

Jörg Hittenbeck

**Entwicklung eines Grenzneigungsmodells
für selbstfahrende Arbeitsmaschinen
in der Forstwirtschaft**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

**Entwicklung eines Grenzneigungsmodells für
selbstfahrende Arbeitsmaschinen in der Forstwirtschaft**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von Jörg Hittenbeck

geboren in Bassum

Göttingen, im Juni 2009

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2009

Zugl.: Göttingen, Univ. Diss., 2009

978-3-86955-055-8

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Heribert Jacke
2. Berichterstatter: Prof. Dr. Christoph Kleinn

Tag der mündlichen Prüfung: 03.Juli 2009

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2009

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2009

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-055-8

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand an der Abteilung Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie der Georg-August-Universität Göttingen im Rahmen eines vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) geförderten Forschungsprojektes (Förderkennzeichen 22027605).

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. H. Jacke für die Idee zu diesem Forschungsvorhaben und die stete Unterstützung von der Beantragung über die ersten Versuche bis zum Abschluss in Form der vorliegenden Arbeit. Bei der Diskussion anfallender Probleme sind viele konstruktive Anregungen und wertvolle Ideen entstanden, die für die Umsetzung des Themas sehr hilfreich waren. Herrn Prof. Dr. C. Kleinn danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Der Arbeitsgemeinschaft forstwirtschaftlicher Lohnunternehmer in Niedersachsen e.V. (AfL) gebührt mein Dank für die Unterstützung des Forschungsvorhabens durch die Bereitstellung des AfL-Schulungsforwarders über den Mitgliedsbetrieb FoWi Holzeinschlag- und Holzhandelsunternehmen GmbH & Co. KG. Trotz der Einschränkungen und Risiken, die mit dem Verleih einer Forstmaschine verbunden sind, konnte ich mir der Unterstützung durch Michael Haarhaus und seine Mitarbeiter stets sicher sein. Von dieser Zusammenarbeit haben sowohl ich als auch das Forschungsprojekt profitiert.

Besonderer Dank gilt den Mitarbeitern der Abteilung Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie (ifa) für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die immer hilfsbereite Unterstützung in vielen Lebens- und Arbeitslagen. Einen großen Beitrag leistete Dietmar Weber, der bei der technischen Umsetzung der Verzögerungstechnik und für den Einsatz der Messtechnik viele Ideen mit entwickelte und umsetzte. Axel Quentin hat dagegen bei der Bewältigung größerer und kleinerer Schwierigkeiten bei der modernen Datenverarbeitung geholfen. Bei unterschiedlichsten Aufgaben von der Mitarbeit bei Außenversuchen bis zur Dateneingabe konnte ich mir stets der Unterstützung durch Jutta Bielefeld und Christhilde Bobbert sicher sein und bedanke mich hierfür herzlich. Gleiches gilt für Arne Sengpiel und Tanja Kern, die mir bei administrativen Fragen der Projektbearbeitung zur Seite standen. Besonders erwähnt sei Dr. Dirk Drewes, der sich besonders in schwierigen Phasen stets als wertvoller Ratgeber erwies. Dank gilt auch Henrik Brokmeier für die Diskussionen während unserer zahlreichen Laufrunden durch die Wälder Göttingens.

Für das gewissenhafte Korrekturlesen der verschiedenen Manuskriptstadien bedanke ich mich herzlich bei meiner Frau Anika sowie meinem Schwiegervater Heinrich Roloff, der mit seinem kritischen Blick zum sprachlichen Erfolg der Arbeit beigetragen hat.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich immer uneingeschränkt unterstützt hat. Insbesondere meine Frau Anika und unser Sohn Till mussten in der Endphase viel der gemeinsamen Zeit opfern und daher widme ich Ihnen diese Arbeit.

Göttingen, im Juni 2009

Jörg Hittenbeck

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
1 Einführung	1
1.1 PROBLEMSTELLUNG.....	1
1.2 BEFAHRUNG UND BODEN.....	3
1.3 HOLZERNTEN IN STEILEN LAGEN.....	7
1.4 ZIELSETZUNG.....	11
2 Ausgewählte Aspekte der Fahrzeugmobilität bei Geländefahrt	13
2.1 FAHRZEUGZUGKRAFT.....	13
2.2 ANTRIEBSSCHLUPF.....	15
2.3 TRAKTIONSBEIWERTE VS. SCHLUPF.....	17
2.4 HANGABTRIEBSKRAFT.....	19
2.5 RECHNERISCHE BESTIMMUNG VON GRENZNEIGUNGEN.....	20
3 Material und Methoden	22
3.1 VERSUCHSAUFBAU.....	22
3.2 VERSUCHSABLAUF.....	23
3.2.1 Ebene Lagen.....	23
3.2.2 Hanglagen.....	24
3.3 BODENKUNDLICHE UNTERSUCHUNGEN.....	24
3.3.1 Einführung.....	24
3.3.2 Standortansprache.....	25
3.3.3 Volumetrischer Bodenwassergehalt (FDR-Sonde).....	26
3.3.4 Scherfestigkeitsmessung.....	27
3.3.5 Laboruntersuchungen.....	29
3.4 VERSUCHSBESTÄNDE.....	30
3.4.1 Überblick / Hintergrund.....	30
3.4.2 Rfö Reinhausen (NFA Reinhausen).....	31
3.4.3 Rfö Goseplack (NFA Münden).....	32
3.4.4 Rfö Bursfelde (NFA Münden).....	32
3.4.5 Rfö Kapellenfleck (NFA Lauterberg).....	33
3.5 VERSUCHSFAHRZEUG.....	33
3.5.1 Ponsse S10.....	33
3.5.2 Motor und Fahrtrieb.....	34
3.5.3 Fahrwerk.....	35
3.6 DATENERFASSUNG.....	37
3.6.1 Einführung.....	37
3.6.2 Netzteil und Kommunikationsprozessor.....	38
3.6.3 Zugkraftaufnahme.....	38
3.6.4 Geschwindigkeiten.....	40
3.7 VERZÖGERUNGSTECHNIK.....	43
3.7.1 Grundaufbau.....	43
3.7.2 Grundrahmen.....	43

