedrige Werte durch den Druckaufnehmer gemessen worden wären. Zur Gewährleistung eines sicheren Bodenschlusses zwischen Druckaufnehmer und umgebendem Bodenmaterial wurde die Sonde vor Versuchsbeginn mit einem Vordruck beaufschlagt. Auftretende Druckspannungen unterhalb des jeweiligen Vordruckniveaus konnten durch die Schlauchdrucksonde nicht erfasst werden.

Im Rahmen der messtechnischen Fehlerbetrachtung war der Einfluss vordruckbedingter Verfälschungen als gering einzustufen. Dies galt auch für die eingeschränkte Möglichkeit der Druckmessung unterhalb des spezifischen Vordruckniveaus. In beiden Messtiefen waren i. d. R. deutliche Spannungsimpulse der Fahrwerke nachweisbar. Lediglich im Bereich entlasteter Einzelrollen der Bandlaufwerke bestand grundsätzlich die Möglichkeit, dass diese einen Druckimpuls unterhalb des gewählten Vordruckniveaus induzierten.

Die Auswirkungen einer neigungsbedingten Beeinflussung des Bodendruckverhaltens der Fahrzeuge waren ebenfalls gering. Anhand der aufgezeichneten Neigungsdaten wurde eine Korrektur der theoretischen Kontaktflächendruckverhältnisse um Einflüsse einer neigungsabhängigen Lastverlagerung vorgenommen (vgl. Tab. 16). Die berechneten Abweichungen waren mit max. 3 kPa sehr gering und bewegten sich im unteren Bereich der Messauflösung. Für die Auswertung wurden diese somit nicht berücksichtigt.

Die Berücksichtigung des eingestellten Vordruckniveaus im Rahmen der Datenauswertung wird in der Literatur kontrovers diskutiert. GEISCHEDER (2011) wies darauf

hin, dass eine pauschale Subtraktion auch gemessene Druckspitzen entsprechend vermindert. Demgegenüber zeigten OLF (1993) und WEIßBACH (1994) ihre Messdaten unter Bezugnahme auf ein einheitliches Vordruckniveau. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Verfahren einer einheitlichen Normierung der Daten durch Subtraktion des Sondenvordrucks gewählt. Dieses Verfahren berücksichtigte insbesondere das überfahrtsbedingt variierende Vordruckniveau der Schlauchdrucksonden. Das einheitliche Normierungsverfahren schloss Verzerrungen zwischen den gemessenen Druckwerten effektiv aus und ließ einen fahrzeugspezifischen Vergleich der Druckprofile unter Bezugnahme auf eine einheitliche Nulllinie zu.

Nach Abschluss der Versuchsüberfahrten wurden vereinzelt persistierende Sondenrestdrücke in den Messhorizonten festgestellt. Der ausgewiesene Restdruck war auf eine elastoplastische Bodenverformung zurückzuführen, wobei der Druckbetrag die Intensität der erfolgten Verformung quantifizierte. Insgesamt war die dauerhaft nachweisbare Verformung nur gering ausgeprägt. In einer Tiefe von 0,25 m wurden regelmäßig höhere Restdrücke als in 0,15 m Tiefe gemessen. Unter Berücksichtigung der vorgenommenen Bodenbearbeitung kam die Bodendrucksonde im tieferen Messhorizont auf natürlich gelagertem Boden zu liegen. Demzufolge reagierte die stabil gelagerte Sonde sensitiver auf einwirkende Druckereignisse. Für die Sonde in 0,15 m Tiefe wurde angenommen, dass sie wahrscheinlich der Bewegung des umgebenden Bodens folgte und somit aufgrund eines fehlenden Widerlagers keine oder nur geringe Restdrücke aufwies. Die nur begrenzt nachweisbaren Restdrücke unterstützen die eingangs aufgestellte These einer effektiven Rückverdichtung nach Vornahme der Sondeninstallation. Somit stand zum Zeitpunkt der Messüberfahrten ein vergleichbarer Modellboden zur Verfügung.

Die Druckprofile des Rad- und Zweiraupentraktors zeigten eine jeweils fahrzeugspezifische Bodenbeanspruchung, wie sie unter Berücksichtigung fahrmechanischer Grundsätze erwartet wurde. Für den Zweiraupentraktors waren dies insbesondere Veränderungen der Druckverteilung in der Kontaktfläche aufgrund einer lastabhängigen Achslastverlagerung von der Vorder- zur Hinterachse. Der Radtraktor zeigte ebenfalls im Wesentlichen eine Verlagerung der abzustützenden Achslasten, welche auch anhand der gemessenen Bodendrucke nachweisbar war. Auch für den zweiachsigen Vierraupentraktors konnte analog zum Radtraktor grundsätzlich eine Achslastverlagerung von der Vorder- zur Hinterachse gezeigt werden. Darüber hinaus

unterschied sich dieser jedoch maßgeblich von den beiden Vergleichsfahrzeugen. Die Bodendruckmessung wies zusätzlich erhebliche laufwerksinterne Verlagerungseffekte nach, besonders für das heckseitige Bandlaufwerk.

5.4 Gewichteter mittlerer Bodendruck (GMP)

Die Fahrwerksvarianten verursachten bauartbedingt eine unterschiedliche Druckbeanspruchung im Boden, welche jeweils hinsichtlich ihrer modalen und temporalen Intensität bewertet wurden. Die Berechnung des gewichteten mittleren Bodendrucks ermöglichte in diesem Zusammenhang die Quantifizierung der jeweiligen Beanspruchung.

Über alle Fahrzeuge hinweg generierte die Überfahrt in 0,25 m Tiefe ein niedrigeres Druckniveau als in 0,15 m Tiefe. Der Druckabbau war auf eine dreidimensionale Ausbreitung der Druckspannung unterhalb der Kontaktfläche zurückzuführen, woraus ein Spannungsabtrag über ein mit zunehmender Tiefe anwachsendes Bodenvolumen erfolgte (ZELENIN 1950). Der Vorgang des Spannungsabbaus am Standort unterlag einer überfahrtsinduzierten Beeinflussung. Im rückverdichteten Zustand zeigte der Boden eine hohe Tragfähigkeit. Damit einher gingen ein flacher Abbauwinkel der Druckspannung und ein schneller Spannungsabtrag über ein großes Bodenvolumen. Hingegen konnte für den gelockerten Boden eine verminderte Tragfähigkeit gezeigt werden, einhergehend mit einer Spannungsfortpflanzung auch in tiefere Bodenschichten (SÖHNE 1953; HÜTTE 1955; KUNTSCHKE 2000).

In den ungebremsten Nullvarianten war eine insgesamt höhere verdichtungswirksame Bodenbeanspruchung gegenüber den Verzögerungsvarianten nachweisbar. Dieses Phänomen lässt sich durch eine tendenziell ungünstige Masseverteilung der frei abrollenden Leerfahrzeuge erklären. Ohne zusätzliche Ballastierung durch Anbau- oder Anhängelasten ist die Lastverteilung heterogen und demzufolge auch die Druckverteilung in der Kontaktfläche ungleichmäßig. Die Auswirkungen fehlender oder nicht sachgerechter Ballastierung im Rahmen der Feldarbeit wurden auch von TURNER et al. (2001) und KELLER et al. (2002) beschrieben. Besonders deutlich wurde dieser Zusammenhang an der stark frontlastigen Masseverteilung bei der ungebremsten Überfahrt des Zweiraupentraktors.

Auch die Überfahrt des Radtraktors rief trotz der Verteilung der Fahrzeugmasse im Verhältnis von rd. 40 : 60 zwischen Vorder- und Hinterachse einen erkennbar stärkeren Spannungsimpuls der Vorderachspassage hervor. Für den Radtraktor wurde unter Berücksichtigung der Parameter Reifenbauart, -innendruck, Radlast und Reifendimensionierung eine spezifische Kontaktfläche berechnet (DISERENS und SPIESS 2005; DISERENS 2010). Die Kontaktflächenverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse betrug rd. 30 : 70. Die verhältnismäßig kleinere Kontaktfläche der Vorderreifen trug somit überproportional zur Gesamtlastabstützung bei. Zusätzlich erfolgte die Passage der Vorderachse auf einem weniger vorverdichteten und tragfähigen Boden als die Passage der spurtreu nachfolgenden Hinterachse. Die Vorderachse induzierte folglich eine höhere Bodenspannung in tieferen Bodenschichten als die nachfolgende Hinterachse. Beim Vierraupentraktor Carraro Mach 4 war die Druckbeanspruchung zwischen Nullvariante und den Verzögerungsvarianten vergleichbar. Dieser zeigte somit bei Leerfahrt eine ausgewogene Fahrzeugballastierung.

Der GMP für den Radtraktor ließ erkennen, dass dieser Fahrzeugtyp über die verschiedenen Verzögerungsstufen hinweg eine relativ gleichmäßige Druckbeanspruchung hervorrief. Das heißt, dass eine zunehmende Abbremsung zwar eine fahrzeuginterne Achslastverlagerung verursachte, diese jedoch im Hinblick auf die verdichtungsrelevante Gesamtbeanspruchung nur geringe Auswirkungen zeigte. Die Ursache hierfür könnte im elastischen Verhalten der luftgefüllten Reifen begründet sein. Diese reagierten auf die verzögerungsbedingte Hinterachsmehrbelastung mit einer fortschreitenden Einfederung unter Abplattung des Reifenlatsches und einer damit einhergehenden Kontaktflächenvergrößerung. Auch ein tieferes Einsinken innerhalb der nachgiebigen Fahrbahn führte zu einer Vergrößerung der Kontaktfläche. Die zeitgewichtete Gesamtdruckbeanspruchung unterlag somit zunächst keiner Progression. Gleichwohl resultierte die absolut betrachtet höhere Hinterachslast in einer zunehmenden Tiefenwirkung der Druckbeanspruchung. Dieser Befund ist kongruent mit entsprechenden Veröffentlichungen von SCHLOTTER und KUTZBACH (2001).

Im Kontrast hierzu entfiel für die Bandfahrzeuge die lastabhängige Variabilität der Kontaktflächenausprägung weitestgehend und somit auch eine gegebene Kompensationsfähigkeit (ARVIDSSON et al. 2011). Tendenziell zeigten diese mit zunehmender Verzögerungskraft einen Anstieg der verdichtungswirksamen Druckbeanspruchung in beiden Messtiefen. Für das Zweiraupenfahrzeug Geier 60 TLY war in 0,25 m Tiefe

nur noch eine geringe Druckbeanspruchung nachweisbar. Dieser Effekt war auf die geringe Fahrzeugmasse und die dadurch begrenzte Tiefenwirkung zurückzuführen.

Die untersuchten Bandlaufwerke zeigten dennoch über alle betrachteten Varianten hinweg eine geringere mittlere Druckbeanspruchung als der Radtraktor als Standardmechanisierungssystem.

Vor dem Hintergrund einer minimierten Druckbeanspruchung des Bodens zeigte die Analyse der Teilergebnisse des zeitgewichteten Druckverhaltens die deutlichen Vorteile des Zweiraupentraktors. Im unmittelbaren Vergleich mit den beiden Vergleichsfahrzeugen ist jedoch dessen geringere Fahrzeugmasse zu berücksichtigen. Der Vierraupen- und der klassische Radtraktor ließen keine eindeutige Bewertung des Druckverhaltens zu. Der neuartige Vierraupentruktor verursachte gegenüber dem Radtraktor eine geringere Gesamtbodenbeanspruchung. Mit zunehmender Abbremsung nahm diese jedoch kontinuierlich zu. Hingegen war für den Radtraktor eine deutliche lastvariable Kompensationsfähigkeit nachzuweisen, allerdings auf einem moderat erhöhten Bodendruckniveau.

Zusätzlich zur Gesamtdruckbeanspruchung war der Spannungsabbau im Boden untersucht worden. Über alle Versuchsvarianten hinweg wurde für den Zweiraupentruktor mit 50 % der höchste mittlere Druckabbau verzeichnet. Diese Beobachtung konnte wiederum auf die geringe Fahrzeugmasse des Versuchsfahrzeugs zurückgeführt werden. Für den Radtraktor betrug die Rate des Spannungsabbaus 35 %, für den Vierraupentruktor 28 %. Der günstigere Druckabbau des Radschleppers war wiederum durch dessen belastungsabhängige Kontaktflächenvariabilität zu erklären.

5.5 Penetrometrie und Analyse der Eindringwiderstände

Der Messvorgang mit dem Penetrometer beeinflusst *per se* die natürliche Bodenlagerung und lässt daher keine Wiederholung des Penetrationsversuchs am identischen Messpunkt zu. Eine vergleichende Messung vor und nach Belastung des Bodens musste somit an unterschiedlichen Positionen innerhalb der Messparzellen bzw. des überrollten Fahrspurbereichs vorgenommen werden. Hieraus resultierte die grundsätzliche Gefahr einer bodenbürtigen Beeinflussung bzw. Verfälschung. Um dies auszugleichen, erfolgte regelmäßig eine Wiederholung der Penetrationsmes-

sungen. Die zusätzlich durchgeführte Begutachtung vor Versuchsbeginn sowie die Korngrößenanalyse in verschiedenen Horizonten ergab, dass der Standort ein homogen ausgestaltetes Bodeninventar besaß. Für die Ergebnisinterpretation wurde berücksichtigt, dass der gemessene Eindringwiderstand jeweils nur als relative und momentbezogene Kenngröße angesehen werden kann. Trotz dieser Einschränkungen ist die Penetrometrie für eine vergleichende Untersuchung technogen verursachter Bodenverdichtungen im Feldeinsatz besonders geeignet. Dies gilt sowohl in Hinblick auf die räumliche Ausprägung als auch auf die Tiefenwirkung (BUCHTER und HÄUSLER 2009).

Als wesentliche Einflussgröße auf den Penetrationswiderstand wird in der Literatur regelmäßig die Bodenfeuchte genannt (SUN et al. 2003; WEYER und BOEDDINGHAUS 2010; HOLPP 2012). Wie bereits dargestellt, lagen zu den Zeitpunkten der Versuchsdurchführung verschiedene Bodenwassergehalte vor, welche die momentbezogenen Bodeneindringwiderstände beeinflussten. Mit zunehmender Austrocknung des Bodens stiegen die Penetrationswiderstände an. Dieser Tatbestand wurde für die statistische Auswertung der Ergebnisse entsprechend berücksichtigt.

Im Vergleich zu den unbefahrenen Kontrollvarianten zeigte der Oberboden über alle Fahrzeuge und Verzögerungsstufen hinweg eine überfahrtsinduzierte signifikante Steigerung des Bodeneindringwiderstands. Eine weitergehende Unterscheidung der einzelnen Verzögerungsvarianten untereinander war hingegen für den Radtraktor und den Zweiraupentraktor nicht möglich. Nur der Vierraupentraktor zeigte in Einzelfällen variantenabhängige Abweichungen.

Diese Befunde belegen, dass die Überfahrten regelmäßig eine signifikante Verdichtung des standardisierten Bodengefüges am Versuchsstandort bewirkten. Die durch äußere Belastung - respektive induzierte Verzögerungskräfte - beeinflusste Verteilung der fahrzeugspezifischen Rad- und Bandlast zeigte hingegen nur geringe Auswirkungen auf die Verdichtung. Tendenziell stiegen die gemessenen Eindringwiderstände jedoch mit zunehmender Verzögerung an.

Dieser Effekt war insbesondere für die Bandlaufwerke zu beobachten; ursächlich hierfür dürfte die fehlende Möglichkeit einer lastabhängigen Kontaktflächenvergrößerung sein. Auch lösten die Bandlaufwerke aufgrund einer heterogenen Lastabstützung lokal begrenzt höchste Druckbeanspruchungen im Boden aus.

Für die Krumbasis war ein Einfluss der Überfahrten noch erkennbar. Die dokumentierten Gefügeveränderungen waren jedoch nicht mehr signifikant. Eine valide Abgrenzung standortbedingter Bodenheterogenitäten von fahrzeuginduzierten Veränderungen war somit nicht möglich. Die vergleichende Analyse der Eindringwiderstände ließ insbesondere für die relativ schweren Fahrzeuge 211V Vario und Mach 4 noch Effekte in den höheren Verzögerungsstufen erkennen. Für das im Vergleich leichtere Zweiraupenfahrzeug Geier 60 TLY waren geringfügige Auswirkungen nur noch in der höchsten VS zu erkennen.

Im Unterboden konnten bei den gegebenen Fahrzeugmassen erwartungsgemäß keine Auswirkungen mehr quantifiziert werden. Auch VAN DER PLOEG et al. (2006) kamen bei ihren Untersuchungen über die Tiefenwirkung technogener Bodenbeanspruchungen und Gefügeveränderungen im landwirtschaftlichen Bereich zu vergleichbaren Ergebnissen. Die Resultate stimmten auch mit denen von TOLÓN-BECERRA et al. (2012) überein. Bei vergleichbarer Fahrzeugmasse und Anzahl der Überfahrten stellten die Autoren in Olivenhainen ebenfalls signifikante Veränderungen des Eindringwiderstands bis in eine Tiefe von etwa 30 cm fest.

Die Analyse der Penetrometerwiderstände zeigte für die einzelnen Versuchsfahrzeuge in den verschiedenen Verzögerungsstufen jeweils nur geringe belastungsabhängige Auswirkungen. Hingegen deutete der direkte Vergleich der Fahrzeuge untereinander im Oberboden auf ein höheres Verdichtungspotenzial des Carraro Mach 4 gegenüber den beiden Vergleichsfahrzeugen hin. Statistisch war diese Beobachtung allerdings nur für VS-2 zu belegen, wohingegen jedoch auch VS-1 und VS-3 eine vergleichbare Entwicklung andeuteten. Der Zweiraupentraktor zeigte hier stets ein dem Radtraktor ähnliches Verdichtungsverhalten.

Auffällig war die relative Entwicklung des Eindringwiderstands für den Zweiraupentraktor. Das deutlich leichter konstruierte Fahrzeug führte trotz nachweislich geringerer Druckbeanspruchung zu einer mit den deutlich schwereren Fahrzeugen vergleichbaren Zunahme des Eindringwiderstands. Die gegenüber den Vergleichsfahrzeugen geringere Fahrzeugmasse bzw. verminderte Druckbeanspruchung des Bodens lässt hingegen eine geringere Verdichtungsintensität erwarten.

Die höher als erwartet ausfallende Verdichtungswirkung war durch den regelmäßig im Kontext der Kettenfahrzeuge zitierten "Rüttelplatteneffekt" zu erklären. Dieser

wurde beispielsweise von MÜLLER (1984) für ungefederte Kettenlaufwerke beschrieben. Die zusätzliche Verdichtungswirkung durch Einleitung antriebsinduzierter Schwingungen war unter den herrschenden Versuchsbedingungen somit nachweisbar. Im Kontrast wurde jedoch erwartet, dass die konstruktiv federnd und pendelnd gelagerten Laufwerksrollen der modernen Bandlaufwerke diesen Effekt nur noch in abgeschwächter Art und Weise zeigen.