3.7.3 Seiltrommel.....	44
3.7.4 Aufspulmotor und Bremse.....	45
3.7.5 Steuerung.....	46
4 Datenanalyse.....	48
4.1 DATENVORBEREITUNG.....	48
4.2 DATENAUFBEREITUNG.....	49
4.2.1 Einführung.....	49
4.2.2 Gleitende Mittelwerte.....	49
4.2.3 Korrigierte Radumfangsgeschwindigkeiten.....	50
4.2.4 Hangneigungskorrektur.....	51
4.2.5 Berechnung zusätzlicher Variablen	52
4.2.6 Variablenrecodierung.....	53
4.3 ARTEFAKTBEREINIGUNG.....	54
4.3.1 Hintergrund	54
4.3.2 Mindestradgeschwindigkeit.....	55
4.3.3 Mindestfadengeschwindigkeit	56
4.3.4 Fehlerhafte Datensätze.....	56
4.3.5 Besonderheiten der Traktionsmessungen.....	56
4.3.6 Besonderheiten der Validierungsmessungen.....	59
4.4 DATENSÄTZE.....	60
4.4.1 Hintergrund.....	60
4.4.2 Aggregierte Datensätze.....	60
4.4.3 Ebenendaten.....	61
4.4.4 Hangdaten.....	62
4.5 EXEMPLARISCHE DATENANSICHT.....	63
4.5.1 Kurvenverläufe.....	63
4.5.2 Traktions-Schlupf-Kurven.....	65
4.6 AUSGLEICHSFUNKTION.....	66
5 Ergebnisse.....	68
5.1 DATENGRUNDLAGE.....	68
5.1.1 Einführung.....	68
5.1.2 Traktionsmessungen.....	68
5.1.3 Hangmessungen.....	69
5.2 EINFLUSSFAKTOREN.....	70
5.2.1 Einordnung der Einflussfaktoren.....	70
5.2.2 Maschinenparameter.....	71
5.2.3 Bestandesparameter.....	73
5.2.4 Bodenparameter.....	76
5.3 TRAKTIONSMESSUNGEN.....	81
5.3.1 Traktions-Schlupfkurven.....	81
5.3.2 Alternative Ausgleichsdatsätze.....	96
5.4 HANGNEIGUNGSPROGNOSE.....	99
5.4.1 Einführung.....	99
5.4.2 Einflussfaktoren.....	100

5.4.3 Entwicklung eines Grenzneigungsmodells	108
5.4.4 Modelldarstellung.....	111
5.5 VALIDIERUNGSMESSUNGEN IN HANGLAGEN.....	112
5.5.1 Einführung.....	112
5.5.2 Exemplarische Datenbeschreibung.....	113
5.5.3 Überprüfung der Grenzneigungsprognosen.....	115
6 Diskussion.....	120
6.1 ERHEBUNGSMETHODIK.....	120
6.1.1 Traktionsmessungen.....	120
6.1.2 Validierungsfahrten.....	126
6.1.3 Bodenerhebungen.....	128
6.2 DATENVERARBEITUNG.....	132
6.2.1 Datenaufbereitung.....	132
6.2.2 Datenauswahl / Artefaktbereinigung.....	133
6.2.3 Fazit der Datenverarbeitung.....	134
6.3 EBENENAUSWERTUNG.....	135
6.3.1 Traktionsmessungen / Punktwolken.....	135
6.3.2 Vergleich Rad-, Bänder- und Raupenfahrwerk.....	139
6.3.3 Einflussfaktoren auf das Traktionsverhalten.....	140
6.3.4 Prognosemodelle.....	151
6.4 HANGAUSWERTUNG.....	154
6.4.1 Überprüfung der Neigungsprognosen.....	154
6.5 KONSEQUENZEN.....	155
6.5.1 Hochmechanisierte Holzernte in Hanglagen.....	155
6.5.2 Technische Zusatzanforderungen in Hanglagen.....	157
7 Zusammenfassung.....	159
8 Summary.....	161
9 Literaturverzeichnis.....	163
10 Anhang.....	I