Für die Interpretation war weiterhin zu berücksichtigen, dass der Zweiraupentruktor technisch bedingt stärker als vorgesehen verzögert wurde. Auf den gemessenen Bodendruck zeigte dies jedoch keine erkennbaren Auswirkungen. Demzufolge sind eventuelle Effekte auf den gemessenen Eindringwiderstand ebenfalls als gering einzustufen. Gleiches gilt für eine schlupfinduzierte Beeinflussung; der Zweiraupentruktor wies über alle Versuchsstufen hinweg die niedrigsten Antriebsschlupfwerte auf.

Die vorliegende Arbeit nutzte den Penetrationswiderstand als Indikator für die überfahrtsbedingte Bodenverdichtung. VAN HUYSSTEEN (1989a, 1989b) sowie FERREE und STREETER (2004) belegten eine deutliche Korrelation zwischen Bodenlagerungsdichte und Bodeneindringwiderstand. Die Zunahme der Bodenlagerungsdichte wiederum ist als wesentlicher Prozess und Indikator des Verdichtungs Vorgangs selbst anzusehen. Vor diesem Hintergrund ist die Quantifizierung des spezifischen Eindringwiderstands eine geeignete und zielführende Nachweismethode für induzierte Bodenverdichtungen. Die ermittelten Eindringwiderstände waren im Hinblick auf die getrennte Untersuchung der drei Bodenhorizonte in sich schlüssig.

Absolut betrachtet wurden regelmäßig Eindringwiderstände zwischen 2,0 und 3,0 MPa nachgewiesen, insbesondere im Bereich der detektierten Krumbasisverdichtung. Diese Werte sind im Hinblick auf eine weinbauliche Standorteignung als kritisch einzuschätzen (VAN HUYSSTEEN 1983; MYBURGH et al. 1996). Die nachgewiesene Krumbasis- und Unterbodenverdichtung ist Folge einer langjährig wiederholten Flächenbefahrung. Gleichzeitig fördert das Einzelkorngefüge eine Dichtlagerung der Bodenpartikel.

5.6 Diskussion des neuartigen Vierraupenkonzepts für den Weinbau

Erste Ergebnisse zur Fahrmechanik der Vierraupentraktoren gehen auf Arbeiten von TURNER (1995) zurück, basierend auf Experimenten mit einem prototypischen Vierraupentraktor der Fa. Case-IH (Abb. 96). Er bewertete diesen Vierraupentraktor günstiger als die verglichenen Rad- und Zweiraupentraktoren. Insbesondere stellte er fest, dass die Lenkfähigkeit auch bei hoher Zugbelastung erhalten blieb sowie eine schlupf- und scherbedingte Störung des Bodengefüges bzw. der Kulturpflanzen nur in geringem Umfang stattfand. Auch ARVIDSSON et al. (2011) berichteten von einer vergleichenden Untersuchung mit einfach- und zwillingsbereiften Radtraktoren sowie Vierraupentraktoren. Sie stellten ein günstigeres Triebkraftverhalten bei verminderten Antriebsschlupfwerten für die Fahrzeuge mit Bandlaufwerk fest. Darüber hinaus war die Druckverteilung zwischen und innerhalb der einzelnen Bandlaufwerke homogen. Die Autoren führten dies auf die pendelnd gelagerte Aufhängung der einzelnen Laufwerke und dem damit einhergehenden optimierten Grad der Boden Anpassung zurück. Die Lastabstützung erfolgte gleichmäßiger als bei konventionellen Zweiraupenlaufwerken. Insbesondere konnte die von KELLER et al. (2002) für Standardlaufwerke beschriebene Variabilität der Druckverteilung, die auf exzentrischer Lastverteilung oder extern angreifenden Kräften beruht, nicht auf die untersuchten Vierraupentraktoren übertragen werden.



Abb. 96: Prototyp des Case-IH Vierraupentraktors aus der Experimentalstudie von TURNER (1995).

TURNER (1995) führte keine Bodendruckmessungen durch, doch äußerte er die Vermutung, dass der Bodendruck im hinteren Laufwerksbereich zunehme. ARVIDSSON et al. (2011) bestätigten dies experimentell (Abb. 97).

Die dargestellten Befunde entsprechen weitestgehend den Versuchsergebnissen der vorliegenden Arbeit. So konnte insbesondere der Erhalt der Lenkfähigkeit des Carraro Mach 4 unter Lasteinwirkung uneingeschränkt bestätigt werden. Auch das positive Zugkraftverhalten und der bedeutende Zugkraftanstieg, vor allem im unteren Antriebsschlupfbereich, wurden nachgewiesen. Absolut betrachtet erreichte der neuartige Vierraupentruktor, bei ähnlicher Fahrzeugmasse, jedoch nur ein dem Radtraktor vergleichbares Zugkraftniveau. Die für den Carraro Mach 4 berechneten Fahrwerkswirkungsgrade waren im Hinblick auf die absolute Höhe mit dem Radtraktor vergleichbar; als vorteilhaft war die günstige Verteilung insbesondere im unteren Antriebsschlupfbereich hervorzuheben. Der relativ hohe Rollwiderstand auf befestigter Fahrbahn könnte hingegen zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch führen.

Untersuchungen von STAHL et al. (2005) hingegen zeigten ein anderes Bodendruckverhalten mit Konzentration der vorderachsinduzierten Druckmaxima im hinteren und der hinterachsinduzierten Druckmaxima im vorderen Laufwerksbereich (Abb. 98). Während beide Studien ein vergleichbares Druckprofil der Vorderachspassage ermittelten, unterschieden sich die Erkenntnisse bezüglich der Hinterachse.

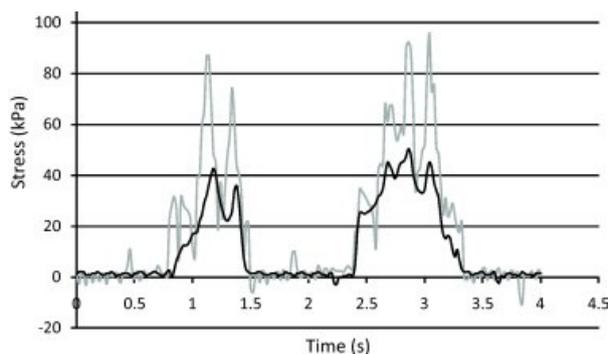


Abb. 97: Druckverlauf in 0,4 m Messtiefe unter dem Vorder- und Hinterachslaufwerk eines Vierraupentruktors. Die grau gefärbte Messkurve zeigt den Druckverlauf unter dem Laufwerkszentrum, die schwarz gefärbte den Verlauf im Laufwerksrandbereich (ARVIDSSON et al. 2011).

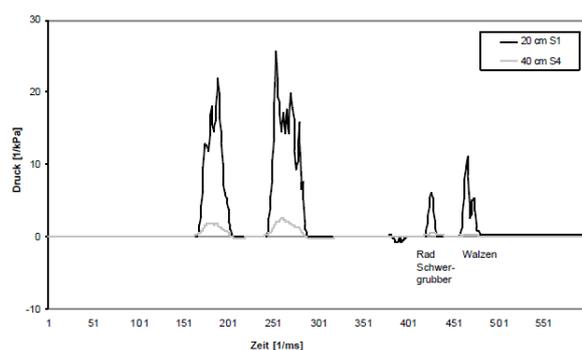


Abb. 98: Druckverlauf in 0,2 m und 0,4 m Messtiefe unter dem Vorder- und Hinterachslaufwerk mit nachfolgendem Schwergrubber und Packer eines Vierraupentruktors (STAHL et al. 2005).

Der Versuchstraktor Carraro Mach 4 zeigte das von STAHL et al. (2005) beschriebene Verhalten. Mit fortschreitender Abbremsung war die vorwiegende Abstützung der Vorderachslast im hinteren Laufwerkssegment nachzuweisen; ebenfalls erfolgte die Abstützung der Hinterachslast primär über den vorderen Kontaktflächenbereich. Die Tendenz kurzer Bandlaufwerke, in tieferen Bodenschichten zunehmend eine Aggregation der einzelnen Druckimpulse in Richtung einer glockenförmigen Verteilung hervorzurufen, war ebenfalls nachweisbar. Einzig exponierte und betragsmäßig hohe Einzelimpulse waren auch in der tieferen Messzone noch nachzuweisen.

Die Bodendruckmessungen zeigten zusammenfassend eine mit fortschreitender Abbremsung einhergehende Konzentration der Bodendruckspannung unter der vorderen Umlenkrolle des heckseitigen Bandlaufwerks. Diese Beobachtung steht im Kontrast zum Verhalten des korrespondierenden Frontlaufwerks. Dessen Passage führte mit zunehmender Abbremsung zu einer tendenziell sinkenden Druckbeanspruchung des Bodens. Zusätzlich war damit eine Verlagerung der Hauptdruckimpulse aus der vorderen in die hintere Laufwerkshälfte verbunden. Dieses Verhalten konnte auf eine zunehmende Vorderachsentslastung infolge der einwirkenden Verzögerungskraft zurückgeführt werden. Mathematisch war der Betrag der Vorderachsentslastung bei Kenntnis der Verzögerungskraft, der Lage deren Angriffspunkts sowie dem fahrzeugspezifischen Achsabstand zu berechnen. Für den Vierraupenschlepper resultierte aus den definierten Abbremsungsstufen eine Vorderachsentslastung in einer Größenordnung von 2,3 kN - 3,8 kN. Die Vorderachsentslastung ging einher mit einer Hinterachsbelastung gleichen Betrags. Unter Zugkrafteinwirkung stellte sich zusätzlich eine geringe Neigung (Aufbäumen) um die Fahrzeugquerachse ein, welche ebenfalls ursächlich an der nachgewiesenen Entlastung der vorderen Laufwerksrollen des Frontlaufwerks beteiligt war (KOOLEN und KUIPERS 1983).

Ein artifizierlicher Ursprung der gezeigten Verlagerungseffekte konnte ausgeschlossen werden, da diese standortunabhängig auch im Rahmen der durchgeführten Vorversuche auftraten. Aufgrund der ansonsten uneingeschränkt zu plausibilisierenden Ergebnisse wurden messtechnische Einflüsse ebenfalls als unwahrscheinlich angesehen.

Im Hinblick auf die Gestaltung des Bandlaufwerks des Carraro Mach 4 war davon auszugehen, dass die konstruktive Verlagerung des Drehpunkts in Bodennähe we-

sentlich an der Entstehung der heterogenen Druckverteilung beteiligt war. Einerseits resultierte hieraus ein gesteigerter Anpassungsgrad des Laufwerks an die Bodenkontur, was auch im Rahmen der Leerfahrten bzw. unteren VS bestätigt werden konnte. Andererseits wirkte die drehbar gelagerte Schwinge zur Aufnahme der Laufwerksrollen als zusätzlicher Freiheitsgrad des mechanischen Laufwerkssystems und unterlag somit auch Einflüssen äußerer Kräfte und Momente. Mit zunehmender Verzögerung ging ebenso eine Steigerung der Kettenzugkraft im Gummigurtband als resultierende Gegenkraft zu inneren und äußeren Fahrwiderständen einher. Veröffentlichungen von MERHOF und HACKBARTH (1985), LIEBHERR (1991) sowie WENZLAWSKI (1999) folgend, zeigen die Dreieckslaufwerke bauartbedingt eine ansteigende Zugkraft im Lasttrum, ausgehend von der vorderen Umlenkrolle. Dabei kann der Anstieg näherungsweise über eine geometrische Reihe quantifiziert werden. Die maximale Kettenzugkraft liegt im Bereich zwischen hinterer Umlenkrolle und dem Auslauf des Antriebstrans an (Abb. 99). Im Rahmen der Bodendruckmessungen war die Entlastung der Laufwerksrollen des Hecklaufwerks primär im Bereich der größten Kettenzugkraft lokalisiert. In diesem Zusammenhang war davon auszugehen, dass die Kettenzugkraft ein Aushebeln des hinteren Laufwerkssegments über den Drehpunkt im Zentrum der Rollenaufhängung bewirkte.

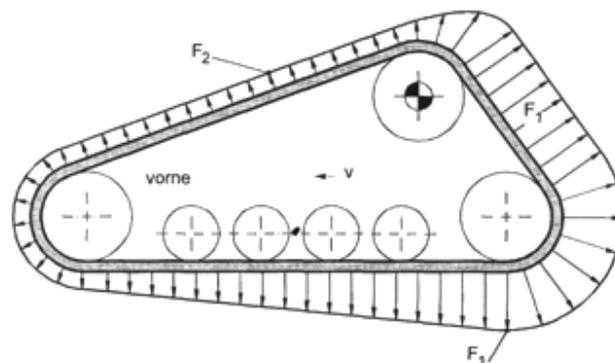


Abb. 99: Zugkraft in Antriebskette, beziehungsweise Antriebsband eines Deltalaufwerks (LIEBHERR 1991).

Zur abschließenden Bewertung der systemimmanenten Kausalzusammenhänge sind weitere Studien anzuraten, welche insbesondere auch zwischenzeitliche Weiterent-

wicklungen des Herstellers berücksichtigen. Dieser zeigte im Rahmen der Fachmesse Intervitis/Interfructa 2013 eine Veränderung der Laufwerkskonstruktion durch Installation eines Hartgummipuffers (Abb. 100). Hieraus resultiert eine Begrenzung des laufwerksinternen Pendelwegs, welche einerseits eine veränderte Druckverteilung in der Kontaktfläche bewirken, andererseits die Anpassungsfähigkeit des Laufwerks an Bodenunebenheiten einschränken sollte. Inwiefern hieraus eine zukünftige Verbesserung der u. a. von ANSORGE und GODWIN (2007) geforderten homogenen Druckverteilung in der Kontaktfläche als Voraussetzung einer bodenschonenden Befahrung abgeleitet werden kann, muss im Rahmen weitergehender Versuche untersucht werden.



Abb. 100: Konstruktive Veränderungen am Bandlaufwerk des Carraro Mach 4. Der eingefügte Hartgummipuffer begrenzt den Pendelweg des Laufwerks und begrenzt somit die einseitig-ungleichmäßige Druckverteilung in der Kontaktfläche.

Bezüglich des Bodenverdichtungsverhaltens ließ der neuartige Vierraupentraktor im Bezug auf die übrigen Fahrzeuge keine konsistente Bewertung zu. Prinzipiell folgte der gemessene Eindringwiderstand der mit fortschreitender Abbremsung intensivierten Druckbeanspruchung. Bei konsequentem Fortschreiten dieser Entwicklung wären jedoch sinngemäß in der stärksten VS die insgesamt höchsten Eindringwiderstände zu erwarten gewesen. Tatsächlich war diese Zunahme im Oberboden allerdings nur angedeutet; im Bereich der Krumbasis fehlten entsprechende Anhaltspunkte.

In diesem Zusammenhang war zu berücksichtigen, dass die Überfahrt des Carraro Mach 4 in der höchsten VS aufgrund der schlupfbedingten Fahrspur Bildung und Ein-

graben des Laufwerks im Bereich der Schlauchdrucksonden vorzeitig abgebrochen werden musste. Somit wurde in der entsprechenden Fahrspur nur eine verzögerte Überfahrt absolviert. Folglich hätten die gem. Versuchsplanung vorgesehenen Mehrfachüberrollungen noch eine nachhaltige Steigerung des Eindringwiderstands bewirken und somit den angedeuteten Trend einer stärkeren Bodenverdichtung bestätigen können.

Abgeleitet sind die weinbaulichen Bandlaufwerke von landtechnischen Entwicklungen aus der Flächenlandwirtschaft, wobei dort häufig grundverschiedene Einsatzbedingungen und Anforderungen definiert werden. Die bisher begrenzte Praxiserfahrung deutet beispielsweise auf einen nicht unerheblichen Verschleiß der Gummigurtbänder und der übrigen Laufwerksbestandteile durch die häufig skelettreichen Weinbergböden hin (Abb. 101). Als ursächlich kann in diesem Zusammenhang die deutlich geringere Flexibilität sowie Walk- und Federeigenschaft der Gurtbänder gegenüber einem luftgefüllten Reifen angesehen werden. Herstellerseitige Aussagen zur Haltbarkeit der Gummigurtbänder sind daher zukünftig kritisch zu überprüfen.



Abb. 101: Schäden am Gummigurtband nach rd. zweijährigem Einsatz in skelettreichen Weinbausteillagen (BALDAUF 2012).

Abschließend sei auf Überlegungen von PLATZER und LIND (2011) hingewiesen. Diese erkennen in einem zukünftig verstärkten Einsatz des Vierraupenkonzepts Potenzial zur Erschließung bislang manuell-händisch bewirtschafteter Weinberge. Eine schlagkräftige und flächendeckende Mechanisierung entwickelt nach deren Ansicht auch eine gewisse phytomedizinische Wirksamkeit durch Zurückdrängen unbewirtschafteter Weinbaubrachen und mit Ruderalvegetation bedeckter Flächen. In diesem Zusammenhang vermindert insbesondere die Beseitigung der Wirtspflanzen verschiedener weinbaulich relevanter Schaderreger das Infektionspotenzial für angrenzende Kulturflächen.

5.7 Bewertung der Thesen

Die im Rahmen der Zieldefinition formulierten Thesen wurden unter Berücksichtigung des aktuellen Wissensstands und der experimentellen Ergebnisse wie folgt bewertet:

- I. Den ursprünglichen Erwartungen entsprechend, ließen die wesentlichen Kausalitäten und Kenngrößen aus dem Bereich der landwirtschaftlichen Fahrwerkstechnik und Fahrmechanik einen Transfer auf den weinbaulichen Themenbereich zu. Dabei zeigten insbesondere der Radtraktor und der klassische Zweiraupentraktor einen sehr hohen Übereinstimmungsgrad. Der neuartige Vierraupentraktor nahm eine intermediäre Stellung ein; er vereinte Charakteristika der Rad- und Kettenfahrzeuge. Weder konnte für diesen eine eindeutige Zuordnung zu einem Fahrwerkskonzept vorgenommen werden, noch konnten die im Experiment erhobenen Kenngrößen mit den Literaturangaben vollständig verifiziert werden.
- II. Die durchgeführten Praxisversuche ließen unter Berücksichtigung der individuellen Versuchs- und Standortbedingungen sowie der Fahrzeugkonfigurationen keine allgemeingültigen Vorteile der Kettenfahrzeuge gegenüber dem Radtraktor erkennen. Insbesondere zeigten die ermittelten fahrmechanischen Kennzahlen ein weitgehend vergleichbares Verhalten der Rad- und Raupenfahrzeuge. Teilweise schnitten die Raupenfahrzeuge im Vergleich vorteilhafter ab. Auch im Hinblick auf das günstigere Bodendruckverhalten der Raupenfahrzeuge ist die These zu widerlegen. Beide Bandlaufwerke ließen einerseits eine geringere zeitgewichtete Druckbeanspruchung des Bodens erkennen,

andererseits zeichnete sich eine intensivere Verdichtungswirkung unter Berücksichtigung des Parameters des Bodeneindringwiderstands ab.