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bodenverformung und Gleiten in der Kontaktfläche eines Schlepperreifens (9-40) bei verschiedenem Schlupf; I: Lage der Gipsstränge vor der Befahrung, II Lage der Gipsstränge nach der Befahrung (nach Söhne, 1952a).....	5
Abbildung 2: Verlauf der Traktionsbeiwertkurve bei unterschiedlicher Festlegung des Radumfangs; I: Traktions-Schlupfkurve mit positiven Traktionsbeiwerten bei 0 % Schlupf, II: Traktions-Schlupfkurve durch den Ursprung, III: Traktions-Schlupfkurve schneidet Abszisse bei positivem Schlupf.....	16
Abbildung 3: Exemplarische Verläufe von Traktionsbeiwerten (Reibungszahlen) über dem Schlupf für verschiedene Untergründe (nach Zomotor, 1991).....	17
Abbildung 4: Auf Fahrzeuge wirkende Kräfte bei der Befahrung von Steigungen (nach Jacke und Drewes, 2004).....	19
Abbildung 5: Verzögerungstechnik für Zugkraftmessungen an Forstmaschinen in aufgebautem Zustand (Eigenkonstruktion des ifa).....	22
Abbildung 6: Messung des Bodenwassergehalts mit der Theta Probe ML2x und dem Handauslesegerät.....	27
Abbildung 7: Scherfestigkeitsmesser mit halb versenkter Messvine	28
Abbildung 8: Entnahme einer Mineralbodenprobe mit Hilfe eines Stechzylinders (250 cm ³).....	29
Abbildung 9: Lage der Versuchsrevierförstereien im Südniedersächsischen Bergland	31
Abbildung 10: Versuchsvorwader Ponsse S10 mit Ketten und Bändern sowie montierter Messtechnik.....	34
Abbildung 11: MGCsplit Messtechnik (bestehend aus Netzteil, Kommunikationsprozessor und 2 Messverstärkermodulen) in der Fahrerkabine eines Raupenharvesters	38
Abbildung 12: Zugkraftmessdose montiert zwischen dem Versuchsvorwader und der Umlenkrolle zur Reduktion der Seilkräfte durch das „Flaschenzugprinzip“	39
Abbildung 13: Spill-Konstruktion zur Erfassung der tatsächlichen Geschwindigkeit.....	41
Abbildung 14: Montage der inkrementalen Drehgeber in der Verlängerung der Radachsen zur Messung der theoretischen Geschwindigkeit.....	42
Abbildung 15: Technischer Teil der Verzögerungstechnik bestehend aus Elektromotor, Seiltrommel und Bremsanlage montiert auf dem Grundrahmen.....	43
Abbildung 16: Eingabemaske des am ifa geschriebenen Programms CAT2ASC.....	48
Abbildung 17: Exemplarische Traktionsbeiwerte über dem Schlupf vor der Artefaktbereinigung	54
Abbildung 18: Exemplarische Traktionsbeiwerte über dem Schlupf nach der Beschränkung auf eine Mindestradumfangsgeschwindigkeit von 0,2 m/s.....	55
Abbildung 19: Exemplarische Traktionsbeiwerte über dem Schlupf nach der Beschränkung auf einen Maximalschlupf von 98 %.....	57
Abbildung 20: Exemplarische Traktionsbeiwerte über dem Schlupf nach der Beschränkung auf ansteigende Schlupfwerte	58
Abbildung 21: Verlauf der Radumfangs- (blau) und Fadengeschwindigkeit (grün) für einen exemplarischen Zeitausschnitt von 125 s.....	63
Abbildung 22: Verlauf der Schlupfwerte für einen exemplarischen Zeitausschnitt von 125 s.....	64
Abbildung 23: Verlauf der Traktionsbeiwerte für einen exemplarischen Zeitausschnitt von 125 s	65
Abbildung 24: Punktwolke aus Traktionsbeiwerten und Schlupf für einen exemplarischen Zeitausschnitt von 125 s.....	66
Abbildung 25: Punktwolke aus Schlupf und Traktionsbeiwert für die Konfiguration 0 bei 34,8 % Bodenwassergehalt.....	82

Abbildung 26: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei 34,8 % Bodenwassergehalt.....	83
Abbildung 27: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 1 bei 32,1 % Bodenwassergehalt.....	85
Abbildung 28: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 2 bei 37,6 % Bodenwassergehalt.....	87
Abbildung 29: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 2 bei 37,6 % Bodenwassergehalt.....	89
Abbildung 30: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 4 bei 27,6 % Bodenwassergehalt.....	90
Abbildung 31: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 5 bei 45,8 % Bodenwassergehalt.....	92
Abbildung 32: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 6 bei 43,9 % Bodenwassergehalt.....	93
Abbildung 33: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 15 bei 40,4 % Bodenwassergehalt und einer Zuladung von 4.000 kg.....	95
Abbildung 34: Exemplarische Punktwolke aus Schlupf und Traktionsbeiwerten vor der Reduktion auf gleichbesetzte Schlupfstufen.....	98
Abbildung 35: Exemplarische Punktwolke aus Schlupf und Traktionsbeiwerten nach der Reduktion auf gleichbesetzte Schlupfstufen.....	98
Abbildung 36: Stufenmittelwerte und deren Ausgleich für die Konfiguration 4 bei einem Bodenwassergehalt von 29,9 %.....	99
Abbildung 37: Punktwolke für die Konfiguration 4 bei einem Bodenwassergehalt von 29,9 % mit Ausgleichskurve basierend auf den Stufenmittelwerten.....	99
Abbildung 38: Schlupf über der Zeit für eine (Hanglagen-) Erstbefahrung mit neuen Reifen (Konfig. 2) bei einem Bodenwassergehalt von 39,2 % und einer Steigung von 18 %.....	113
Abbildung 39: Schlupf über der Zeit für eine (Hanglagen-) Erstbefahrung mit gebrauchten Reifen (Konfig. 0) bei einem Bodenwassergehalt von 26,6 % und einer Steigung von 30 %....	114
Abbildung 40: Streuwolke aus Traktionsbeiwerten und Schlupf für drei unterschiedliche Radumfänge (grün: um 5 % reduzierter Radumfang; blau: „richtiger“ Radumfang; beige: um 5 % erhöhter Radumfang).....	121
Abbildung 41: Vergleich zwischen originären Messdaten (blau) für die tatsächliche Geschwindigkeit und den gleitenden Mittelwerten (grün).....	122
Abbildung 42: Vergleich zwischen originären Messdaten (blau) für die tatsächliche Geschwindigkeit und den gleitenden Mittelwerten (grün).....	124
Abbildung 43: Reifen mit zugesetztem Profil nach dem Versuch, eine Steigung von 28 % bei einem Bodenwassergehalt von 39,2 % zu befahren	126
Abbildung 44: Fahrspur nach Befahrung einer Steigung von 23 % mit höherem Schlupf.....	127
Abbildung 45: Exemplarische Ausgleichskurven für die drei unterschiedlichen Gruppen von typischen Kurvenverläufen (I: steiler Anstieg mit klarem Maximum; II: steiler Anstieg ohne Maximum; III flacher Anstieg ohne Maximum).....	135
Abbildung 46: Verteilung der Residuen über den vorhergesagten Traktionsbeiwerten für die Konfiguration 0.....	138
Abbildung 47: Exemplarische Ausgleichskurven für drei unterschiedliche Fahrwerkskonfigurationen (I: Radfahrwerk; II: Radfahrwerk mit Ketten und Bändern; III: Raupenfahrwerk).....	139

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verteilung der Traktionsmessungen auf die verschiedenen Maschinenkonfigurationen	69
Tabelle 2: Verteilung der Validierungsmessungen in Hanglagen auf die verschiedenen Maschinenkonfigurationen.....	70
Tabelle 3: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit der Konfiguration 0 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf $\leq 25\%$	84
Tabelle 4: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit der Konfiguration 1 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf $\leq 25\%$	86
Tabelle 5: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit der Konfiguration 2 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf $\leq 25\%$	88
Tabelle 6: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit der Konfiguration 3 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf $\leq 25\%$	89
Tabelle 7: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit der Konfiguration 4 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf $\leq 25\%$	91
Tabelle 8: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit der Konfiguration 5 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf $\leq 25\%$	93
Tabelle 9: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit der Konfiguration 6 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf $\leq 25\%$	94
Tabelle 10: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit den Konfigurationen 10 - 16 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf $\leq 25\%$	96
Tabelle 11: Mittelwerte und Standardabweichungen für den Schlupf und die Traktionsbeiwerte der zehn Schlupfstufen.....	97
Tabelle 12: Regressionsschritte der linearen, schrittweisen Regression mit 13 möglichen Einflussfaktoren (N = 52 Versuchsserien).....	102
Tabelle 13: Regressionskoeffizienten des linearen Regressionsmodells mit 13 möglichen Einflussfaktoren	103
Tabelle 14: Regressionsschritte der linearen, schrittweisen Regression mit 19 möglichen Einflussfaktoren (N = 36 Versuchsserien).....	104
Tabelle 15: Regressionskoeffizienten des linearen Regressionsmodells mit 13 möglichen Einflussfaktoren.....	106
Tabelle 16: Regressionskoeffizienten des linearen Regressionsmodells zur Bestimmung der bodenökologischen Grenzneigungen.....	108
Tabelle 17: Regressionskoeffizienten des linearen Regressionsmodells zur Bestimmung der absoluten Grenzneigungen.....	110
Tabelle 18: Grenzneigungen für den Einsatz eines Rückezuges in Hanglagen in Abhängigkeit der Maschinenausstattung und der Bodenbedingungen	111
Tabelle 19: Vergleich zwischen realisiertem Schlupf und der Grenzneigungsprognose für die Validierungsfahrten mit der Konfiguration 0.....	115

Tabelle 20: Vergleich zwischen realisiertem Schlupf und der Grenzneigungsprognose für die Validierungsfahrten mit Traktionshilfsmitteln (Konfiguration 1 und 4).....	116
Tabelle 21: Vergleich zwischen realisiertem Schlupf und der Grenzneigungsprognose für die Validierungsfahrten mit der Konfiguration 2.....	117
Tabelle 22: Vergleich zwischen realisiertem Schlupf und der Grenzneigungsprognose für die Validierungsfahrten mit reduziertem Reifeninnendruck (Konfiguration 5 und 6).....	118
Tabelle 23: Vergleich zwischen realisiertem Schlupf und der Grenzneigungsprognose für die Validierungsfahrten mit beladenem Rückezug (Konfigurationen 10 bis 16).....	118
Tabelle 24: Korrelationen des Skelettanteils mit weiteren Einflussfaktoren.....	150
Tabelle 25: Korrelationen der Variable Baender mit weiteren Einflussfaktoren.....	150

1 Einführung

1.1 Problemstellung

Der nachwachsende Rohstoff Holz erfährt seit einiger Zeit eine erheblich gesteigerte Wertschätzung in den Augen von Politik und Öffentlichkeit. Dies hängt mit den vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten sowohl für die stoffliche als auch zunehmend für die energetische Verwendung zusammen. Insbesondere letztere hat zum einen politisch motiviert, zum anderen aus ökonomischen Überlegungen ein rasantes Interesse erfahren. Die politische Beachtung zeigt sich unter anderem im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG, 2004) und der „Charta für Holz“ des BMVEL (2004). Ziel der Bemühungen um den Rohstoff Holz ist der teilweise Ersatz fossiler Energieträger sowie die langfristige CO₂-Bindung in Holzprodukten. Aus den konkurrierenden Nutzungsalternativen ergibt sich ein deutlicher Anstieg der Nachfrage in den letzten Jahren (vgl. u.a. LOBODA, 2005; ENCKE, 2007a +b). So sehen sich insbesondere Unternehmen der stofflichen Verwertung geringerwertiger Sortimente einer erheblichen Konkurrenz durch die thermische Nutzung ausgesetzt (vgl. u.a. JÖNSSON, 2007). Der Holzmarkt reagiert darauf einerseits mit einem Anstieg der Preise, während andererseits die Mobilisierung bestehender Rohholzreserven, wie sie die BWI² ausweist, forciert wird. Potentiale sind hier vor allem im Bereich der kleinstrukturierten Privatwälder sowie in den schwerzugänglichen Hanglagen der Mittelgebirge zu finden. Durch den langfristigen Anstieg der Holzpreise ist zudem mit einer Ausweitung der Holzernte auf ehemals unrentable Standorte bzw. Bestandesbedingungen zu rechnen.