- III. Die These einer optimierten Anpassung der Einzelaufwerke des Vierraupentraktors an Gelände und Bodenkontur war zu bestätigen. Gegenüber dem Zweiraupentraktor resultierten hieraus ein kontinuierlicher Bodenkontakt und eine erhöhte Kippstabilität. Insbesondere wurden Nickbewegungen beim Überfahren von Bodenunebenheiten vermindert. Hingegen war die erwartete gleichmäßige Druckbeanspruchung des Bodengefüges ausschließlich für den Fall eines unballastierten Fahrzeugs ohne Anbaugeräte und ohne Bereitstellung einer Zugkraft nachzuweisen. Mit fortschreitender Verzögerung wich die tatsächliche Last- und Druckverteilung des Vierraupentraktors hingegen zunehmend von der idealisierten homogenen Verteilung ab.
- IV. Die umfangreichen Bodendruckmessungen zeigten, dass belastungsabhängig eine Beeinflussung der spezifischen Druckprofile gegeben und auch messtechnisch nachweisbar war. Hingegen konnten die belastungsbedingten Gefügeveränderungen am Versuchsstandort nur bedingt anhand des Penetrationswiderstands gezeigt werden. Überfahrtsinduzierte Gefügeveränderungen gegenüber den Kontrollvarianten konnten stets detektiert werden; hingegen war eine Unterscheidung der einzelnen Verzögerungsstufen nur eingeschränkt möglich. Die eingangs formulierte These konnte im Hinblick auf die belastungsabhängige Variabilität der Bodendruckbeanspruchung bestätigt werden. Die messtechnische Differenzierung von Gefügeveränderungen wurde hingegen nicht im erwarteten Umfang erreicht.
- V. Die These einer nachweislich besonderen Eignung der Bandfahrwerke im Allgemeinen sowie der Vierraupenfahrwerke im Besonderen war aus dem Blickwinkel des angewandten Bodenschutzes nicht abschließend zu bestätigen. Die zukünftige Etablierung der Raupentechnologie auch im Direktzug erfordert technisch-konstruktive Weiterentwicklungen.

5.8 Bodenbeanspruchung und Bodenverdichtung im Weinbau

Im Weinbau werden identische Fahrspuren über viele Jahre hinweg wiederkehrend befahren. Mit dem stetig zunehmenden Mechanisierungsgrad und den damit einhergehenden Fahrzeug- und Anbaugerätemassen nimmt daher auch die Bedeutung der

Thematik Bodenbeanspruchung und -verdichtung zu. Klassisch wird im Weinbau von einer primären Bodenbelastung im Bereich der wiederkehrend befahrenen Fahrspuren berichtet (VOGT und SCHRUF 2000; WALG 2007b, 2007c; ZIEGLER 2012).

BECERRA et al. (2010) zeigten in diesem Zusammenhang durch Untersuchungen in Mandel- und Obstplantagen auch die Auswirkungen von Mehrfachüberfahrten in der identischen Fahrspur. Dabei konnte ein kausaler Zusammenhang zwischen Fahrzeugmasse und Verdichtungsereignissen im Unterboden belegt werden. Als weiteres Problem multipler Überfahrten wird die Ausbildung von Fahrspuren als Folge einer plastischen Bodenverformung diskutiert.

Nach Ansicht des Autors ist das Theorem einer beschränkten Fahrspurverdichtung im Weinbau nicht länger aufrecht zu halten. Vielmehr induzieren maschinelle Bewirtschaftung und Ernte eine vollflächige Bodenverdichtung im Bereich der Rebgassen. Gestützt wird diese Hypothese auf die rechnerisch nachweisbare, vollflächige Druckbelastung des Bodens im Zwischenzeilenbereich durch die Schlepperreifen. Repräsentative Reifendimensionen bewegen sich derzeit im Bereich von 320/85 R24 bis 425/75 R20. Hinzu kommt die inzwischen nahezu regelmäßig anzutreffende Mechanisierung der Traubenernte, welche mit einer fahrgassenmittig lokalisierten Fahrspur des Traubenvollernters mit Dimensionen von 420/65 R24 bis 420/85 R24 einhergeht. Unter Berücksichtigung eines zwingend einzuhaltenden Mindestabstands zur Rebzeile sowie einer zwangsläufig im Rahmen wiederholter Befahrung eintretenden horizontal-oszillierenden Fahrspurwanderung, verbleibt der Unterstockstreifen als einzig unbefahrener Bereich. Eine unter geeigneten klimatischen Bedingungen etablierte ganzflächig oder alternierend ausgebildete Fahrgassenbegrünung verbessert einerseits die Tragfähigkeit und mindert die Bodenerosion, verleitet andererseits jedoch zur Befahrung des Bodens unter ungünstigen, insbesondere wassergesättigten Zuständen. Den Effekt einer tendenziell geringeren Bodenverdichtung in begrünter Rebzeile beschrieben BURG et al. (2012) basierend auf Messungen mit dem Konus-Penetrometer. Diese wiesen auch eine erhebliche Verdichtung im Zwischenfahrsprungbereich nach (Abb. 102).

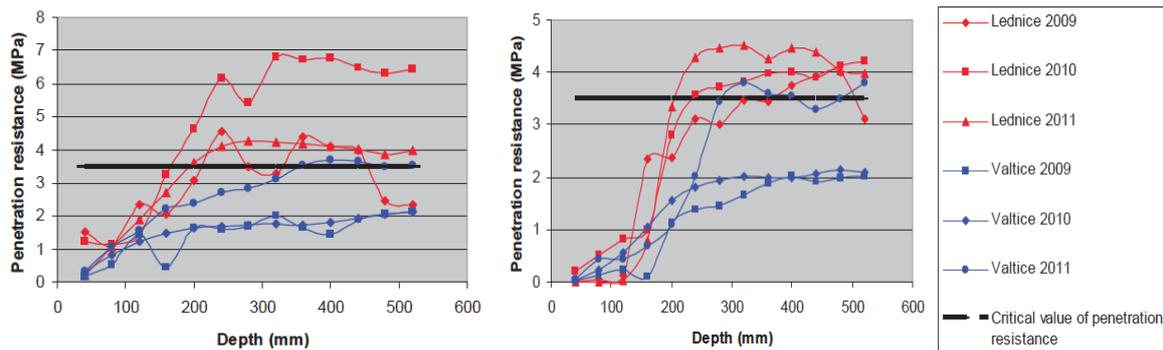


Abb. 102: Penetrometerwiderstand des Bodens im Bereich der Fahrspuren (links) und in der Gassenmitte (rechts) für verschiedene Standorte in den Jahren 2009 bis 2011 (modifiziert nach BURG et al. 2012).

Absolut betrachtet führt im Weinbau die maschinelle Traubenernte zur betragsmäßig höchsten Bodenbelastung. Die im deutschen Weinbau verbreiteten Traubenvollernter erreichen derzeit ausstattungsabhängig Fahrzeugmassen von rd. 8.000 kg bei einer annähernd symmetrischen Masseverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse. Zusätzlich ist die Bunkerkapazität von rd. 2.500 – 2.800 kg Traubenmaische zu berücksichtigen (ERO 2014). Erntebedingte Bodenverdichtungen unterliegen zusätzlich einer klimabedingten Disposition infolge einer veränderten jahreszeitlichen Niederschlagsverteilung bzw. dem Auftreten längerfristiger und ergiebiger Niederschlagsperioden zur Erntezeit. In diesem Kontext sind insbesondere die Jahre 2006, 2007, 2009 sowie 2013 zu nennen (AM RLP 2014). Oftmals wird daher das Befahren aufgeweichter Böden mit entsprechend herabgesetzter Tragfähigkeit erforderlich. Die Folgen sind tiefgehende Gefügeschäden mit plastischen Bodenverformungen und gravierenden Fahrspurausprägungen (Abb. 103).



Abb. 103: Plastische Bodenverformung im Bereich der Schlepperfahrspur (links) und des Traubenvollernters (rechts). Im Randbereich ist eine Aufwölbung infolge seitlich verlagerten Bodenmaterials angedeutet (REDL et al. 2009; WALG 2007c).

Im Rahmen der durchgeführten Versuche zeigte der Radtraktor im Vergleich zu den Kettenfahrzeugen die mit Abstand stärkste Fahrspurbildung. Erwartungsgemäß war die Fahrspur beim leichtesten Versuchsfahrzeug Geier 60 TLY am wenigsten tief ausgeprägt; dieses Fahrzeug verfügte auch über den rechnerisch geringsten Kontaktflächendruck. Die Tiefe der Fahrspurbildung konnte als sichtbarer Indikator für die Intensität der stattgefundenen Bodenverdichtung gewertet werden. Darüber hinaus erhöhen die Fahrspuren, insbesondere in hängigem Gelände und bei falllinienorientierter Bewirtschaftung, die standortbedingte Disposition gegenüber Wassererosionsereignissen (MÜLLER 2009).

Eine aktuelle Marktrecherche unter Berücksichtigung bedeutender Hersteller weinbaulicher Schmalspurtraktoren (Agco Fendt, Same-Deutz-Fahr, Case-New Holland, John Deere) ermittelte ein verfügbares Leistungsspektrum von 44 - 78 kW. Dieses Ergebnis bestätigt die von REBHOLZ (2003) aufgezeigte Zunahme der Schleppernennleistung im Zeitverlauf sowie mit fortschreitender technologischer Entwicklung. Für die aktuellen Traktoren sind Leistungsgewichte von 35 - 63 kg je kW Nennleistung festzustellen. Die hohe Spreizung erklärt sich durch die Art und Weise der vorgenommenen Leistungsdifferenzierung zwischen den einzelnen Modellen. Das Fahrgestell nebst Antriebsstrang ist dabei für die verschiedenen Leistungsstufen weitestgehend identisch, eine Leistungsabstufung erfolgt überwiegend elektronisch oder durch Modifikation des Kraftstoffeinspritz- oder Motoraufladungssystems.

Veröffentlichungen des KTBL (2013) zufolge, kann eine Motorleistung von 30 - 38 kW für die Bewirtschaftung von Standardrebanlagen unter Berücksichtigung einer angepassten Mechanisierung als ausreichend angesehen werden. Lediglich der Antrieb schleppergezogener Traubenvollernter, leistungsfähiger Gebläsetechnik für den Pflanzenschutz oder die überwiegende Arbeit im Grenzhangbereich erfordern eine darüber hinausgehende Motorleistung. Aus der Entwicklung der Motornennleistung (REBHOLZ 2003) und der aktuellen Leistungssegmentierung weinbaulicher Spezialtraktoren lässt sich eine Tendenz zur Übermechanisierung ableiten. Diese resultiert neben ökonomischen Nachteilen in einer Mehrbelastung des Bodens durch eine konstruktionsbedingt höhere Fahrzeugmasse. In diesem Zusammenhang besteht erhöhter Beratungs- und Kommunikationsbedarf zwischen der landwirtschaftlichen Officialberatung und den verantwortlichen Betriebsleitern.

Als problematisch im Weinbau gilt auch die langfristige Kumulation einer Vielzahl von Überfahrten während der regelmäßigen Kulturdauer einer Rebanlage. SCHREIBER (2009) führt für die Flächenlandwirtschaft eine bewirtschaftungsabhängige Häufigkeit von bis zu 26 jährlichen Überfahrten im Bereich des Hackfruchtanbaus an. In Verbindung mit geläufigen Beanspruchungsintensitäten landwirtschaftlicher Radtraktoren in einer Größenordnung von 100 - 150 kPa in einer Bodentiefe von 0,2 m (OLF 1993; WEIßBACH 1994; GEISCHEDER 2011) resultiert hieraus ein Belastungsprodukt von 3.600 [Überfahrten·kPa]. Im Rahmen der konventionellen Bodenbewirtschaftung schließt sich der Ernte eine lockernde Bodenbearbeitung an. Im Weinbau beträgt das Belastungsprodukt bei angenommen 350 Überfahrten und 80 kPa mittlerer Druckbeanspruchung hingegen rd. 28.000 [Überfahrten·kPa] bis zur turnusgemäßen Tiefenlockerung des Standorts im Rahmen einer Neubepflanzung. Die besondere Bedeutung des Schadverdichtungskomplexes im Weinbau wird somit offensichtlich. Die Ausprägung standortspezifischer und ertragsrelevanter Symptome unterliegt einer maßgeblichen Beeinflussung durch die spezifische Bodentragfähigkeit sowie einer standortangepassten Bewirtschaftung unter Berücksichtigung bekannter bodenkundlicher Zusammenhänge.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Dem Komplex der anthropogenen Bodenverdichtung, ausgelöst durch technogene Belastungsereignisse, kommt im weinbaulichen Kontext eine wachsende Bedeutung zu. Der zunächst schleichend und verdeckt ablaufende Prozess führt bei anhaltender Überschreitung der bodenbürtigen Tragfähigkeit zu einer Beeinträchtigung der Bodenfunktionen und zu ökonomisch relevanten Ertragsdepressionen (SOANE und VAN OUWERKERK 1994; KELLER et al. 2002; LIPIEC und HATANO 2003; KRÜMMELBEIN et al. 2008). Induzierte Veränderungen sind i. d. R. langfristiger Natur und lassen Auswirkungen über mehrere Dekaden erwarten (HORN et al. 2009). Zur Sensibilisierung gegenüber dem hohen Schadenspotenzial, welchem der weinbaulich genutzte Boden regelmäßig ausgesetzt ist, hat die DEUTSCHE BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT (2014) den Weinbergsboden zum Boden des Jahres erklärt. Damit wird einerseits dessen Gefährdung durch Bodenverdichtung und Bodenerosion betont sowie andererseits auf die hohe biologische Wertigkeit im Hinblick auf die Biodiversität des Ökosystems Weinberg hingewiesen.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgenommene Gegenüberstellung verschiedener Weinbautraktoren erlaubte eine Bewertung der fahrwerksspezifischen Effekte auf das Bodengefüge im Weinberg. Die Bewertung stützt sich exemplarisch auf Kriterien, welche nach Literaturangaben und Vorversuchen als geeignete Indikatoren ausgewählt wurden. Im Hinblick auf die durchgeführte Überprüfung der Standardparameter wurden im Wesentlichen die aus der landtechnischen Grundlagenliteratur bekannten Größen bestätigt. Die Vierraupentechnologie ist im Weinbaubereich nach wie vor als Novum anzusehen; bislang beschränkt sich deren Einsatz auf wenige Maschinen oder auf den praxisorientierten Versuchsbetrieb. Als Ergebnis der durchgeführten systematischen Untersuchungen zeigen die Vierraupenfahrzeuge unter den gegebenen Versuchsbedingungen ein intermediäres Verhalten zwischen klassischen Rad- und Kettenfahrzeugen.

Die Bodendruckprofile der Fahrzeuge ließen erhebliche Unterschiede der überfahrtsbedingten Druckbeanspruchung des Bodengefüges erkennen. Diese waren teils auf fahrwerksspezifische Besonderheiten zurückzuführen, teils waren sie Folge divergierender Fahrzeugmassen. Konstruktionsbedingt rief der Radtraktor nur kurze, impulsartige Druckbeanspruchungen hervor, demgegenüber verursachten die Kettenfahr-

zeuge eine deutlich länger andauernde Phase der Beanspruchung. Insbesondere für die Kettenfahrzeuge war nachweisbar, dass äußere Zugkräfte durch laufwerksinterne Verlagerungseffekte eine lokal begrenzte, allerdings signifikant höhere Druckbeanspruchung des Bodens zur Folge hatten. Die Zone der höchsten wirksamen Bodendrücke beschränkte sich jedoch überwiegend auf den Oberboden; die Druckspitzen unterlagen einem schnellen Abbau mit zunehmender Bodentiefe. Der GMP als Synthese der relevanten Parameter Einwirkungsdauer und Druckintensität ließ eine verminderte Gesamtbodenbeanspruchung durch die Bandfahrwerke erkennen, zeigte jedoch auch die vorhandenen Kompensationspotenziale der Radfahrwerke bei zunehmender Fahrwerkslast.

Sämtliche Fahrwerksvarianten offenbarten ein über weite Bereiche vergleichbares Verdichtungsverhalten unter Bezugnahme auf den ausgewählten Parameter des Bodeneindringwiderstands. Wenngleich sich aufgrund der Datenlage für den Vierraupentruktor eine tendenziell höhere Bodenverdichtung abzeichnete und diese in Einzelfällen signifikant war, konnte hieraus im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine praxisrelevante Bedeutung abgeleitet werden. Gleichwohl bestätigte die Beobachtung jedoch den bekannten Sachverhalt einer regelmäßig höher als erwartet ausfallenden Verdichtungswirkung der Bandlaufwerke.

Die Synthese der dargelegten Teilergebnisse führte zu der Erkenntnis, dass konstruktionsbedingte und ursprünglich angenommene Vorzüge der Bandlaufwerke bezüglich eines optimierten Bodenschutzes nicht aufrecht erhalten und im Rahmen der Untersuchungen nicht nachgewiesen werden können. Allenfalls konnten diese vor dem Hintergrund einer geringeren Fahrspurinduktion und der damit einhergehenden Minderung des Erosionspotenzials sowie im Einzelfall anhand fahrmechanischer Kenngrößen als vorteilhafter klassifiziert werden.

Vielmehr lässt sich zusammenfassend festzustellen, dass die etablierten Radfahrwerke bereits ein beachtliches Maß an Bodenschonung erreichen. Dies gilt umso mehr, wenn für den jeweiligen Einsatz und Standort geeignete Reifen und Reifendrücke gewählt werden. Insbesondere die verfügbaren, aber in der Praxis erst wenig eingesetzten Reifendruckregelanlagen lassen ein erhebliches Potenzial zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Kontaktflächendruckverteilung und Verbesse-

rung fahrmechanischer Parameter vermuten. Unter dem Gesichtspunkt eines maximierten Bodenschutzes sollte dieses Konzept weiter verfolgt werden.

Den Kettenfahrzeugen ist davon unabhängig ein besonderes Potenzial für die zeitgemäße Erschließung und Bewirtschaftung der Weinbausteillagen zu bestätigen. Besondere Vorzüge einer Adaption dieser Technik in den Bereich des direktzugfähigen Weinbaus sind aktuell jedoch nicht erkennbar. Gegebenenfalls bedarf die Adaption der neuartigen Bandlaufwerke zur Weiterentwicklung und Abstützung der verhältnismäßig hohen Fahrzeugmassen der Erntefahrzeuge einer weitergehenden Prüfung.

Über die Betrachtung der fahrwerksspezifischen Einflüsse und Unterschiede hinaus, liefert die Analyse und Optimierung der gesamtbetrieblichen Mechanisierungsstrategie einen bedeutsamen Ansatzpunkt für eine bodenschonende Wirtschaftsweise. Neben einer standortangepassten Bodenbewirtschaftung unter Berücksichtigung bodenbürtiger und klimatischer Rahmenbedingungen ist insbesondere die Reduktion technogener Bodenbelastungen auf ein niedrigstmögliches Niveau sicherzustellen. Als bedeutendste Einflussgrößen sind hierbei sowohl die Anzahl der Überfahrten als auch die spezifische Fahrzeuggesamtmasse zu nennen, wobei insbesondere die Absenkung der Fahrzeuggesamtmasse eine positive Minderung der Verdichtungsneigung des Unterbodens und der Beeinträchtigung der Bodenfunktionen erwarten lässt (ETANA und HÅKANSSON 1994; HÅKANSSON und Reeder 1994; SHAFIQ et al. 1994).