Vor allem für die Beerntung schwächerer Bestände ist eine motormanuelle Aufarbeitung sehr kostenintensiv, sodass diese Eingriffe nur mit moderner hochmechanisierter Erntetechnik ökonomisch vertretbar realisiert werden können. Angesichts geringer Stückvolumina ist nicht nur die erzielbare Ernteleistung niedrig, sondern auch die möglichen Sortimente weisen nur begrenztes Wertschöpfungspotential auf. Während in Skandinavien bereits seit Mitte der 1980er Jahre verstärkt Harvester und Forwarder für die Holzernte und Holzbringung eingesetzt wurden, setzte sich die hochmechanisierte Ernte in Deutschland erst Ende des gleichen Jahrzehnts bzw. zu Beginn der 1990er Jahre durch. Erste Versuchseinsätze mit zwei verwaltungseigenen Harvestern der Niedersächsischen Landesforstverwaltung fanden 1987 statt und zeigten das Potential dieser Technik (BEHRENDT, 1988). Bereits zwei Jahre später beschreibt NARJES (1990) den niedersächsischen Harvesterbestand mit 18 Maschinen, die sich zu Zweidritteln in Unternehmerhand befinden. Insbesondere die Winterstürme „Vivian“ und „Wiebke“ im Jahreswechsel 1990/91 und die dabei geworfenen Rohholzmengen verhalfen der Kurzholz-Technologie zum deutschlandweiten Durchbruch (OHRNER ET AL., 2003). In den Folgejahren nahm der Bestand an Harvestern und Forwardern deutlich zu. Für das Jahr 1998 gehen MAHLER UND PFEIL (1998) von bundesweit ca. 600 Harvestern aus. Weitere vier Jahre später schätzen JACKE UND EBEL (2003) den Bestand an hochmechanisierter Erntetechnik auf ca. 950 Harvester und 1.800 Forwarder. Während sich die Anzahl der Forwarder nur noch leicht verändert, geben NICK UND HOFFMANN (2005a+b) einen weiteren Anstieg des Harvesterbestandes auf ca. 1.110 im Jahr 2005 an. Durch die zunehmende Ausweitung des Harvestereinsatzes auf stärkere Bestände und Laubhölzer setzt sich das Wachstum dieser Technik weiterhin fort (ARNOLD, 2002; DIETZ ET AL., 2004; ERLER, 2007; HARTKOPF, 2009). Schät-

zungen von Nick (2007) gehen für Deutschland im Jahr 2006 von ca. 1.250 Vollerntemaschinen und etwa 1.900 Rückezügen aus. Durch einen weiteren Anstieg im Neumaschinengeschäft 2007 hat sich ein Wachstum des Forstmaschinenbestandes auf ca. 1.400 Harvester und 2.100 Forwarder ergeben. Nick (2008) hält jedoch 2007 für das vorerst letzte Boomjahr der hochmechanisierten Erntetechnik. Dieser Eindruck wird durch die aktuelle Forstmaschinenstatistik für das Jahr 2008 bestätigt (KWF, 2009). Demnach ist das Neumaschinengeschäft mit Harvestern und Rückezügen um 41 % im Vergleich zum Vorjahr eingebrochen. Bereinigt um Effekte durch die Sturmauflösung im Jahr 2007, mit einem entsprechenden Plus bei den Neubeschaffungen, liegt der aktuelle Rückgang der Verkaufszahlen jedoch im vergleichbarem Rahmen mit dem übrigen Maschinenbau.

Die Entwicklung der Maschinenbestände zeigt die Bedeutung spezieller selbstfahrender Forstmaschinen für die heutige Bewirtschaftung der im Wald stockenden Holzvorräte. Im Laufe der technischen Entwicklungen haben die Eigenmassen der im Wald eingesetzten Fahrzeuge ständig zugenommen, sodass beladene Forstmaschinen auf Gesamtmassen von über 40 t kommen. Diese werden wiederum meistens über Reifen auf den Boden übertragen. Seit Anfang der 1980er Jahre wurden die daraus resultierenden negativen Auswirkungen auf den Waldboden erkannt und verstärkt wissenschaftlich untersucht (HILDEBRAND UND WIEBEL, 1982; ZANDER ET AL., 1987; SCHÄFER UND SOHNS, 1993; BENTHAUS UND MATTHIES, 1993). Bereits deutlich früher waren die Befahrungsauswirkungen und damit vornehmlich die Bodenverdichtung Thema der landwirtschaftlichen Forschung (vgl. u.a. SÖHNE 1952a+b, SOANE ET AL., 1981; TAYLOR UND BURT, 1987). Neben der im Jahresturnus erfolgenden Bewirtschaftung ist Landwirtschaft ohne den Einsatz radgebundener Maschinen heute nahezu undenkbar, während der Großmaschineneinsatz in der Forstwirtschaft sich erst im Laufe der Jahre entwickelt hat.