Die vorliegende Arbeit ist ein erster Schritt zu einer Detailanalyse typischer Fahrwerkstechnologien im weinbaulichen Bereich. Prinzipiell lassen die Ergebnisse eine Übertragung des Fahrwerkverhaltens und zugrundeliegender Gesetzmäßigkeiten auf andere Standorte zu. Unter Berücksichtigung bodenbürtiger Einflüsse und Wechselwirkungen sind die Ergebnisse allerdings gewissen Unsicherheiten im Hinblick auf deren absolute Ausprägung unterworfen. Im weinbaulichen Zusammenhang ist insbesondere ein Transfer der vorgenommenen Untersuchungen auf bindige und somit grundsätzlich stärker verdichtungssensitive Böden wünschenswert. Losgelöst von einer Berücksichtigung weiterer Bodenarten wäre ebenfalls der Einfluss verschiedener Bodenpflegesysteme auf die Disposition des Bodens gegenüber Verdichtungsergebnissen zu prüfen. Der Transfer berücksichtigt dabei gleichermaßen die evaluierten fahrmechanischen Grundlagen, Messungen des Bodendruckverhaltens sowie der

fahrwerksspezifischen Verdichtungsintensität. In diesem Kontext sind insbesondere die aufgezeigten Besonderheiten und lastabhängige Verlagerungsprozesse des Vier- raupentraktors aufzugreifen und an weiteren Standorten zu überprüfen.

Als physiologisch relevanter Parameter deutet auch das fahrzeugspezifische Schwingungsverhalten auf weitergehenden Forschungsbedarf hin. Zwar berichten Platzer und Lind (2011) von einem äußerst ruhigen Fahrverhalten des von ihnen untersuchten Carraro Mach 4, im Rahmen der Versuchsdurchführung konnten jedoch auch energiereiche Impulse und Stöße beim Überfahren von Hindernissen und Bodenunebenheiten dokumentiert werden. Auch berichteten diverse Autoren von einer teils erheblichen Schwingungsbelastung des Fahrers durch Band- und Kettenlaufwerke (FUKUSHIMA et al. 2006; LIU et al. 2006; RABBANI et al. 2011).

7 Zusammenfassung

Der weinbaulich genutzte Boden unterliegt als Produktionsfaktor einer intensiven Nutzung. Dabei fördert eine hohe Mechanisierungsintensität die Entstehung von Verdichtungszone in den unterschiedlichen Bodenhorizonten. Begünstigt wird der Prozess der Bodenverdichtung durch eine wiederholte Überlastung des Bodengefüges infolge hoher Fahrzeug- und Gerätemassen, verminderter Bodentragfähigkeit oder der hohen kumulativen Anzahl der Überfahrten während der regelmäßigen Standzeit eines Weinbergs. Standortspezifisch erwächst aus dem zunächst schleichend fortschreitenden Verdichtungsprozess eine nachhaltige Beeinträchtigung der quantitativen und qualitativen Ertragsparameter. Die derzeitigen Produktionsverfahren bieten nur begrenzte Möglichkeiten einer Verminderung der Mechanisierungsintensität und damit der Verringerung der bewirtschaftungsbedingten Überfahrten in der Rebzeile. Hingegen offenbart die Landtechnik Ansätze bodenschonender Fahrzeugtechnik, welche die Beanspruchung des Bodens durch eine Verminderung der spezifischen Belastung in der Kontaktfläche Fahrwerk-Boden herabsetzt. In diesem Zusammenhang sind insbesondere neuartige Vierraupentraktoren in Schmalspurbauweise anzuführen, deren Ursprung in der allgemeinen Flächenlandwirtschaft liegt.

Den Kern der vorliegenden Arbeit bildete eine vergleichende Untersuchung der fahrzeugverursachten Bodenbeanspruchung und Verdichtungswirkung, wobei die neuartigen Vierraupentraktoren eine besondere Berücksichtigung und Konzeptbewertung erfahren. Als Vergleichsfahrzeuge dienten exemplarisch ausgewählte Rad- und Zweiraupenfahrzeuge. Als Kriterien zur Bewertung der verschiedenen Fahrwerksvarianten wurden die Bodendruckspannung in verschiedenen Tiefen sowie die überfahrtsinduzierte Veränderung des Bodeneindringwiderstands herangezogen. Darüber hinaus wurden spezifische Kenngrößen der Weinbautraktoren anhand der landtechnischen Grundlagenliteratur evaluiert. Methodisch wurde auf die etablierten Verfahren der Bodendruckmessung unter Verwendung hydraulischer Schlauchdrucksonden zurückgegriffen. Ebenso erfolgten grundlegende Experimente zur Evaluation des Antriebsschlupfverhaltens, der Rollwiderstands- und Triebkraftkoeffizienten sowie fahrwerksspezifischer Wirkungsgrade. Besonders hervorzuheben ist die Erweiterung der klassischen Bodendruckmessung um den Parameter einer *in situ* variierten, äußeren Zugkraftbelastung der Versuchsfahrzeuge. Auf diesem Weg konnten - über den

ansonsten statischen Ansatz hinaus - auch belastungsinduzierte Veränderungen des fahrzeugspezifischen Bodendruckverhaltens abgebildet werden. Die Versuchsdurchführung erfolgte auf einem homogenen Standort, welcher die wiederholte Durchführung standardisierter Versuche ermöglichte.

Die Ergebnisse bestätigten die erwarteten Vorzüge der Raupen- und Bandfahrwerke nicht uneingeschränkt. Die Bodendruckmessungen zeigten eine heterogene Druckverteilung in der Kontaktfläche der Bandfahrwerke, welche deutlich von einer idealen Verteilung abwich. Unter einzelnen Laufwerksrollen konnten Zonen höchster Bodendrucke nachgewiesen werden. Dabei korrelierte die Höhe der Druckbeanspruchung des Bodengefüges mit der Intensität der äußeren Zugkrafteinwirkung. Unter Berücksichtigung des temporalen Aspektes zeigten die Bandfahrwerke hingegen eine tendenziell verminderte zeitgewichtete Gesamtdruckbeanspruchung. Für beide Bandfahrwerke wurde allerdings eine höhere Verdichtungsintensität anhand des gemessenen Bodeneindringwiderstands nachgewiesen, wenngleich die Messwerte nur in Einzelfällen signifikant waren. Aus der Grundlagenliteratur bekannte Zusammenhänge und Kausalitäten waren darüber hinaus weitestgehend auf die Fahrwerke der Weinbautraktoren übertragbar. Dabei zeigten die Bandfahrwerke ein vorteilhaftes Schlupf- und Triebkraftverhalten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Raupentraktoren im Hinblick auf die Mechanisierung von Weinbausteillagen im Grenzhangbereich konstruktive Vorteile besitzen. Eine Ausweitung des Einsatzes von Raupen- und Bandfahrwerken in der Ebene, mit dem Ziel einer verbesserten Bodenschonung, ist hingegen derzeit nicht erkennbar. Vielmehr zeigen Radtraktoren im Falle einer angepassten Bereifung und bei Berücksichtigung standortspezifischer Rahmenbedingungen durchaus ein beachtliches Maß an Bodenschonung.

8 Summary

Agricultural soils used for growing grape vines are distinguished by an intensive land use. Especially a high intensity of agricultural mechanization benefits soil compaction in different horizons. Soil compaction can be considered as a result of repeated overloading of the specific soil bearing capacity. Especially high vehicle weights and high numbers of repeated passes in the same rut promote the formation of compaction zones during the regular physical life of the vineyard. Usually negative impacts regarding yield quality and quantity develop slowly and vary site-specifically. Possibilities of decreasing the number of passes within the row and reducing the intensity of mechanization are limited by current design of production processes in viticulture. In contrast, agricultural engineering shows potential of preventing soil degradation by reducing the specific soil stress in the contact area of tire or track, especially new narrow tracked tractors with centre pivot steering with origin in general agriculture.

The main aim of the carried out study was to compare the vehicle induced soil stress and compaction. Objects of investigation were typical narrow tractors used in German and Central European viticulture. The tractors were equipped with tires and tracks. The following classification criteria were defined: vertical soil stress measured in varying depths and vehicle induced change of penetrometer resistance. Common parameters like rolling resistance, traction ratio, slip and efficiency were additionally tested and compared with indications published in basic literature of agricultural engineering. Soil stress was measured with hydraulic pressure sensors. In case of characterization of driving mechanics the different tractors were towed and decelerated under varying conditions. Furthermore, the static process of measuring soil stress was enhanced by considering a defined external drawbar pull, varied *in situ* while passing the measuring point. The chosen study design allowed the mapping of changes in soil stress distribution and quantitative analysis of vehicle induced stress in different situations. All experiments were carried out at a homogenous test-site, which guaranteed the possibility of repeated measures.

The results of the experiments did not confirm expected advantages of the tracked vehicles compared to wheeled tractors. Soil stress measurement showed a heterogeneous pressure distribution in the contact area of the tracked vehicles. Highest stress levels were proved beneath single rollers of the tracked vehicles. The amount

of measured stress correlated with intensity of the induced external drawbar pull. However, time-weighted soil stress was lower for the tracked vehicles than for the wheeled tractor. In contrast, the passages of both tracked vehicles resulted in higher penetrometer soil resistances in the vehicle's ruts than the corresponding passages of the wheeled tractor. Nevertheless only for isolated observations a significant difference could be confirmed. Published parameters regarding the driving mechanics allowed a transfer to narrow tractors used in viticulture. The tested tracked vehicles showed a better slip and tractive performance.

All in all, tracked vehicles exhibit a wide-ranging applicability in the context of mechanical development of steep slope vineyards. A further temporary increasing use of tracked tractors in plain viticulture areas is actually not visible. In fact, wheeled standard tractors already offer a considerable level of soil protection, especially if soil specific properties and technical solutions (f. e. systems to adapt tire pressure) are considered.

9 Literaturverzeichnis

- AG BODEN (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). Stuttgart: Schweizerbart.
- AM RLP (2013): Klimadaten des agrarmeteorologischen Messnetzes Rheinland-Pfalz. Station Gau-Algesheim. Onlineressource: <http://www.dlr-rnh.rlp.de/>. Abgerufen am 07.11.2013.
- AM RLP (2014): Klimadaten des agrarmeteorologischen Messnetzes Rheinland-Pfalz. Station Gau-Algesheim. Onlineressource: <http://www.dlr-rnh.rlp.de/>. Abgerufen am 14.03.2014.
- ANSORGE, D.; GODWIN, R.J. (2007): The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction: part 1: Single axle-studies. *Biosystems Engineering*, 98, 115-126.
- ANSORGE, D.; GODWIN R.J. (2008): The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction: part 2: Multi-axle machine studies. *Biosystems Engineering*, 99, 338-347.
- ANSORGE, D.; GODWIN, R.J. (2009): The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction: part 3: Comparison of virgin compression line approaches. *Biosystems Engineering*, 104, 278-287.
- ARVIDSSON, J.; HÅKANSSON, I. (2014): Response of different crops to soil compaction - Short-term effects in Swedish field experiments. *Soil & Tillage Research*, 138, 56-63.
- ARVIDSSON, J.; KELLER, T. (2007): Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. *Soil & Tillage Research*, 96, 1/2, 284-291.
- ARVIDSSON, J.; TRAUTNER, A.; KELLER, T. (2002): Influence of tyre inflation pressure on stress and displacement in the subsoil. *Advances in Geocology*, 35, 331-338.
- ARVIDSSON, J.; WESTLIN, H.; KELLER, T.; GILBERTSSON, M. (2011): Rubber track systems for conventional tractors – Effects on soil compaction and traction. *Soil & Tillage Research*, 117, 103-109.
- ASAE S 313.1 (1983): Soil cone penetrometer. ASAE Standard: ASAE S 313. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Yearbook of Standard. St. Joseph, Michigan.
- BALDAUF, G. (2012): Bericht über die Schäden an den Gummibändern eines Vierraupentraktors im Weinbau nach zweijährigem Einsatz. Pers. Mitteilung vom 4. August 2012.

- BARLEY, K.P.; GREACEN, E.L. (1967): Mechanical resistance as a soil factor influencing the growth of roots and underground shoots. *Advances in Agronomy*, 19, 1-40.
- BBODSCHG (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG). BGBl. I, S. 502, zuletzt geändert durch Art. 5 Abs. 30 G v. 24.2.2012, BGBl. I, S. 212.
- BBODSCHV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). BGBl. I, S. 1554, zuletzt geändert durch Art. 5 Abs. 31 G v. 24.2.2012, BGBl. I, S. 212.
- BECERRA, A.T.; BOTTA, G.F.; LASTRA BRAVO, X.; TOURN, M.; BELLORA MELCON, F.; VAZQUEZ, J.; RIVERO, D.; LINARES, P.; NARDON, G. (2010): Soil compaction distribution under tractor traffic in almond (*Prunus amygdalus* L.) orchard in Almeria Espana. *Soil & Tillage Research*, 107, 49-56; 73,145-160.
- BECHER, H. (2004): Ist der Konzentrationsfaktor ν_k eines aggregierten Bodens als steuernde Größe in der mechanischen Druckverteilung in Böden eine Konstante? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 167, 525-531.
- BEKKER, M. G. (1969): Introduction to terrain-vehicle-systems. University of Michigan: Ann Arbor.
- BERGTRAC (2014): Werkspublikation zum Bergtrac Geräteträger. Onlineresource: <http://www.bergtrac.ch/30911/index.html>. Abgerufen am 17.02.2014.
- BETTEN, J. (1986): Elastizitäts- und Plastizitätslehre. 2. Auflage. Braunschweig u. Wiesbaden: Vieweg u. Teubner Verlag.
- BfN (2012): Landschaftssteckbrief Nr. 23701, Mainz-Ingelheimer Rheinebene. Bonn: Bundesamt für Naturschutz.
- BLUME, H.-P. (2005): Handbuch des Bodenschutzes: Bodenökologie und Bodenbelastung. Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 3. Auflage. Landsberg/Lech: Verlag ecomed.
- BLUMENTHAL, R. (1985): Technisches Handbuch Traktoren. 8. durchgesehene Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik.
- BÖHME, A. (2003): Umweltgerechte Technik für den Steillagenweinbau (Dissertation). Gießen: Justus-Liebig-Universität. KTBL-Sonderveröffentlichung Nr. 44. Darmstadt.
- BOLLING, I. (1984): Bodenverdichtung und Bereifung bei landwirtschaftlichen Fahrzeugen. *Landtechnik*, 39, 10, 449-451.

- BOLLING, I. (1986): Beanspruchung des Bodens beim Schlepper- und Maschineneinsatz. In: KTBL-Schrift 308 Bodenverdichtungen beim Schlepper- und Maschineneinsatz und Möglichkeiten zu ihrer Verminderung, 51-58. Münster-Hiltrup (Westfalen): KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag.
- BOLLING, I. (1987): Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen – Neue Mess- und Rechenmethoden (Dissertation). München: Technische Universität.
- BOLLING, I.; SÖHNE, W. (1982): Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge, Landtechnik, 37, 2, 54-57.
- BOTTA, G.F.; TOLON-BECERRA, A.; BELLORA-TOURN, F. (2009): Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. Soil & Tillage Research, 103, 381-386.
- BÖTTINGER, S.; BRACKE, P.; FRANK, K. (2011): Untersuchungen an Ackerschleppern. Vorlesungsskript Grundlagen der Agrartechnik. Hohenheim: Universität Hohenheim.
- BOUSSINESQ, J. (1885): Application des potentials à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides elastiques. Paris: Gauthier-Villais.
- BRANDHUBER, R. (2006): Bodenbelastung durch Landmaschinen - Wirkungsmechanismen und Risikobeurteilung. Tagungsband. Landtechnische Jahrestagung Degendorf am 23.11.2006, 53-74.
- BRANDHUBER, R.; DEMMEL, M.; KOCH, H.-J.; BRUNOTTE, J. (2008): Bodenschonender Einsatz von Landmaschinen: Empfehlungen für die Praxis. DLG Merkblatt 344. Frankfurt: Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft.
- BREDBERG, C.-J.; WÄSTERLUND, I. (1983): Wurzel- und Bodenschäden durch Fahrzeuge. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 102, 86-98.
- BREG (2012): Nationale Nachhaltigkeitsstrategie, Fortschrittsbericht 2012. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg). Berlin.
- BREUER, S.; KOPP, S. (2012): Fahrmechanik. In: BREUER, S. (Hrsg.): Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen, Systeme, Komponenten. Reihe ATZ MTZ Fachbuch, 6. überarb. Auflage. Braunschweig u. Wiesbaden: Vieweg u. Teubner Verlag.
- BRUNNER, D.; KEICHER, R.; SCHWARZ, H.-P. (2011): Geisi: selbstfahrendes Transport- und Antriebsfahrzeug zur Unterstützung von Arbeiten in Weinbausteillagen, ATW-Jahresbericht 2011, 19-20.
- BRUNOTTE, J.; DEMMEL, M.; FRÖBA, N.; UPPENKAMP, N.; WEIßBACH, M. (2011): Bodenschonen und Kosten senken. KTBL-Schrift 89. Münster-Hiltrup (Westfalen): KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag.

- BRÜMMER, G.W. (2001): Einführung: Schadverdichtung in Ackerböden – Entstehung, Folgen, Gegenmaßnahmen. In: Schadverdichtung in Ackerböden – Entstehung, Folgen, Gegenmaßnahmen. Tagungsband 14. Fachtagung der Landwirtschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, 71-74.
- BUCHTER, B.; HÄUSLER, S. (2009): Arbeitshilfe der Bodenschutzfachstellen der Kantone AG, AI, AR, BE, BL, BS, FR, GE, GR, JU, LU, NE, NW, OW, SG, SH, SO, SZ, TG, TI, VD und ZG sowie des Fürstentums Liechtenstein. Kantonale Bodenschutzfachstellen (Hrsg.). Zürich u. Bern.
- BURG, P.; ZEMÁNEK, P.; TURAN, J.; FINDURA, P. (2012): The penetration resistance as a soil degradation indicator in the viticulture. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, LX, 8, 29-36.
- BURGER, N.; LEBERT, M.; HORN, R. (1988): Prediction of the compressibility of arable land. In: Drescher, J.; Horn, R.; De Boodt, M. (Hrsg.): Impact of water and an external force on soil structure. *Catena Supplement*, 11, 141-151.
- BØRRESEN, T. (2011): Heavy agricultural machinery damages the soil. Onlineresource: http://www.forskningsradet.no/prognetmatprogrammet/-Nyheter/Heavy_agricultural_machinery_damages_the_soil/1253966195787?lang=en. Abgerufen am 02.01.2014.
- CANNELLE, J.-L. (2002): Une chance à saisir, le cheval vigneron. *Attelages magazine, Hors-Série*, 2, 76-77.
- CARRARO (2012): Gebrauchs- und Wartungsanleitung des Vierraupentraktors Carraro Mach 4. Ausgabe Mai 2011. Cod. 47302431.
- CASAGRANDE, A. (1936): The determination of preconsolidation load and its practical significance. In: MARR, W.R. (Hrsg.), *Geotechnical Special Publications*, Nr. 118, A History of Progress: Selected U.S. Papers in Geotechnical Engineering, Vol. 1. Massachusetts: ASCE.
- CASE IH (2013): Werkspublikationen der Fa. Case IH Agriculture. Broschüre Steiger & Quadtrac.
- CERRUTI, V. (1888): Sulla deformazione di un corpo elastico isotropo per alcune speciali condizioni ai limiti. *Mathematica Acc. r. de'Lincei*. Rom.
- CLAAS (2014): Werkspublikation der Fa. Claas Deutschland. Broschüre LEXION 780-740, Terra-Trac-Laufwerk/Raupenlaufwerk.
- COCKROFT, B.; BARLEY K.P.; GREACEN, E.L. (1969): The penetration of clays by fine probes and root tips. *Australian Journal of Soil Research*, 7, 333-348.
- COOPER, A.W.; VANDEN BERG, G.E.; MCCOLLY H.F. (1957): Strain gage cell measures soil pressure. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 38, 2, 232-235.

- CZERATZKI, W. (1972): Die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand. *Landbauforschung Vökenrode - vTI Agriculture and Forestry Research*, 22, 1, 29-36.
- DACHROTH, W.R. (2002): *Handbuch der Baugeologie und Geotechnik*, 3. erw. u. überarb. Aufl. Berlin u. Heidelberg: Springer Verlag.
- DANNOWSKI, M. (1994): Einfluss differenzierter mechanischer Belastungen auf Bodengefügeeigenschaften, Durchwurzelbarkeit und Pflanzenertrag eines sandigen Moränenstandortes (Dissertation). Berlin: Humboldt-Universität. *Bodenökologie und Pedogenese*, Heft 13.
- DEGEN, W. (1994): Sekundärsetzung in reinen Tonen. *Schriften des Institutes für Geotechnik*, Bd. 206. Zürich.
- DEGRELL, O. (2006): Ackerschlepperreifen. DLG-Prüfbericht 5600F. Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (Hrsg.). Groß-Umstadt.
- DEMMELE, M.; BRANDHUBER, R.; KIRCHMEIER, H.; MÜLLER, M.; MARX, M. (2012): Das Regelfahrspurverfahren – technische und organisatorische Realisierung. *Landtechnik*, 67, 6, 435-440.
- DERDACK, W. (1989): Traktor für die Landwirtschaft mit Gummigleisbandfahrwerk. *Agrartechnik*, 8.
- DEUTSCHE BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT (2014): Steckbrief Boden des Jahres 2014. Weinbergsböden. Kuratorium Boden des Jahres. Krefeld.
- DEXTER, A. R. (1988): *Advances in Characterization of Soil Structure*. *Soil & Tillage Research*, 11, 199-238.
- DIETRICH, J. (1995): Untersuchungen über neue Mechanisierungsalternativen und Entwicklung eines Produktionsplanungsmodells für Weinbaubetrieb mit Steillagen (Dissertation). Gießen: Justus-Liebig-Universität. *KTBL-Schrift* 366. Darmstadt.
- DIN 18121-1 (1998): Untersuchung von Bodenproben – Wassergehalt – Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 18125-1 (2010): Baugrund. Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte des Bodens – Teil 1: Laborversuche. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 18135 (2012): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Eindimensionaler Kompressionsversuch. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 18137-1 (2010): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 1: Begriffe und grundsätzliche Versuchsbedingungen. Berlin: Beuth Verlag.

- DIN 19682-10 (2007): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Felduntersuchungen - Teil 10: Beschreibung und Beurteilung des Bodengefüges. Berlin: Beuth Verlag.
- DISERENS, E. (2002): Ermittlung der Reifen-Kontaktfläche im Feld mittels Rechenmodell. FAT Berichte, Nr. 582. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (Hrsg.). Reckenholz-Tänikon.
- DISERENS, E. (2010): Tyres/Tracks And Soil Compaction (TASC 2.0). PC-Anwendung zur Prävention von Schadverdichtungen in der Praxis. Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART).
- DISERENS, E.; SPIESS, E. (2005): TASC - Eine PC Anwendung zur Vorbeugung von Schadverdichtungen. AGRARForschung 12, 1, 22-27.
- DÖLL, H. (1998): Bewertung von Landwirtschaftsreifen nach agrotechnischen, ökologischen und technisch-energetischen Kriterien. Forsttechnische Informationen, 3, 36-38.
- DÖRFLER, G. (1995): Untersuchungen der Fahrwerk-Boden-Interaktion zur Gestaltung von Raupenfahrzeugen für die Befahrung weicher Tiefseeböden (Dissertation). Karlsruhe: Universität Fridericiana. Forschungsbericht des Institutes für Maschinenwesen im Baubetrieb, Reihe F, Heft 43.
- DRY, P.R.; BOTTING, D.G.; LOVEYS, B.R.; JOHNSTONE, A. (1995): Root pruning as a potential method for vigour control: some preliminary results. The Australian Grapegrower and Winemaker Annual Technical Issue, 378a, 15-16.
- DRY, P.R.; LOVEYS, B.; JOHNSTONE, A.; SADDLER, L. (1998): Grapevine response to root pruning. The Australian Grapegrower and Winemaker Annual Technical Issue, 414a, 73-78.
- DUTTMANN, R.; SCHWANENBECK, M.; NOLDE, M.; HORN, R. (2014): Predicting Soil Compaction Risks Related to Field Traffic during Silage Maize Harvest. Soil Science Society of America Journal, 78, 2, 408-421.
- EASTHAM, J.; CASS, A.; GRAY, S.; HANSEN, D. (1996): Influence of raised beds, ground cover and irrigation on growth and survival of young grapevines. Acta Horticulturae, 427, 37-43.
- EBEL, A. (2006): Druckverteilung auf Kontaktflächen unter Forstreifen (Dissertation). Göttingen: Georg-August-Universität. Onlineressource: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl/?webdoc-674>. Abgerufen am 10.01.2013.
- EHLERS, W. (1983): Auswirkungen der Bodenbelastung mit schwerem Gerät und der Bodenbearbeitung auf das Bodengefüge und das Pflanzenwachstum. Kali-Briefe, 16, 9, 499-516.

- EHLERS, W. (1992): Bodenverdichtung senkt Rübenertrag – Überlegungen zur Schadverdichtung am Beispiel diluvialer Standorte in Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern. Zuckerrübe (Fachzeitschrift), 41, 5, 268-274.
- EHLERS, W. (1996): Wasser in Boden und Pflanze. Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag. Stuttgart: Ulmer-Verlag.
- EICHHORN, H. (1999) (Hrsg.): Landtechnik. Landwirtschaftliches Lehrbuch. 7. vollst. neu bearb. Auflage. Stuttgart: Ulmer Verlag.
- EIJKELKAMP (2011): Penetrologger. Operating Instructions. Hardware Ver. 6.0, Software Ver. 6.03, PenetroViewer Ver. 6.08. Eijkelkamp Agrisearch Equipment. Giesbeek.
- EMDE, K. (2004): Die potenzielle Erosionsgefährdung in den hessischen Weinbaugebieten. In: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.). Die Standortkartierung der hessischen Weinbaugebiete. 2. neu bearb. Auflage. Geologische Abhandlungen Hessen, Bd. 114, 93-101. Wiesbaden.
- ERDAS, O. (1976): Bodenmechanische Probleme der Befahrbarkeit, der Bodentragfähigkeit und des Holzrückens in natürlichen Böden des schweizerischen Mittelandes (Dissertation). Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule.
- ERO (2014): Herstellerinformationen zum Ero-Grapeliner SF-200. Onlineressource: <http://www.ero-geraetebau.de/Produkte/ERO-Traubenvollernter/ERO-Grapeliner-SF200/Ausstattung/index.html>. Abgerufen am 10.03.2014.
- ETANA, A.; HÅKANSSON, I. (1994): Swedish experiments on the persistence of subsoil compaction caused by vehicles weight high axle load. Soil & Tillage Research, 29, 167-172.
- FAZEKAS, O. (2005): Bedeutung von Bodenstruktur und Wasserspannung als stabilisierende Kenngrößen gegen intensive mechanische Belastung in einer Parabraunerde aus Löss unter Pflug- und Mulchsaat (Dissertation). Kiel: Christian-Albrechts-Universität. Onlineressource: <http://d-nb.info/978443284/34>. Abgerufen am 7.11.2013.
- FAZEKAS, O.; HORN, R. (2005): Zusammenhang zwischen hydraulischer und mechanischer Bodenstabilität in Abhängigkeit von der Belastungsdauer. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 168, 60-67.
- FENDT (2012): Fendt-Spezialtraktoren. Werksbroschüre. AGCO GmbH. Marktobendorf.
- FENNER, S. (1997): Langjährige Verdichtungswirkung durch unterschiedliche Achslasten auf einem Löss-Ackerstandort. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 160, 157-164.
- FERREE, D.C.; STREETER, J.G. (2004): Response of container-grown grapevines to soil compaction. HortScience, 39, 1250-1254.

- FEUERSTEIN, T. (2005): Schmalspurschlepper Fendt 208 V mit Vorderachsfederung. DLG-Prüfbericht 5538F. Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (Hrsg.). Groß-Umstadt.
- FIEDLER, H. J. (2001): Böden und Bodenfunktionen in Ökosystemen, Landschaften und Ballungsgebieten. Renningen: Expert Verlag.
- FISCHER, C. (2010): Weiterentwicklung des Steillagen-Vollernters für den Einsatz als Pflanzenschutzgerät und Geräteträger in Weinbausteillagen. In: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (Hrsg.). Forschungs- und Entwicklungsprojekte. Innovationstage 2010. Bonn.
- FISCHER, G. (1910): Geräte für Saat und Pflege. Die Entwicklung des landwirtschaftlichen Maschinenwesens in Deutschland, Heft 177 der Arbeiten der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft, 71-127.
- FRIELINGHAUS, M. (2002): Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg-Vorpommern, Bodenverdichtung. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.). Güstrow.
- FRÖHLICH, O.K. (1934): Druckverteilung im Baugrunde. Wien: Verlag Julius Springer.
- FUKUSHIMA, T.; OKADA, J.; INOUE, E.; MITSUOKA, M.; INABA, S.; OKAYASU, T. (2006): Vibration model and evaluation of the half-track tractor in consideration of rolling resistance. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 68, 5, 71-77.
- GAMEDA, S.; RAGHAVAN, G.S.V.; THERIAULT, R.; MCKYES, E. (1985): High Axle Load Compaction and Corn Yield. Transactions of the ASAE 28, 6, 1759-1765.
- GEISCHEDER, R. (2011): Bodenbelastung und Bodenbeanspruchung unterschiedlicher Fahrwerkskonfigurationen (Dissertation). München: Technische Universität. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), Nr. 504.
- GEISCHEDER, R.; RAINER, H. (2008): Gefedertes Gummigurtbandlaufwerk für schwere Landmaschinen mit automatischer Auflagekraftoptimierung. VDI-Berichte Nr. 2045, 151-156.
- GERDSEN, G. (1997): Zum Einfluss von Wasserfüllungen in Forstreifen. Forsttechnische Informationen (FTI), 9, 103-106.
- GEYER, M. (1990): Pflanztechnik im Feldgemüsebau - Auswirkungen der Einbettungswerkzeuge und ausgewählter Jungpflanzenanzuchtverfahren auf die Pflanzqualität (Dissertation). München: Technische Universität.
- GEYRHOFER, A. F. (2010): Gut und sicher unterwegs – auch im Weingarten. Blick ins Land, 10, 30-31.

- GILL, W.R.; VANDENBERG, G.E. (1967): Soil dynamics in tillage and traction. Agricultural Handbook, 316, ARS, USDA.
- GISI, U.; SCHENKER, R.; SCHULIN, R.; STADELMANN, F.X.; STICHER, H. (1997): Bodenökologie. 2. Auflage. Stuttgart: Thieme Verlag.
- GLIMEROTH, G. (1953): Untersuchungen über Verfestigungs- und Verlagerungsvorgänge im Ackerboden unter Rad- und Raupenfahrzeugen. Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau, 96, 219-234.
- GEOPORTAL RLP (2013): Luftbild der Gemeinde Gau-Algesheim. Onlineresource: <https://www.geoportal.rlp.de/>. Abgerufen am 04.05.2013.
- GÖTZ, G.; EDER, J. (2009): Neuanlage gut überlegen - eine Brache bringt Vorteile. Landwirtschaftliches Wochenblatt, 45, 36-39.
- GRISSE, R.D.; JOHNSON, C.E.; BAILEY, A.C. (1987): The Influence of Stress Parth on Distortion during Soil Compaction. Transactions of the ASAE. 30, 5, 1302-1307.
- GRUBER, W. (1993): Auswirkungen der Bodenbelastung mit landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen und der Bodenbearbeitung auf das Bodengefüge (Dissertation). Gießen: Justus-Liebig-Universität. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), Nr. 232.
- GUDEHUS, G. (1981): Bodenmechanik. 1. Auflage. Stuttgart: Enke Verlag.
- GYSI, M. (2001): Bodenverdichtung: Vorbelastung als Stabilitätsmaß. FAT-Bericht 566. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (Hrsg.). Reckenholz-Tänikon.
- HÅKANSSON, I. (1988): A method for characterizing the state of compactness of an arable soil. In: Drescher, J.; Horn, R.; De Boodt, M. (Hrsg.): Impact of water and external forces on soil structure. Catena Supplement 11, 101-105.
- HÅKANSSON, I.; REEDER, R.C. (1994): Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. Soil & Tillage Research, 29, 277-304.
- HÅKANSSON, I.; VOORHEES, W.B.; RILEY, H. (1988): Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. Soil & Tillage Research, 11, 239-282.
- HAMMEL, K. (1993): Spannungsverteilung und Bodenverdichtung unter profilierten Reifen am Beispiel zweier Böden unter Grünland (Dissertation). Hohenheim: Universität Hohenheim, Hohenheimer Bodenkundliche Hefte, Heft 14.

- HÄNGGLI, T. (1995): Reifen für Forstfahrzeuge, Marktübersicht. Interne Berichte der Eidgenössischen Technischen Hochschule für Forstliches Ingenieurwesen, Heft 6. Zürich.
- HARRACH, T.; PFEIFFER, B.; HEITZMANN, S.; SAUER, S. (2003) Langfristige nutzungsbedingte Bodendegradierung ackerbaulich genutzter Lössböden in Sachsen: Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Abschlussbericht: Justus-Liebig-Universität; Ingenieurbüro Schnittstelle Boden; Gesellschaft GeoExtend. Gießen.
- HARTGE, K. H., HORN, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik. 3. Auflage. Stuttgart: Enke Verlag.
- HELAL, H.M.; MÜLLER, A.; SAUERBECK, D. (1994): Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf die Wurzelfunktionen und den Nährstoffhaushalt. In: Landbauforschung Völkenrode, Wissenschaftliche Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): Belastung, Beanspruchung und Verdichtung von Böden durch landwirtschaftliche Maschinen und deren Auswirkungen auf Bodengefüge, Bodenorganismen und biologische Prozesse sowie Pflanzenwachstum und Ertrag, Sonderheft 147, 167-178.
- HERNDL-LANZ, S. (2010): Anforderungen an Begrünungen im Weinbau. Bericht/Bodenseminar 2010 am 8./9. Juni 2010 an der Fachschule Silberberg. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irdning-LFZ, 15-18.
- HEROLD, P.; HEß, J. (2003): Einsatz moderner Arbeitspferdetechnik im Grünlandmanagement – Eine umweltschonende Alternative in Landwirtschaft und Naturschutz. In: Büchs, W. (Hrsg.): Grünlandmanagement nach Umsetzung der Agenda 2000 – Probleme und Perspektiven für Landwirtschaft und Naturschutz. Mitteilungen der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, 393, 76-80.
- HESSE, T. (1983): Druckspannungsmeßdosen für körnige Haufwerke. Grundlagen der Landtechnik, 33, 5, 121-131.
- HEYDE, H. (1973): Landmaschinenlehre. Leitfaden für Studierende der Landwirtschaft. Band. 1: Landtechnische Grundlagen u. Querschnittsgebiete. 3. stark veränd. Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik.
- HINTER, J. (2008): Analyse der Fundamentverschiebungen infolge vertikaler und geneigter Belastung (Dissertation). Stuttgart: Universität Stuttgart. Mitteilung des Instituts für Geotechnik, Nr. 57.
- HINTERMAIER-ERHARD, G.; ZECH, W. (1997): Wörterbuch der Bodenkunde. Stuttgart: Enke Verlag.
- HOFFMANN, K.; KRENN, E.; STANKER, G. (1994): Fördertechnik 2. Maschinensätze, Fördermittel, Tragkonstruktionen. 3. Auflage. Wien u. München: Oldenbourg Verlag.

- HOLDER (2014): Werkspublikationen der Fa. Max Holder GmbH. Broschüre Weinbau, Broschüre Holder M 480.
- HOLM, C.-I. (1972): Das Verhalten von Reifen beim mehrmaligen Überfahren einer Spur auf nachgiebigem Boden und der Einfluss auf die Konzeption mehrachsiger Fahrzeuge (Dissertation). München: Technische Universität, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 14, Nr. 17.
- HOLPP, M. (2012): Untersuchungen zu Controlled Traffic Farming und satellitenbasierten Lenksystemen (Dissertation). Kassel: Universität Kassel. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), Nr. 513.
- HORN, R. (1981): Die Bedeutung der Aggregierung von Böden für die mechanische Belastbarkeit in dem für Tritt relevanten Auflastbereich und deren Auswirkungen auf physikalische Bodenkenngrößen. Landschaftsentwicklung Umweltforschung 10. Berlin: Technische Universität.
- HORN, R. (1986): Auswirkung unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die mechanische Belastbarkeit von Ackerböden. Zeitung für Pflanzenernährung und Bodendruck, 149, 9-18.
- HORN, R. (1988): Compressibility of arable land. In: Drescher, J.; Horn, R.; De Boodt, M. (Hrsg.): Impact of water and external forces on soil structure. Catena Supplement 11, 53-71.
- HORN, R. (1991): Unterbodenverdichtung – gibt es gesicherte Hinweise auf nachhaltige Ertragseinbußen? Wasser u. Boden, 51, 12, 15-18.
- HORN, R. (2001): Die Verformung von Böden – Ursachen und Folgen für eine nachhaltige Landnutzung. Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunkts USL, Nr. 92. Bonn: Rheinische-Friedrich-Wilhelms-Universität, 75-85.
- HORN, R.; BURGER, N.; LEBERT, M.; BADEWITZ, G. (1987): Druckfortpflanzung in Böden unter fahrenden Traktoren. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung, 28, 94-102.
- HORN R.; FLEIGE, H.; PETH S. (2009): Gute fachliche Praxis aus Sicht der Bodenkunde: Vorsorge und Maßnahmenwerte als Grundlage für die Bewertung der Verdichtungsgefährdung von Böden in der Landwirtschaft. Bodenschutz, 3, 80-85.
- HORN, R.; LEBERT, M. (1989): Bedeutung des Bodenaufbaus und der Fahrgeschwindigkeit von Traktoren für die Druckfortpflanzung in Ackerböden. In: VDI-MEG Kolloquium Landtechnik. Tagung München, 27.-28.04.89. Heft 7, Reifen Landwirtschaftlicher Fahrzeuge, 63-71.