Neben der Beanspruchung des Bodens durch die hohen Auflasten und die resultierende Verdichtung kommt insbesondere in Hanglagen die Gefahr erhöhter Scherbelastungen in der Bewegungsrichtung der Maschinen hinzu. Die Auswirkungen der entsprechenden Schubkräfte in der Kontaktzone zwischen Reifen und Untergrund sind bereits 1952a von SÖHNE beschrieben worden. Wird der Oberboden abgeschert, kommt es zu einer Zerstörung der gewachsenen Bodenstrukturen. Die vorrangig betroffenen Poren sind für die Luft- und Wasserpermeabilität von entscheidender Bedeutung und beeinflussen das Pflanzenwachstum (vgl. u.a. WANJII ET AL., 1997). Der in Folge der zerstörten Vernetzung zum Untergrund locker aufliegende Boden ist somit verstärkt durch Erosionsvorgänge gefährdet. Insbesondere unter den Bedingungen des Mittelgebirges mit entsprechenden Geländeneigungen und höheren Niederschlagsmengen kommt es daher verstärkt zum Auswaschen der Fahrspuren.

Für die Forstwirtschaft in Hanglagen ist die Kombination aus Bodenverdichtung und Erosionspotential besonders gefährlich. Entgegen der landwirtschaftlichen Nutzung wird auf einem dauerhaften Fahrgassensystem gearbeitet und keine flächige Lockerung des Oberbodens durchgeführt. Dadurch ist das Pflanzenwachstum in den Fahrspuren entsprechend gehemmt, und die in Folge der Fahrbewegungen ausgefrästen Bodenpartikel werden nicht durch den Bewuchs an der Auswaschung gehindert. Neben der Schädigung des Kulturgutes Boden kommt es zu einer langfristigen Gefährdung der technischen Befahrbarkeit und somit der Bewirtschaftung mit hochmechanisierter Erntetechnik. Verlässliche Angaben zu den Einsatzgrenzen der radbasierten Holzernte, die

sich an den möglichen Bodenschäden orientieren, bestehen derzeit nicht. So reicht das Spektrum möglicher Einsatzbereiche von vergleichsweise geringen Geländeneigungen bis zu Steigungen, die einen sicheren Stand der Maschinen fraglich erscheinen lassen (vgl. u.a. SAUTER ET AL., 1998; BOMBOSCH ET AL., 2003a).

1.2 Befahrung und Boden

Durch die Befahrung des Waldbodens mit Maschinen, gleich welcher Art, kommt es zu einer teilweise deutlichen Beeinflussung des Untergrundes. So werden die Fahrzeugmassen zumeist über Reifen auf dem Boden abgestützt und führen dabei zu einer Verdichtung des Oberbodens. Die Beeinträchtigungen der Waldböden durch die Befahrung sind seit Beginn der 1980er Jahre in den Fokus der Forstlichen Forschung geraten und bieten auch heute noch Diskussionspotential (vgl. u.a. ZANDER, 1988; BECKER ET AL., 1989; SCHACK-KIRCHNER UND HILDEBRAND, 2009). LEUTZ ET AL. (1980) berichten mit als Erste von flächenhaften Oberbodenverdichtungen auf Lösslehmstandorten beim Einsatz schwerer Holzbringungsmaschinen. Dabei kommt es zu Veränderungen der Oberbodenstrukturen, die sich u.a. an einer erhöhten Lagerungsdichte erkennen lässt (vgl. u.a. HILDEBRAND UND WIEBEL, 1982).

Neben der offensichtlichen Spurbildung und der einfach zu erfassenden Veränderung der Lagerungsdichte sind jedoch weitere Beeinträchtigungen festzustellen, die sich auf das Pflanzenwachstum und die Bodenorganismen auswirken. Im Rahmen der Verdichtung durch Befahrung wird der Grobporenraum überproportional, im Vergleich zu natürlichen Verdichtungsfaktoren (tiefere Schichten des Bodens), verringert. Insbesondere diese Poren sind jedoch für den Sauerstoffaustausch und den Wassertransport von entscheidender Bedeutung. Der behinderte Luftaustausch reduziert die Aktivität der Bodenorganismen in den betroffenen Arealen, sodass sich oftmals ein zusätzlicher sekundärer Sackungsprozess erkennen lässt (HILDEBRAND UND WIEBEL, 1982). Die Lockerung durch die Bodenorganismen bleibt aus, und die Bildung neuer Poren ist auf ein Minimum verringert.

Die Reduktion des Grobporenraums wirkt sich neben der Sauerstoffversorgung auch auf die Wasserleitfähigkeit des Bodens aus. Durch den Verlust der größeren Zwischenräume im Boden verlangsamt sich der Wasserabfluss durch die Bodenschichten. In der Folge verstärkt sich die Sauerstoffarmut des Oberbodens, da dieser länger mit Wasser gesättigt ist. Neben dem Raumverlust für den Luftwechsel und den Wasserablauf verschärft sich die Problematik durch den zusätzlichen Einfluss auf die Verbindung der Bodenporen untereinander. Diese Kontinuität ist jedoch für den Stofftransport wichtig, und so verschlechtert deren Fehlen die Situation zusätzlich. HILDEBRAND UND WIEBEL (1982) gehen davon aus, dass die Beeinträchtigung beispielsweise der Wasserleitfähigkeit durch eine Verdichtung stärker ausfällt, als dies durch die Reduktion der Grobporen zu erklären ist. Die Verschlechterung der Porenkontinuität ist zu einem erheblichen Teil auf die dynamische Beanspruchung des Bodens durch die Überfahrung zurückzuführen. Während der Befahrung kommt es bereits im Bereich vor dem Rad zu einer Knetbewegung des Bodens in der Fahrtrichtung. Mit der folgenden vertikalen Belastung durch die Fahrzeugmasse beginnt eine weitere Verschiebung des Bodens, diesmal jedoch entgegen der Fahrtrichtung. Durch die Vielzahl der Verformungen und Verschiebungen der Bodenpartikel wird die Vernetzung der Poren

durchbrochen. Die Übergänge zwischen den einzelnen Grobporen werden mit Bodensubstrat „verkittet“. Fahrbewegungen mit hohem Schlupf, also großen Relativbewegungen in der Kontaktebene zwischen Fahrwerk und Boden, verstärken den Effekt der Porenverschmierung zusätzlich.