- HORN, R.; LEBERT, M.; BURGER, N. (1991): Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ-Messungen. In: Materialien 73: Mechanische Belastbarkeit von Böden Bayerns. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen. München.
- HORN, R.; PAUL, R.; SIMONTA, C.; FLEIGE, H. (2002) Schutz vor mechanischer Belastung. In: Blume, H.-P., Felix-Henningsen, P.; Fischer, W.; Frede, H.G.: Horn, R.; Stahr, K. (Hrsg.): Handbuch der Bodenkunde. Weinheim: Wiley VCH.
- HORN, R.; RABBEL, W.; VOLK, L. (2008): Anwendbarkeit geophysikalischer, bodenphysikalischer und landtechnischer Methoden zur Bestimmung von flächenhaften Bodenverdichtungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Abschlussberichte zum BMELV-Verbundvorhaben, Teilvorhaben der Universität Kiel (FKZ: 03HS003/1) und der Fachhochschule Südwestfalen (FKZ 03HS003/2).
- HORN, R.; ROSTEK, J. (2000): Subsoil compaction processes - state of knowledgement. *Advances in GeoEcology*, 32, 44-54.
- HORN, R.; SEMMEL, H. (1994): Spannungen und Spannungsverteilung in Ackerböden während des Befahrens - Überlegungen zur Druckfortpflanzung und der mechanischen Belastbarkeit von Böden. In: Wissenschaftliche Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL) (Hrsg.). Belastung, Beanspruchung und Verdichtung von Böden durch landwirtschaftliche Maschinen und deren Auswirkungen auf Bodengefüge, Bodenorganismen und bodenchemische Prozesse sowie Pflanzenwachstum und Ertrag, Sonderheft 147, 41-59.
- HORN, R.; VAN DEN AKKER, J.J.H.; ARVIDSSON, J. (2000): Subsoil compaction. Distribution, Processes and Consequences. *Advances in Geoecology* Nr. 32.
- HÜTTE (Hrsg.) (1955): Des Ingenieurs Taschenbuch. Theoretische Grundlagen. 28. Auflage. Berlin: Verlag Wilhelm Ernst & Sohn.
- INSTITUT FÜR LANDTECHNIK POTSDAM-BORNIM (1957): Anbauhalbraupe für den Pflegeschlepper RS14/30 „Favorit“. Prüfbericht Nr. 119. Potsdam-Bornim: Institut für Landtechnik.
- IWASAKI, K.; KADOYA, K.; KURAOKA, T. (1966): Growth and nutrient adsorption of Dalaware grapes as affected by soil oxygen. IV. Comparison of the effect among different soil properties. *Journal of the Japanese Society of Horticultural Science*, 35, 15-22.
- JACKE, H.; DREWES, D.; HITTENBECK, J. (2004): Zugkraftentwicklung auf reißigbewehrten Rückegassen und gewachsenem Boden bei variierendem Reifendruck. ifa-Mitteilungen, Reihe A, Heft 1, Göttingen.
- JACKE, H.; EBEL, A. (2006): PrALIICon: Neues über Forstreifen Teil 3. *Forst und Technik*, 3, 10-15.

- JENISCH, K.-H. (1967): Schlepper und Landmaschinen am Hang. In: Heyde, H., Kühn, G. (Hrsg.): Landmaschinenlehre: Leitfaden für Studierende der Landwirtschaft, Band 2. Berlin: VEB Verlag Technik.
- KATZENBACH, R. (2013): Studienunterlagen Geotechnik. Teil V, Setzungen. Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik. Darmstadt: Technische Universität.
- KELLER, T.; TRAUTNER, A.; ARVIDSSON, J. (2002): Stress distribution and soil displacement under a rubber-tracked and a wheeled tractor during ploughing, both on-land and within furrows. *Soil & Tillage Research*, 68, 1, 39-47.
- KÉZDI, A. (1969): Handbuch der Bodenmechanik. Teil 1 Bodenphysik. Berlin: VEB-Verlag Technik.
- KÉZDI, A. (1970): Handbuch der Bodenmechanik. Teil 1 Bodenmechanik im Erd-, Grund- und Straßenbau. Berlin: VEB-Verlag Technik.
- KIESLINGER, A. (1962): Zur Kohäsion des Sandes (Unfälle und Unfallverhütung in Sandgruben). *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 114, 151-152.
- KIRBY, J.M. (1989): Shear damage beneath agricultural tyres: a theoretical study. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72, 151-160.
- KIRSCH, K.; SONDERMANN, W. (2001): Baugrundverbesserung. In: Smolczyk, U. (Hrsg.): Grundbauchtaschenbuch Teil 2. Berlin: Verlag Ernst u. Sohn.
- KLOHN, W.; WINDHORST, H.-W. (1999): Physische Geographie: Böden, Vegetation, Landschaftsgürtel. – Vechtaer Materialien zum Geographieunterricht (VMG). Vechta.
- KNIETER, M. (1985): Bodenerosion in rheinhessischen Weinbergen - Ursachen, Folgen und Verhinderung aus landschaftsökologischer Sicht. *Mainzer Geographische Studien*, Heft 20.
- KNITTEL, H. (1975): Auswirkungen der Minimalbestelltechnik auf physikalische Bodeneigenschaften (Dissertation). München: Technische Universität. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), Nr. 6.
- KOBAYASHI, A.; IWASAKI, K.; SATO, Y. (1963): Growth and nutrient absorption of grapes as affected by soil aeration. 1. With non-boaring Delaware grapes. *Journal of the Japanese Society of Horticultural Science*, 32, 33-37.
- KÖHLER, W.; SCHACHTEL, G.; VOLESKE, P. (2007): Biostatistik. Eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler. 4. aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, New York u. Tokyo: Springer Verlag.

- KOLESCH, H. (1985): Die Eisenmangelchlorose der Weinrebe - Einfluß von Bikarbonat und Phosphat unter Berücksichtigung der genetisch fixierten Chloroseanfälligkeit zweier Unterlagen (Dissertation). Gießen: Justus-Liebig-Universität.
- KOOLEN, A.J.; LERINK, P.; KURSTJENS, D.A.G.; VAN DEN AKKER, J.J.H.; ARTS, W.B.M. (1992): Prediction of aspects of soil wheel systems. *Soil & Tillage Research*, 24, 381-396.
- KOOLEN, A.J.; KUIPERS, H. (1983): *Agricultural Soil Mechanics*. Berlin, Heidelberg, New York u. Tokyo: Springer Verlag.
- KOLYMBAS, D. (1998): *Bodenmechanik und Grundbau*. Berlin, Heidelberg, New York u. Tokyo: Springer Verlag.
- KOMANDI, G. (1976): The determination of the deflection, contact area, dimensions and load carrying capacity for driven pneumatic tires operating on concrete pavement. *Journal of Terramechanics*, 13, 1, 15-20.
- KOMMISSION (2013): "REFIT - Fit for growth" – Commission takes ambitious next steps to make EU law lighter; Pressemitteilung der Europäischen Kommission, veröffentlicht am 22. Oktober 2013. Onlineressource: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-891_en.htm; Abgerufen am 28.10.2013.
- KÖNIG, F. (1995): *Verdichtung im Erd- und Straßenbau*. 1. Auflage. Wiesbaden u. Berlin: Bauverlag.
- KRASCHINSKI, S. (2001): Ein verfahrenstechnischer Beitrag zum angepassten Befahren von Niedermoorgrünland (Dissertation). Berlin: Humboldt-Universität. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), Nr. 373.
- KRAUSE, R.; STEINKAMPF, H. (1986): Die Befahrbarkeit des Bodens. In: KTBL-Schrift 308. Bodenverdichtungen beim Schlepper- und Maschineneinsatz und Möglichkeiten zu ihrer Verminderung. Münster-Hiltrup (Westfalen): KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag.
- KROMER, K.-H. (1989): Verkehrsorientierte Anbausysteme – Definition und Verfahrenstechnische Lösungen. *Landtechnik*, 44, 6, 225-226 u. 231-232.
- KRÜMMELBEIN, J.; PETH, S.; HORN, R. (2008): Determination of precompression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. *Soil & Tillage Research*, 99, 139-148.
- KRUTIKOV, N.P.; BIEHAHN, R.; BOHNDORF, R. (1955): *Theorie, Berechnung und Konstruktion der Landmaschinen: Maschinen und Geräte für Bodenbearbeitung, Aussaat und Pflanzenpflege*, Band 1. Berlin: VEB Verlag Technik.

- KTBL (2013): Weinbau und Kellerwirtschaft. KTBL Datensammlung. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.). 15. Auflage. Münster-Hiltrup (Westfalen): KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag.
- KUBOTA (2014): Werkspublikationen der Fa. Kubota Deutschland GmbH. Broschüre M6040/M7040/M8540 Narrow, Broschüre Kubota M8540 DTN Power Crawler.
- KÜHNER, S. (1997): Simultane Messung von Spannungen und Bodenbewegungen bei statischen und dynamischen Belastungen zur Abschätzung der dadurch induzierten Bodenbelastungen (Dissertation). Kiel: Christian-Albrechts-Universität. Schriftenreihe des Institutes für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Band 39.
- KUNTSCHKE, K. (2000): Geotechnik. Erkunden - Untersuchen - Berechnen - Messen. Braunschweig u. Wiesbaden: Vieweg u. Teubner Verlag.
- KUNTZE, H. (1983): Die Bedeutung des Bodengefüges für die Ertragsbildung in Jahren mit extremer Witterung. Zuckerrübe (Fachzeitschrift), 32, 3, 144-147.
- KUNTZE, H.; ROESCHMANN, G.; SCHWERDTFEGER, G. (1994): Bodenkunde. 5. neubearb. u. erw. Auflage. Stuttgart: UTB Verlag.
- KUNZE, G.; GÖHRING, H.; JACOB, K. (2011): Baumaschinen. Erdbau- und Tagebaumaschinen. 2. überarb. Auflage. Braunschweig u. Wiesbaden: Vieweg u. Teubner Verlag.
- KUTSCHENREUTER, W. (2009): Traktoren der oberen Leistungsklasse, Schrittmacher landtechnischer Entwicklung. Neue Landwirtschaft, 11, 50-53.
- KUTZBACH, H.D. (Hrsg.) (1995): Lehrbuch der Agrartechnik I. Allgemeine Grundlagen/Ackerschlepper. Fördertechnik. Berlin: Blackwell Wissenschaftsverlag.
- LANDESKONTROLLVERBAND BRANDENBURG (2013): Hinweise zur Entnahme von Bodenproben. Landeskontrollverband Brandenburg e.V. Onlineresource: <http://www.lkvbb.de/Service/Formularc/Boden/Hinweise%20zur%20Entnahme%20von%20Bodenproben.pdf>. Abgerufen am 07.11.2013.
- LANG, H.-J.; HUDER, J.; AMANN, P.; PUZRIN, A.M. (2007): Bodenmechanik und Grundbau - Das Verhalten von Böden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York u. Tokyo: Springer Verlag.
- LANYON, D.M.; CASS, A.; HANSEN, D. (2004): The effect of soil properties on vine performance. CSIRO Land and Water Technical Report, 34.
- LARINK, O.; HEISLER, C.; SÖCHTIG, W.; LÜBBEN, B.; WICKENBROCK, L. (1994): Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf die Meso- und Makrofauna. In: Belastung, Beanspruchung und Verdichtung von Böden durch landwirtschaftliche Maschinen und deren Auswirkungen auf Bodengefüge, Bodenorganismen und biologische Prozesse sowie Pflanzenwachstum und Ertrag. Landbauforschung Völkenrode, Wissenschaftliche Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Sonderheft 147, Braunschweig-Völkenrode.

- LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOORHEES, W.B.; GUPTA, S.C. (1989): Mechanics and related processes in structured agricultural soils. NATO ASI-Series. Applied Sciences 172
- LEBERT, M.; HORN, R. (1991): Ein Verfahren zur flächendeckenden Erfassung der Bodenstabilität im Hinblick auf die Beurteilung der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, 33, 85-99.
- LEBERT, M.; SPRINGOB, G. (1994): Zur Rekultivierung von Lößböden (II): Wirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf die Unterbodenstruktur junger, planierter Flächen. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, 35, 300-310.
- LEISTER, G. (2008): Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung. Strategie, Methoden, Tools. ATZ/MTZ Fachbuch. Braunschweig u. Wiesbaden: Vieweg u. Teubner Verlag.
- LIEBHARD, P.; EITZINGER, J.; KLAGHOFER, E. (1995): Einfluß der Primärbodenbearbeitung auf Aggregatstabilität und Eindringwiderstand im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 5). Die Bodenkultur, 46, 1-18.
- LIEBHERR (1991): Standardlaufwerk oder Deltalaufwerk. Werkspublikation der Fa. Liebherr.
- LIND, K. (2010): Bodenschonender Maschineneinsatz im Obst- und Weingarten. Beitrag der Fachgruppe Technik. Onlineresource: <http://www.obstbau.at/1020/Details?fachbeitragID=135>. Abgerufen am 29.11.2013.
- LIPIEC, J.; HATANO, R. (2003). Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. Geoderma, 116, 107-136.
- LIU, Z.S.; LU, C.; WANG, Y.Y.; LEE, H.P.; KOH, Y.K.; LEE, K.S. (2006): Prediction of noise inside tracked vehicles. Journal of Applied Acoustics, 67, 74-91.
- LÖFFLER, H. (1985): „Bodenschäden bei der Holzernte – Bedeutung und Erfassung“ Der Forst- und Holzwirt, 14/15, 379-383.
- MACRAE, I. (1991) The management of shallow and potentially unstable soils. Australian and New Zealand Wine Industry Journal, 6, 32-34.
- MÄHNER K.-T. (1999): Wachstum und Ertrag von Getreide nach mechanischer Bodenbelastung in unterschiedlichen Bearbeitungssystemen (Dissertation). Göttingen: Georg-August-Universität. Onlineresource: <http://hdl.handle.net/11858/00-1735-0000-0006-AB85-0>, Abgerufen am 07.12.2013.
- MANUWA, S.I.; ADESINA, A.; OLAJOLO, B.F. (2010): Evaluation of Soil Compaction induced by repeated passes of Rubber Tracked Excavator in Sandy Clay Soil. International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO) (Hrsg.). Department of Agricultural engineering, The Federal University of Technology, Nigeria.

- MARBÉ-SANS, D. (2006): Mechanisierung im Schweizer Rebbau. Schweizer Landtechnik, 3, 28-30.
- MENG, W. (1978): Baumverletzung durch Transportvorgänge bei der Holzernte – Ausmaß und Verteilung, Folgeschäden am Holz und Versuch ihrer Bewertung. Schriftenreihe der LFV Baden-Württemberg (Hrsg.), Band 53.
- MERHOF, W.; HACKBARTH, E.M. (1985): Fahrmechanik der Kettenfahrzeuge. 2. korr. u. erw. Auflage. Alsbach/Bergstraße: Leuchtturm Verlag.
- MEYER, H. (O. J.): Fahrmechanische Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. Vorlesungsunterlagen Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik, FG Konstruktion von Maschinensystemen. Berlin: Technische Universität.
- MOHSENI MANESH, A.; 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, 1919-1925.
- MOITZI, G.; BOXBERGER, J. (2007): Vermeidung von Bodenschadverdichtungen beim Einsatz von schweren Maschinen - eine aktuelle Herausforderung. Ländlicher Raum (Online Fachzeitschrift des Österreichischen Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft), 1-27.
- MÜLLER, E. (1984): Zur Entstehung von Bodenverdichtungen im Weinbau durch das Befahren mit Traktoren. Landtechnik, 39, 9, 396-398.
- MÜLLER, E. (2009): Bodenerosion: Eine unterschätzte Bedrohung. Das Deutsche Weinmagazin, 5, 24-30.
- MÜLLER, E.; SCHULZE, G.; WALG, O. (2000): Weinbau-Taschenbuch. 11. Auflage. Mainz: Fachverlag Dr. Fraund.
- MYBURGH, P.A.; CASS, A.; CLINGELEFFER, P.R. (1996): Root systems and soils in Australian vineyards and orchards - an assessment. Barossa Valley Rotary Foundation Fellowship Report, CRC Soil & Land Management.
- MYBURGH, P.A.; MOOLMAN, J.H. (1991a): Ridging - a soil preparation practice to improve aeration of vineyard soils. South African Journal of Plant and Soil, 8, 189-193.
- MYBURGH, P.A.; MOOLMAN, J.H. (1991b): The effect of ridging on the soil water status of a waterlogged vineyard soil. South African Journal of Plant and Soil, 8, 184-188.
- MYBURGH, P.A.; MOOLMAN, J.H. (1993): Effect of ridging on the temperature regime of a waterlogged vineyard soil. South African Journal of Plant and Soil, 10, 17-21.
- NEN 5140 (1996): Geotechniek - Bepaling van de conusweerstand en de plaatselijke wrijvingsweerstand van grond - Elektrische sondeermethode. Delft: NEN.

- NICHOLS, T.A.; BAILEY, A.C.; JOHNSON, C.E.; GRISSO, R.D. (1984): A Stress Transducer for Soil. ASAE Paper No. 84-1592.
- NIGGLI, C. (2013): Begrünungspraxis im Weinbau: Ein Rückblick. Delinat-Institut für Ökologie und Klimafarming (Hrsg.). Ithaka Journal, 1, 13-19.
- NISSEN, B. (1999): Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland - bodenphysikalischer Ansatz (Dissertation). Kiel: Christian-Albrechts-Universität. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Band 50.
- OBERMEIER-HARTMANN, R.; BLEISCHWITZ, S.; KÄSLER, R. (2006): New track undercarriage for agriculture application. Proceedings CIGR World Congress Agricultural Engineering for a better World 2006: VDI-Berichte Nr. 1958, 123-124.
- OLF, W. (1993): Beurteilung bodenschonender Fahrwerke (Dissertation). Kiel: Christian-Albrechts-Universität. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), Nr. 234.
- OLFE, G. (1995): Zur Bodenbelastung durch den Schlepper- und Maschineneinsatz in der pflanzlichen Produktion. In: Bodenverdichtung. KTBL-Schrift 362, 12-28. Münster-Hiltrup (Westfalen): KTBL-Schriften-Vertrieb.
- OKELLO, J.A. (1992): Prediction of the force distribution between the soil and a pneumatic wheel. Journal of Agricultural Engineering Research, 51, 249-262.
- OKELLO, J.A.; DWYER, M.J.; COTTRELL, F.B. (1994): The tractive performance of rubber tracks and a tractor driving wheel tyre as influenced by design parameters. Journal of Agricultural Engineering Research, 59, 33-43.
- PASSIOURA, J.B. (1988): Water transport in and to roots. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 39, 245-265.
- PASSIOURA, J.B. (1991): Soil structure and plant growth. Australian Journal of Soil Research, 29, 717-728.
- PASSIOURA, J.B. (2002): Soil conditions and plant growth. Plant, Cell and Environment, 25, 311-318.
- PAUL, R. (2004): Keine pauschalen Grenzen - unterschiedlicher Boden verträgt unterschiedliche Radlasten. Neue Landwirtschaft, 10, 40-44.
- PEKAZETT (o.J.): Pekazett-Hangschlepper UFF 360. Prospekt der Baumaschinenfabrik Karl Peschke GmbH & Co. KG. Zweibrücken.
- PENKOV, M.; NANCHEVA, R.; HRISTOVA, R.; ETROPOLSKI, H. (1979): The effect of bulk density on the position of the grapevine root system. Pochvoznane i Agrokhimiya, 14, 24-27.