Grundsätzlich ergibt sich die größte Veränderung der Bodenstrukturen bei der ersten Befahrung mit zu hohen Lasten für den Boden. Jede weitere Überfahrt verstärkt die Effekte der Befahrung, sodass diese kumulativ wirkt (vgl. u.a. SÖHNE 1952a). Die Auswirkungen der veränderten Bodenstrukturen durch die Verdichtung sind leicht zu erahnen. Das Wurzelwachstum reduziert sich wegen der schlechten Versorgung mit Sauerstoff und der Schwierigkeiten in den Boden vorzudringen. Entsprechende Beschreibungen finden sich u.a. bei HILDEBRAND (1986), MATTHIES ET AL. (1995), KREMER ET AL. (2007) oder WANJI ET AL. (1997). Die Regeneration der befahrenen Bereiche beansprucht dabei sehr lange Zeiträume. HILDEBRAND UND WIEBEL (1982) konnten in Fahrspuren, die zehn Jahre nicht genutzt wurden, keine tiefgreifende biologische Lockerung durch Bodenorganismen feststellen. Der Boden hatte sich dabei nicht wesentlich verbessert bzw. von der zurückliegenden Befahrung erholt. Selbst nach 20 Jahren stellt sich nach v. WILPERT UND SCHÄFER (2006) nur eine geringe Regeneration der Böden ein. Ursache hierfür ist nach SCHACK-KIRCHNER ET AL. (1993) die räumliche Ausdehnung der Verdichtung, da die Sauerstoffversorgung von der Oberfläche erfolgt. Unter einem durch Pferdehufe starkverdichteten Boden kann dies durch die Diffusion aus den angrenzenden Bodenpartien ausgeglichen werden, während die oberflächige Verschmierung durch einen Breitreifen nicht durch entsprechende Diffusionsvorgänge kompensiert werden kann.

Im Rahmen der kostendeckenden Holzernte ist eine Befahrung des Waldbodens heute kaum mehr zu vermeiden. Da die Regeneration der resultierenden Schäden jedoch sehr lange Zeiträume benötigt, setzt man in der Forstwirtschaft auf ein dauerhaftes Erschließungssystem der Bestände. Die schädigende Wirkung wird somit auf die Bereiche der Rückegassen beschränkt, während der übrige Bestand nicht befahren wird. Für die Anlage des Erschließungsnetzes ist jedoch je nach den örtlichen Bedingungen sehr viel Sorgfalt erforderlich, um die Schäden für Boden und Bestand zu minimieren. Spätere Anpassungen an die jeweiligen (Einsatz-) Bedingungen und somit Veränderungen an diesem Netz sind nicht vorgesehen. Welche langfristige Bedeutung der geplanten und organisierten Befahrung der Waldböden beigemessen wird, zeigen die Bemühungen von GEHLERT ET AL. (2006), alte Fahrgassen aufzuspüren und diese in die neuen Erschließungssysteme zu integrieren. Im Rahmen eines größeren Forschungsprojektes durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) wurden unterschiedliche Methoden zur Erkennung alter Befahrungslinien getestet und bewertet (HILDEBRAND, 2008). Neben der direkten optischen Ansprache anhand der Verformung geben Weiserpflanzen (GAERTIG UND GREEN, 2008) und auch chemische Prozesse (CLEMENS, 2008) Hinweise auf die Verdichtungsschäden früher befahrener Bereiche.

Zusätzlich zum organisatorischen Lösungsansatz (dauerhaftes Erschließungssystem) werden auch auf technischer Seite Maßnahmen getroffen, die den Einsatz schwerer Forstmaschinen bodenschonender gestalten. Hier sind vor allem die Verwendung von Breitreifen und die Reduktion des Reifeninnendrucks zu nennen (MATTHIES UND ZIESAK, 2001). Sowohl breitere Reifen als auch ein reduzierter Fülldruck sind geeignet, die Kontaktfläche zwischen Reifen und Untergrund zu vergrößern und so den auf den Boden wirkenden Druck zu mindern (vgl. u.a. JACKE, 1989; BENTHAUS UND MATTHIES, 1993; JACKE, 1999). Erste Versuche zur Bestimmung des Kontaktflächendrucks für typi-

sche Forstreifen sind bei MATTHIES UND KREMER (1999) beschrieben, die ein Informationssystem zur bodenökologischen Befahrung von Waldstandorten entwickelt haben (vgl. a. ZIESAK UND MATHIES, 2001; ZIESAK, 2004). Dabei zeigte sich, dass die Bestimmung des Kontaktflächendrucks über die Abdrucksfläche des Reifens und die Auflast zu geringeren Werten führt, als dies in der Praxis der fall ist. Ursache ist die Annahme, dass sich der Druck gleichmäßig in der Fläche verteilt. Messungen der realen Druckverteilung unter Forstreifen finden sich bei JACKE UND EBEL (2006a-f) und bei EBEL (2006). Dabei wird deutlich, dass der Kontaktflächendruck massgeblich durch die Auflast und den Fülldruck bestimmt wird. JACKE UND EBEL (2006f) weisen daraufhin, dass die ökologisch und ökonomisch-technische Bewertung einer Bereifung stets vor dem Hintergrund der Betriebsbedingungen der Arbeitsmaschinen getroffen werden muss und nicht an der Reifenbezeichnung festgemacht werden kann.