- PERRET, P.; KOBLET, W. (1996a): Die Verdichtungschlorose der Reben - Hemmung des Wurzelwachstums als Ursache (Teil 1), Verein Publikationen Spezialkulturen (Hrsg.), Schweizer Zeitschrift für Obst- und Weinbau, 21, 553-556.
- PERRET, P.; KOBLET, W. (1996b): Die Verdichtungschlorose der Reben - Ursachen der Hemmung des Wurzelwachstums (Teil 2). Verein Publikationen Spezialkulturen (Hrsg.), Schweizer Zeitschrift für Obst- und Weinbau, 22, 584-587.
- PETELKAU, H. (1991): Ertragliche Auswirkungen technogener Schadverdichtungen der Ackerkrume. Agrartechnik, 41, 2, 54-57.
- PETELKAU, H. (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschadverdichtung. Bodenbearbeitung und Bodenschutz – Schlussfolgerungen für die gute fachliche Praxis. KTBL-Arbeitspapier 266, 56-79.
- PETELKAU, H.; SEIDEL, K.; FRIELINGHAUS, M. (2000): Ermittlung des Verdichtungswiderstandes von Böden des Landes Brandenburg und Bewertung von Landmaschinen und landwirtschaftlichen Anbauverfahren hinsichtlich der Beeinträchtigung von Bodenfunktionen durch die Verursachung von schwer regenerierbaren Schadverdichtungen. FuE-Bericht. ZALF Müncheberg e.V., Institut für Bodenlandschaftsforschung.
- PETH, S.; HORN, R. (2004): Zur Abschätzung von Bodenspannungen unter landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen. Landtechnik, 59, 5, 268-269.
- PHILLIPS, R.E.; KIRKHAM, D. (1962): Soil compaction in the field and corn growth. Agronomy Journal, 54, 29-34.
- PLATZER, J.; LIND, K. (2011): Raupentraktor "Carraro Mach 4" im Praxistest. Online-ressource: <http://www.obstwein-technik.eu/1020/Details?fachbeitrag-ID=220>. Abgerufen am 10.02.2014.
- PRÖLL, W. (2004): Was man über Harvester wissen sollte - Teil I. Land Technik Leute, 4, 16-18.
- PROFFITT, T. (2000): Using cover crops and root pruning to affect water uptake. Australian Viticulture, 4, 45-51.
- PROFFITT, T.; ROBINSON, R.; ARNEY, M.; HODDER, S.; ILAND, P. (2000): Canopy, fruit and wine characteristics of Cabernet Sauvignon grown on contrasting soils in Coonawarra. 5th International Symposium on Cool Climate Viticulture and Oenology, Melbourne.
- RAAB, S.; WAUER, A. (2002): Aktuelle Holzernteverfahren am Hang. Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 36.
- RABBANI, M.A.; TSUJIMOTO, T.; MITSUOKA, M.; INOUE, E.; OKAYASU, T. (2011): Prediction of the vibration characteristics of half-tracked tractor considering a three-dimensional dynamic model. Biosystems Engineering, 110, 2, 178-188.

- RAGHAVAN, G.S.V., MCKYES, E., BEAULIEU, B. (1978): Clay soil compaction due to wheel slip. Transactions of the ASAE, 21, 4, 649-649 u. 653.
- RAGHAVAN, G.S.V.; MCKYES, E.; CHASSE, M. (1977): Effect of wheel slip on soil compaction. Journal of Agricultural Engineering Research, 22, 1, 79-83.
- RANKINE, W.J.M. (1956): On the stability of loose earth. Philosophical Transactions of the Royal Society, 147, 9-27.
- REBHOLZ, F. (2003): Abschlussbericht über das ATW-Vorhaben Nr. 130. Weinbergschlepper in der Praxis. Münster-Hiltrup (Westfalen): KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag.
- REDL, H.; KNOLL, M.; ACHLEITNER, D.; PECK, W. (2009): Traubenwelke ist bekämpfbar. Ergebnisse mehrjähriger Forschungsarbeit. Der Winzer, 65, 4, 28-30.
- REMPFER, M. (2003): Grundlagen der automatischen Reifenluftdruckverstellung bei Traktoren (Dissertation). München: Technische Universität, VDI-Fortschritt-Berichte, 14, 111.
- REMPFER, M.; SCHWANGHART, H. (1995): Rollwiderstand eines Luftreifens auf nachgiebiger Fahrbahn. Lehrstuhl für Landmaschinen der Technischen Universität München (Hrsg.). Onlineressource: AgTecCollection: <http://mediatum.ub-tum.de/?id=718850>. Abgerufen am 15.03.2014.
- RENGER, M.; BOHNE, K.; FACKLAM, M.; HARRACH, T.; RIEK, W.; SCHÄFER, W.; WESSOLEK, G.; ZACHARIAS, S. (2008): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte, Bericht 2008. Berlin.
- RENIUS, K.T. (1985): Traktoren - Technik und ihre Anwendung. München: BVL Verlagsgesellschaft.
- RICHTLINIE 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Abgerufen am 28.10.2013.
- RICHTLINIE 2006/0086 COD als Entwurf einer Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für den Bodenschutz und zur Änderung der Richtlinie 2004/35/EG. Abgerufen am 28.10.2013.
- RICHTLINIE 6101 (2007): Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden. VDI-Richtlinie. VDI-Handbuch Landwirtschaft/Landtechnik.

- RÜCKNAGEL, J. (2007): Schadverdichtungsgefährdung von Ackerböden - Bewertung von Produktionsverfahren unter Berücksichtigung der Jahreswitterung 2007. Tagung Nachhaltige Landwirtschaft – Indikatoren, Bilanzierungsansätze, Modelle – Veranstaltung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft e. V., der Deutschen Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. und der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft e. V. Osnabrück.
- RÜCKNAGEL, J.; BRANDHUBER, R.; HOFMANN, B.; LEBERT, M.; MARSCHALL, K.; PAUL, R.; STOCK, O.; CHRISTEN, O. (2010): Variance of mechanical precompression stress in graphic estimations using the Casagrande method and derived mathematical models. *Soil & Tillage Research*, 106, 165-170.
- RÜHLING, W. (1979): Fortentwicklung des Weinbaus am Steilhang durch Mechanisierung. In: *Weinbau am Steilhang*. KTBL-Schrift 238, 56-64. KTBL-Schriften-Vertrieb: Münster-Hiltrup (Westfalen).
- RÜHLING, W. (1980): Schlepper für Weinbau-Steillagen. *Der Deutsche Weinbau*, 12, 552-528.
- RÜHLING, W. (1988): Verbesserungsansätze und Perspektiven für die Mechanisierung von Seilzuglagen. *Der Deutsche Weinbau*, 43, 16, 785-791.
- RÜHLING, W. (1991): Mechanisierung von Steillagen auf der Basis handgeführter Kleinraupen. *Der Deutsche Weinbau*, 16, 631-638.
- RÜHLING, W. (1999): Entwicklung ökologisch und ökonomisch vorteilhafter Mechanisierungsverfahren zur Erhaltung weinbaugeprägter Kulturlandschaften. XXIV. Weltkongress für Rebe und Wein, Mainz.
- RÜHLING, W., STRUCK, W. (1988): Schmalspur-Kettenschlepper für den Steillagenweinbau. *Der Deutsche Weinbau*, 43, 12, 597-601.
- RUSSELL, R.S. (1977): *Plant root systems*. London: McGraw-Hill Verlag.
- SAAYMAN, D.; KLEYNHANS, P.H. (1978): The effect of soil type on wine quality. *Proceedings of the South African Society of Enology and Viticulture*, 21st Annual meeting, Cape Town, 105-119.
- SCHALLER, K. (2000): *Praktikum zur Bodenkunde und Pflanzenernährung*. 8. Auflage. Geisenheimer Berichte, Band 2. Gesellschaft zur Förderung der Forschungsanstalt Geisenheim (Hrsg.). Eltville: Langer Verlag.
- SCHAEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P. (2010): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- SCHILLING, E. (1960): *Landmaschinen. Lehr- u. Handbuch für den Landmaschinenbau*. Band 1 Ackerschlepper. 2. Auflage. Rodenkirchen: Verlag Dr.-Ing. E. Schilling:

- SCHJONNING, P.; RASMUSSEN, K.J. (1994): Danish experiments on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil & Tillage Research*, 29, 2/3, 215-227.
- SCHLÖR, K. (1959): Konstruktive Merkmale moderner Gleis-Ketten. Werkspublikation. WIRA GmbH (Hrsg.), Hannover.
- SCHLOTTER, V.; KUTZBACH, H.D. (2001): Innenkontur eines Traktorreifens auf festem und nachgiebigem Boden. *Agrartechnische Forschung*, 7, 23-27.
- SCHMIDT, H.H. (2001): Grundlagen der Geotechnologie. 2. Auflage. Stuttgart: Teubner Verlag.
- SCHMIDT, G. (2003): Geologie, Relief und Boden (Proseminar). Institut für Umweltwissenschaften. Vechta: Hochschule Vechta.
- SCHREIBER, M. (2006): Kraftstoffverbrauch beim Einsatz von Ackerschleppern im besonderen Hinblick auf CO₂-Emissionen (Dissertation), Hohenheim: Universität Hohenheim. Shaker Verlag: Aachen.
- SCHREIBER, M. (2009): Auftretende Kräfte und physikalisch-mechanische Auswirkungen bei Kontakt zwischen Fahrwerken/Reifen landwirtschaftlicher Maschinen und ausgewählten Ackerflächen-Bodengefügen (Dissertation). Gießen: Justus-Liebig-Universität. Cuvillier Verlag: Göttingen.
- SCHROEDER, D. (1992): Bodenkunde in Stichworten. 5. Auflage. Berlin u. Stuttgart: Borntraeger Verlag.
- SCHULZ, H. (1995): Reifenverschleiß bei Straßenfahrt. *Forst und Technik*, 10, 25.
- SCHWAB, A.; PETERNEL, M. (o.J.): Die Vergilbungskrankheit der Rebe, Ursachen und Gegenmaßnahmen. Veröffentlichung der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, Sachgebiet Weinbaummanagement, Online-Ressource, http://www.lwg.bayern.de/weinbau/rebenanbau_qualitaetsmanagement/28132/lnkurl_2.pdf, Abgerufen am 24.10.2013.
- SCHWANGHART, H. (1993): Auswirkungen der Luftverminderung bei landwirtschaftlichen Reifen im lockeren Boden. Tagungsband Hannover 21./22. Oktober 1993. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik. VDI-Bericht Nr. 1088, 371-387.
- SCHWARZ, H.-P.; BRUNNER, D.; KEICHER, R. (2012): Geisi – neues Fahrzeug für den Steillagenweinbau. *Die Winzer-Zeitschrift*, 3, 27.
- SCHWIEGER, H. (1996): Untersuchung neuartiger Laufwerke und lasergestützte Erfassung der Reifen-, Bodenverformung (Dissertation). Kiel: Christian-Albrechts-Universität. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), Bd. 289.

- SEIFERT, V.; SEUFERT, H. (1986): Auswirkungen verschiedener Fahrwerke (Dreirad) und Schlepperbereifungen auf das Bodengefüge. KTBL-Schrift 308, 119-136. KTBL-Schriften-Vertrieb: Münster-Hiltrup (Westfalen).
- SEMMELE, H. (1993): Auswirkungen kontrollierter Belastungen auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch-mechanische Kenngrößen von Ackerböden (Dissertation). Kiel: Christian-Albrechts-Universität. Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Band 26.
- SEMMELE, H., HORN, R. (1995): Möglichkeiten zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit und der Druckfortpflanzung im Boden im Hinblick auf die Ableitung von bodentyp- und maschinenspezifischen Grenzwerten. In: Bodenverdichtung. KTBL Schrift 362, 41-59. KTBL-Schriften-Vertrieb: Münster-Hiltrup (Westfalen).
- SHAFIQ, M.; HASSAN, A.; AHMAD, S. (1994): Soil physical properties as influenced by induced compaction under laboratory and field conditions. Soil & Tillage Research, 9, 13-22.
- SHIERLAW, J.; ALSTON, A.M. (1984): Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. Plant and Soil, 77, 15-28.
- SIMMER, K. (1994): Grundbau 1 – Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen. 19. Auflage. Stuttgart: Teubner Verlag.
- SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W.; PAINTER, D.J. (1981a): Compaction by agricultural vehicles: A review. I. Soil and wheel characteristics. Soil & Tillage Research, 1, 207-237.
- SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W.; PAINTER, D.J. (1981b): Compaction by agricultural vehicles: A review. II. Compaction under tyres and other running gear. Soil & Tillage Research, 1, 373-400.
- SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. (1994) (Eds.): Soil Compaction in Crop Production. Developments in Agricultural Engineering Series, Vol. 11. Amsterdam: Elsevier Science.
- SÖHNE, W. (1951): Das mechanische Verhalten des Ackerbodens bei Belastung, unter rollenden Rädern sowie bei der Bodenbearbeitung. Grundlagen der Landtechnik, 9, 1, 87-94.
- SÖHNE, W. (1952): Die Verformbarkeit des Ackerbodens. Grundlagen der Landtechnik, 10, 3, 51-59.
- SÖHNE, W. (1953): Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. Grundlagen der Landtechnik, 11, 5, 49-63.
- SÖHNE, W. (1956): Einige Grundlagen für eine landtechnische Bodenmechanik. Grundlagen der Landtechnik, 7, 11-27.

- SÖHNE, W. (1964): Allrad- oder Hinterradantrieb bei Ackerschleppern hoher Leistung. Grundlagen der Landtechnik, 20, 44-52.
- SOMMER, C. (1985): Ursachen und Folgen der Bodenverdichtungen sowie Möglichkeiten zu ihrer Vermeidung. Landtechnik, 40, 9, 378-384.
- SOMMER, C. (1999): Konservierende Bodenbearbeitung – ein Konzept zur Lösung agrarrelevanter Bodenschutzprobleme. Bodenschutz, 1, 15-19.
- SOMMER, C.; BRANDHUBER, R.; BRUNOTTE, J.; BUCHNER, W. (2002): Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen. Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL), Referat 516, 14-41.
- SOMMER, C.; BRUNOTTE, J. (2003): Lösungsansätze zum Problembereich Bodenschadverdichtung in der Pflanzenproduktion. Landnutzung und Landentwicklung, 44, 5, 220-228.
- SOMMER, C.; RUHM, E.; ALTEMÜLLER, H.-J. (1981): Direkt- und Nachwirkungen starker Verdichtungen auf das Bodengefüge und den Pflanzenertrag. Kali-Briefe 15, 7, 429-448.
- SONNEN, F.J. (1962): Zur Frage des Allradantriebs von Ackerschleppern. Landtechnische Forschung, 12, 1, 1-6.
- SONNEN, F. J. (1968): Zugfähigkeit von Ackerschleppern mit großer Motorleistung bei Hinterrad- und Allradantrieb. Grundlagen der Landtechnik, 18, 2, 41-46.
- SONNENBERG, R. (1998): Bodenverdichtung mit Vibrationsmaschinen. Straßen- und Tiefbau, 52, 6, 13-18.
- STAHL, H.; MARSCHALL, K.; GÖTZE, H. (2005): Bodendruck und Bodenbelastbarkeit. Schriftenreihe des Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Freistaat Sachsen. 1. Auflage. 10. Jahrgang, Heft 15.
- STEINER, M. (1979): Analyse, Synthese und Berechnungsmethoden der Triebkraft-Schlupf-Kurve von Luftreifen auf nachgiebigem Boden (Dissertation). München: Technische Universität. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), Bd. 33.
- STEINKAMPF, H. (1972): Die Auswirkungen unterschiedlicher Umfangsgeschwindigkeiten der Räder eines Allradschleppers auf seine Zugfähigkeit. Grundlagen der Landtechnik, 22, 6, 166-170.
- STEINKAMPF, H. (1974): Ermittlung von Reifenkennwerten und Gerätezugleistungen für Ackerschleppern (Dissertation). Braunschweig: Technische Universität Braunschweig.

- STEINKAMPF, H.; SOMMER, C. (1989): Druck und Verdichtungsmessungen im Feld unter großvolumigen Reifen. In: VDI-MEG Kolloquium Landtechnik. Tagung München, 27.-28. April 1989. Heft 7, Reifen Landwirtschaftlicher Fahrzeuge, 156-169.
- STEINKAMPF, H.; BARTELS, J.; OLFE, G.; ZACH, M. (1993): Ermittlung des Bodendrucks bei unterschiedlicher Belastung – Anlage und Durchführung des mehrjährigen Feldversuchs. In: Bodenverdichtung. KTBL-Schrift 362, 29-44. Münster-Hiltrup (Westfalen): KTBL-Schriften-Vertrieb.
- STEINMETZ, H. (1985): Grenzhangerschließung im Weinbau. KTBL-Schrift 300. KTBL-Schriften-Vertrieb: Münster-Hiltrup (Westfalen).
- STEINMETZ, H.; RÜHLING, W. (1985): Schleppereinsatz im Hang. Der Deutsche Weinbau, 40, 6, 248-253.
- STOCKFISCH, N. (1997): Strohabbau durch Mikroorganismen und Regenwürmer in zwei Bearbeitungssystemen (Dissertation). Göttingen: Georg-August-Universität. Hamburg: Verlag Dr. Kovač.
- STRAUSS, M. (2005): Geräte zur Tiefenlockerung im Weinberg. Schweizer Zeitschrift für Obst- und Weinbau. Verein Publikationen Spezialkulturen (Hrsg.), 5, 14-16.
- STRAUSS, M. (2007): Weinbergböden und Traktorenbereifung. Schweizer Zeitschrift für Obst- und Weinbau, Verein Publikationen Spezialkulturen (Hrsg.), 19, 4-6.
- SUN, Y.; SCHULZE LAMMERS, P.; DAMMEROW, L. (2003): Gleichzeitige Erfassung von Eindringwiderstand und Bodenfeuchte. Landtechnik, 58, 1, 20-21.
- TARDIEU, F.; BRUCKLER, L.; LAFOLIE, F. (1992): Root clumping may affect the root water potential and the resistance to soil-root water transport. Plant and Soil, 140, 291-301.
- TOLÓN-BECERRA, A.; BOTTA, G.F.; LASTRA-BRAVO, X.; TOURN, M.; RIVERO, D. (2012): Subsoil compaction from tractor traffic in an olive (*Olea europea* L.) grove in Almería, Spain. Soil Use and Management, 28, 4, 606-613.
- TRÜCKMANN, K.; HORN, R. (2009): Stabilisierungseffekte von Pflanzenwurzeln als Möglichkeit zur Reduzierung der mechanischen Bodendeformationen in Grünland. Tagungsbeitrag zur Jahrestagung der DBG. In: Böden - eine endliche Ressource, Jahrestagung der DBG, 5. - 13. September 2009, Bonn.
- TURNER, R.J. (1995): Comparison of Two and Four Track Machines to Rubber Tire Tractors in Prairie Soil Conditions. International Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition, Milwaukee (Hrsg.). SAE Technical Paper Series. No. 952097.

- TURNER, R.J.; SCHMIDT, K.; FORNIER, M.; LEPAGE, K., (2001): Development of a simple system for measuring peak soil stresses. In: Proceedings of the 2001 Agricultural Equipment Technology Conference, Louisville. ASAE Paper No. 01AETC03.
- UNGER, P.W.; KASPAR, T.C. (1994): Soil Compaction and Root Growth: A Review. *Agronomy Journal*, 86, 759-766.
- UPPENKAMP, N.; WEIßBACH, M.; HEITMANN, G. (2009): Reifen richtig wählen und einsetzen, DLG-Merkblatt 356. Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (Hrsg.). Groß-Umstadt.
- VAKALI, C. (2003): Spross- und Wurzelentwicklung von Getreide bei reduzierter Grundbodenbearbeitung im Organischen Landbau in Deutschland und Griechenland (Dissertation). Bonn: Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- VAKALI, C.; KÖPKE, U. (2001): Sproß- und Wurzelentwicklung von Getreide bei reduzierter Grundbodenbearbeitung im Ökologischen Landbau. Beiträge zur 6. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- VAN BAVEL, C.H.M. (1950): Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Science Society of America Proceedings*, 14, 20.
- VAN DER PLOEG, R.R.; EHLERS, W.; HORN, R. (2006): Schwerlast auf dem Acker. *Spektrum der Wissenschaft*, 8, 80-88.
- VAN HUYSSTEEN, L. (1983): Interpretation and use of penetrometer data to describe soil compaction in vineyards. *South African Journal for Enology and Viticulture*, 2, 59-65.
- VAN HUYSSTEEN, L. (1988): Soil preparation and grapevine root distribution – a qualitative and quantitative assessment. In: Van Zyl, J.L. (Ed.): *The grapevine root and its environment*. Department of Agricultural Water Supply, Pretoria, 1-15.
- VAN HUYSSTEEN L. (1989a): The effect of soil management and fertilization on grape composition and wine quality with special reference to South African conditions. *Australian Wine Industry Technical Conference*, 16-25.
- VAN HUYSSTEEN, L. (1989b): Quantification of the compaction problem of selected vineyard soils and a critical assessment of methods to predict soil bulk density from soil texture (PhD Thesis). Stellenbosch: University of Stellenbosch.
- VDMA (2013): *Traktoren-Zulassungen in Deutschland (nach Klassen)*. VDMA Fachverband Landtechnik (Hrsg.).
- VETTER, H.; LICHTENSTEIN, H. (1968): Die biologische Auflösung von Unterbodenverdichtungen. *Landwirtschaftliche Forschung*, 22, 85-88.
- VOGT, E.; SCHRUF, G. (2000): *Weinbau*. 8. Auflage. Stuttgart: Ulmer Verlag.

- VON WILPERT, K.; SCHÄFFER, J. (2006): Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. *European Journal of Forest Research*, 125, 129-138.
- VOORHEES, W.B. (1992): Wheel-induced soil physical limitations to root growth. *Advances in Soil Science*, 19, 73-95.
- VORDERBRÜGGE, T.; BRUNOTTE, J. (2011): Teil II: Bewertung eines Vorschlages zur Ableitung von Vorsorgewerten gemäß der Bundes-Bodenschutzverordnung sowie der Pedotransferfunktionen zur Ableitung der „Potentiellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen (Unterboden)“ nach LEBERT (2008) als Grundlage zur „Identifizierung sensibler Gebiete“ i. S. der Bodenschutzrahmenrichtlinie (BSRRL) der Europäischen Kommissionen. *Landbauforschung Vökenrode - vTI Agriculture and Forestry Research*, 61, 1, 23-40.
- VORNKAHL, W. (1966): Anwendung theoretischer Grundlagen aus dem Grundbau in der landtechnischen Bodenmechanik. *Grundlagen der Landtechnik*, 16, 3, 114-119.
- VOßBRINK, J. (2005): Bodenspannung und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren (Dissertation). Kiel: Christian-Albrechts-Universität. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Nr. 65.
- WALG, O. (2007a): Taschenbuch der Weinbautechnik. 2. Auflage. Mainz: Fachverlag Dr. Fraund.
- WALG, O. (2007b): Behebung von Bodenverdichtungen in Rebanlagen. *Schweizer Zeitschrift für Obst- und Weinbau*, 4, 6-9.
- WALG, O. (2007c): Bodenverdichtungen analysieren und beheben. *Rebe und Wein*, 1, 15-17.
- WALKER, A. (1994): Auswirkungen des Holzrückens mit Pferdezug auf den Bodengashaushalt im Vergleich zum Harvester/Forwarder-Verfahren (Diplomarbeit). Hohenheim: Universität Hohenheim.
- WAY, T.R.; KISHIMOTO, T.; BURT, E.C.; BAILEY, A.C. (2000): Soil-tire interfaces pressures of a low aspect ratio tractor tire. In: Horn, R.; van den Akker, J.J.H.; Arvidsson, J. (Eds.): *Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences*. *Advances in GeoEcology*, 32, 82-92.
- WEISE, G. (2002): Bewertungsschema zur Bodenbelastung von Großmaschinen im Forst. *Forsttechnische Informationen (FTI)*, Zeitschrift des Kuratoriums für Waldarbeit und Forsttechnik (KWF), 1, 10-12.
- WEISE, G. (2007): Beurteilung der Steigfähigkeit von Forstmaschinen. *Forsttechnische Informationen*, 59, 9, 125-128.

- WEISE, G. (2008): Entwicklung und Einsatz von Forstreifen. LWF Waldforschung Aktuell, Magazin der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 67, 24-27.
- WEISE, G.; JIRIKOWSKI, W. (2008a): Zugkraft und Steigfähigkeit von Raupenlaufwerken. Teil 1. Forsttechnische Informationen, 60, 3/4, 29-31.
- WEISE, G.; JIRIKOWSKI, W. (2008b): Zugkraft und Steigfähigkeit von Raupenlaufwerken. Teil 2. Forsttechnische Informationen, 60, 5/6, 73-75.
- WEIßBACH, M. (1994): Wirkungen von Fahrwerken auf den Boden, insbesondere im Grenzbereich Boden/Pflanze (Dissertation). Kiel: Christian-Albrechts-Universität. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), Bd. 259.
- WEIßBACH, M. (2001): Bodenschonende Reifen für Großmaschinen und Schlepper. Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft (Hrsg.). RKL-Schrift 2.1.2.1, 339-395.
- WEIßBACH, M. (2003): Landtechnische Untersuchungen zur Wirkung bodenschonender Fahrwerke an Schleppern und Arbeitsmaschinen mit verschiedenen Radlasten (Habilitation). Kiel: Christian-Albrechts-Universität. Berlin: Logos Verlag.
- WEIßBACH, M.; WINTER, K. (1996): Großtraktoren und Raupe im Vergleich. Landtechnik, 2, 78-79.
- WENNER, H.-L.; AUERNHAMMER, H.; BOXBERGER, J.; ESTLER, M.; KROMER, K.-H.; SCHÖN, H.; STREHLER, A. (1986): Landtechnik Bauwesen. Die Landwirtschaft Band 3, Verfahrenstechniken – Arbeit - Gebäude. 8. völlig neu bearbeitete Auflage. Münster-Hiltrup (Westfalen): BLV Verlagsgesellschaft.
- WENZLAWSKI, B. (1999): Analyse von Konstruktionsmerkmalen von Raupenfahrwerken und Erstellung eines Lastenheftes für den Neubau eines Tiefsee-Raupenfahrwerks (Diplomarbeit). Siegen: Universität Siegen.
- WERNER, D. (1983): Wirkung von Verdichtungsprozessen auf Struktur und Leitfähigkeitseigenschaften des Unterbodens bindiger Substrate und Möglichkeiten ihrer meliorativen Beeinflussung. Tagungsberichte der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, 215, 17-38.
- WERNER, D.; REICH, J. (1993): Verbesserung schadverdichteter Böden durch Lockerung. Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft (Hrsg.). RKL-Schrift, 437-476.
- WERNER, D.; WERNER, B. (2001): Verdichtung und Regeneration des Gefüges eines schluffigen Tonbodens (Tschernosem): Bodenphysikalische, computertomographische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 164, 1, 79-90.

- WEYER, T.; BOEDDINGHAUS, R. (2010): Bestimmungsschlüssel zur Erkennung und Bewertung von Bodenschadverdichtungen im Feld. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen und Fachhochschule Südwestfalen, Fachbereich Agrarwirtschaft Soest (Hrsg.). Düsseldorf, Soest.
- WIERMANN, C. (1998): Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lößbürtiger Ackerstandorte (Dissertation). Kiel: Christian-Albrechts-Universität. Schriftenreihe des Institutes für Pflanzenernährung und Bodenkunde Kiel, Band 45.
- WILD, M.; DEMMEL, M.; BRANDHUBER, R.; GRONLE, A.; BÖHM, H.; LUX, G.; SCHMIDTKE, K.; BRUNS, C. (2012): Optimierung des Managements der Bodenfruchtbarkeit - Auswirkung von Bodenbelastung auf die Bodenstruktur und den Ertrag von Erbse und Hafer. In: Wiesinger, K.; Cais, K. (Hrsg.): Angewandte Forschung und Beratung für den ökologischen Landbau in Bayern. Ökolandbautag 2012, Tagungsband - Schriftenreihe der LfL, 4, 82-86.
- WILDE, T.A. (1998): Rübenernte. Wirkungen der Großmaschinen auf den Boden. Landtechnik, 53, 72-73.
- WILDE, T.A. (2000): Regeneration von Ackerböden nach starker landtechnischer Belastung (Dissertation). Kiel: Christian-Albrechts-Universität. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), Bd. 349.
- WINKOVITSCH, C. (2010): Bodenfruchtbarkeit kontra Mechanisierung? Nachhaltige Bodenbewirtschaftung. Der Winzer, 2, 12-15.
- WISSENMEIER, H. (2002): Eisenmangel-Chlorose beheben. Die Winzer Zeitung, 4, 32-33.
- WOLKOWSKI, R.; LOWERY, B. (2008): Soil compaction: Causes, concerns, and cures. Madison: Cooperative Extension Publishing. Onlineresource: <http://www.soils.wisc.edu/extension/pubs/A3367.pdf>. Abgerufen am 29.11.2013.
- WONG, J.Y. (2008): Theory of Ground Vehicles. 4. Auflage. Hoboken: Verlag Wiley & Sons.
- WONG, J.Y.; GARBER, M.; PRESTON-THOMAS, J. (1984): Theoretical Prediction and Experimental Substantiation of the Ground pressure Distribution and Tractive Performance of Tracked Vehicles. In: Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, Part D, Transport Engineering, 198, D15.
- WÜRFEL, T.; VETTER, R.; UNTERSEHER, E.; ELSÄSSER, M. (2002): Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen. Merkblätter für die umweltgerechte Landbewirtschaftung, Nr. 25. Ackerbau, Bodenschutz, Grünland. Rheinstetten: Landesanstalt für Pflanzenbau.

- YAVUZCAN, H.G.; MATTHIES, D.; AUERNHAMMER, H. (2005): Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impact of tillage method and soil water content. *Soil & Tillage Research*, 84, 200-215.
- ZAPF, R.; KOTZI, J. (1997): Mechanische Bodenbelastung durch die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion in Bayern. Flächenbezogene Quantifizierung des bewirtschaftungsbedingten Bodenverdichtungspotentials auf Ackerland. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (LBP) Nr. 7.
- ZELEENIN, A.N. (1950): Basic Physics of the Theory of Soil Cutting. Akademia Nauk USSR: Moscow (NIAE-Translation).
- ZIEGLER, B. (2012): Bodenpflege im Weinbau. Weinbau Informationen. Publikation des Dienstleistungszentrums Ländlicher Raum Rheinpfalz, Broschüre. Selbstverlag: Neustadt.
- ZIMA, S. (2002): Das rollende Rad, Friedberger Hochschulschriften Nr. 12, Friedberg: Technische Hochschule Mittelhessen.

10 Anhang

Aufgrund des großen Umfangs sind die einzelnen Anhänge der vorliegenden Dissertation in digitaler Form auf CD-ROM beigefügt bzw. als digitaler Anhang in Form eines ZIP-Archivs über den Hochschulschriftenserver der Justus-Liebig-Universität (Gießener Elektronische Bibliothek; GEB) abrufbar (Abb. 104).

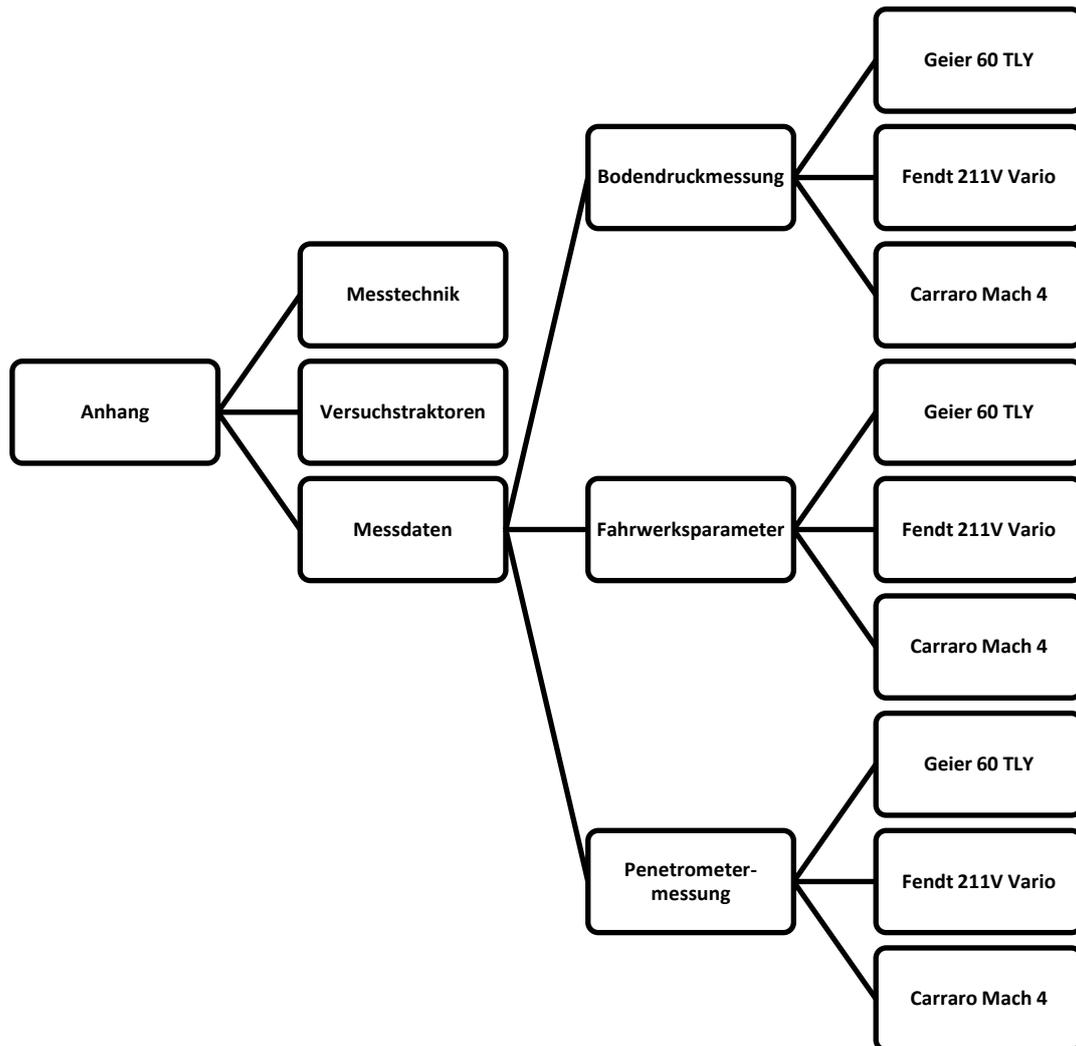


Abb. 104: Systematik der Datenablage der Anhänge auf der CD-ROM.

Die GEB ist unter dem Hyperlink <http://geb.uni-giessen.de/geb> abrufbar.

11 Danksagung

Nach Abschluss der vorliegenden Arbeit gebührt mein aufrichtiger Dank all denjenigen Menschen, welche in besonderem Maße zu deren Gelingen beigetragen haben.

Besonders danken möchte ich Herrn Professor Dr. Hans-Peter Schwarz, dem Leiter des Instituts für Technik der Hochschule Geisenheim, für die Möglichkeit der Bearbeitung des interessanten Themas und die großartige Unterstützung und Betreuung während des gesamten Zeitraums der Arbeit.

Daneben gilt mein Dank den Herren Professoren Dr. Bernd Honermeier und Dr. Günter Leithold, aus den Instituten Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung I und II der Justus-Liebig-Universität Gießen, für Ihre Bereitschaft die vorliegende Arbeit als Gutachter zu bewerten.

Dem gesamten Team des Instituts für Technik der Hochschule Geisenheim, allen voran Herrn Reinhold Müller und Herrn Dr. Rainer Keicher, möchte ich für die vielseitige technische, methodische und personelle Unterstützung im Rahmen der Versuchsplanung und Versuchsdurchführung danken.

Auch möchte ich die Gelegenheit nutzen und mich bei Herrn Professor Dr. Thomas Rademacher, Professur für Agrartechnik, der Fachhochschule Bingen für die unterstützende fachliche Begleitung und die konstruktiven Gespräche im Rahmen der Themenbearbeitung bedanken.

Herrn Dr. Hubertus Peil danke ich für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse.

Mein Dank gilt ebenso der Familie Gerharz-Hochthurn, für deren Bereitschaft ihre gesamte weinbautechnische Ausstattung für die Bewirtschaftung der Versuchsfläche zur Verfügung zu stellen und für die Möglichkeit, die verschiedenen Versuchsfahrzeuge einschließlich Messtechnik stets sicher und in unmittelbarer Nähe des Versuchsstandorts unterbringen zu können.

Herrn Klaus Hattemer danke ich für die Überlassung der Versuchsfläche in Gau-Algesheim im Jahr 2012.

An dieser Stelle möchte ich auch meiner gesamten Familie und insbesondere meiner Frau Judith und meiner Mutter Annette meinen besonderen Dank aussprechen. Sie alle haben die Entstehung dieses Werkes in allen Phasen begleitet, mich stets in meiner Arbeit bestärkt und mich mit jeder möglichen Unterstützung bedacht.

Gau-Algesheim, im Oktober 2014

gez. Christian Fischer

12 Eidesstattliche Versicherung

Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der "Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis" niedergelegt sind, eingehalten.

Gau-Algesheim, 02. Juni 2014

gez. Christian Fischer

Ort, Datum, Unterschrift