Neben der beschriebenen Verdichtung des Oberbodens geht mit der Befahrung eine zusätzliche Belastung der Bodenstrukturen durch horizontal übertragene Kräfte in der Kontaktfläche einher. Diese Kräfte entstehen unweigerlich bei der Fortbewegung der Maschinen. Bei angetriebenen Rädern ist die Kraft entgegen der Fahrtrichtung gerichtet, während sich für bremsende, und hierzu zählen auch nicht angetriebene Räder, eine Kraftübertragung auf den Boden in Richtung der Bewegung ergibt. Die für die Mobilität erforderliche Zugkraft wird gegen den Boden abgestützt und führt zu Schubkräften im Interaktionsraum zwischen Reifen / Fahrwerk und dem Untergrund. Ebenso wie die vertikalen Gewichtskräfte verursachen die horizontalen „Schubkräfte“ als Gegenkraft zur Radzugkraft der Maschine eine Verformung des Bodens in der Wirkrichtung der Kraft. Bei steigenden Kräften nehmen diese Bodenverformungen zu und gehen in ein stärkeres Gleiten in der Kontaktfläche über.

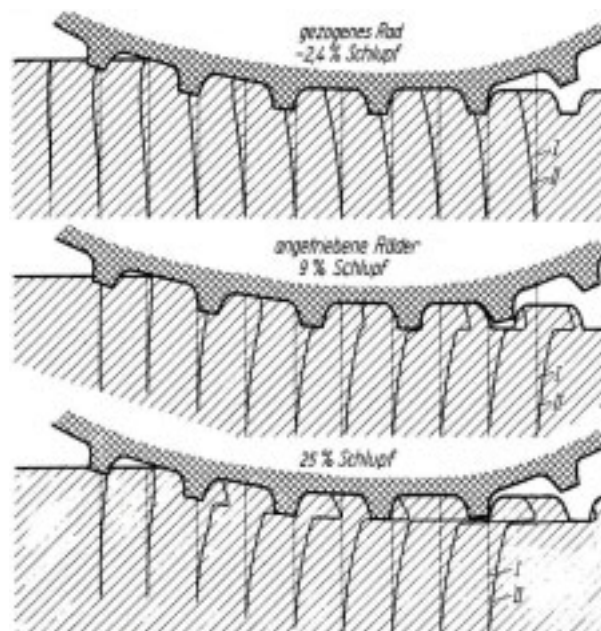


Abbildung 1: Bodenverformung und Gleiten in der Kontaktfläche eines Schlepperreifens (9-40) bei verschiedenem Schlupf; I: Lage der Gipsstränge vor der Befahrung, II Lage der Gipsstränge nach der Befahrung (nach SÖHNE, 1952a)

Um die Bodenverformung und das Gleiten des Reifens in der Kontaktfläche zu untersuchen, hat SÖHNE (1952a) die Verformung durch Gipsstränge im Boden sichtbar gemacht. Abbildung 1 zeigt

die in einer Bodenrinne gewonnenen Ergebnisse für drei unterschiedliche Fahrzustände. Es handelt sich dabei zum einen um ein gezogenes Rad mit einem negativen (Brems-) Schlupf von 2,4 %, zum anderen um ein angetriebenes Rad bei 9 % und 25 % Schlupf. Die Linien I beschreiben dabei die Lage der Gipsstränge vor der Befahrung, die Linien II den Verlauf während der Befahrung. Es zeigt sich für alle Varianten, dass die Bodenverformung am stärksten im bereits überfahrenen Bereich ist.

Nimmt man die von SÖHNE (1952a) ebenfalls ermittelten Relativwege zwischen Reifen und Boden in der Kontaktfläche mit hinzu, so wird deutlich, dass sich die stärksten Scherbewegungen und damit Verformungen von Reifen und Boden in der Mitte der auslaufenden Kontaktfläche des Reifens ergeben. Ursache hierfür ist die Gewichtsentlastung in diesen Bereichen. Im Zentrum der Kontaktfläche ergibt sich die „Druckentlastung“ durch eine für viele Reifen festzustellende Abstützung über die Reifenflanken und eine damit verbundene relative Entlastung in der Reifenmitte (SÖHNE, 1952a). Der Bereich der auslaufenden Kontaktfläche befindet sich im Übergang zwischen belastetem Bodenkontakt und freiem Drehen ohne Zugkraftübertragung. In diesem Bereich werden die elastischen Verformungen des Reifens, verursacht durch die zu übertragende Zugkraft, wieder abgebaut mit der Folge entsprechend hoher Relativwege. Die Gleitzonen nehmen erwartungsgemäß mit steigendem Schlupf zu und umfassen bei 25 % Schlupf bereits über die Hälfte der Aufstandsfläche. Dabei werden die in der Fahrspur sichtbaren Blöcke aus dem Profilstollenzwischenraum abgeschert. Diese nahezu lose auf dem Boden aufliegenden Blöcke können „sich“ bei stärkerem Regen oder der Bildung von Wasserrinnen in der Fahrspur nicht halten und werden ausgewaschen. Durch wiederholte Befahrung mit „gleitender Bewegung“, also erhöhtem Rad-schlupf in der Reifen-Boden-Kontaktfläche, entstehen ausgefräste Fahrspuren, die sehr anfällig für Erosion insbesondere durch Wasser sind.

Noch deutlicher als die statischen Belastung durch die Fahrzeugmassen wirkt sich zudem die beschriebene Scherbelastung des Bodens bei der Befahrung mit Schlupf auf die Porenkontinuität im Oberboden aus. Neben den abgescherten Bodenpartikeln, die jegliche Vernetzung zum Untergrund verloren haben, kommt es im Bereich der Kontaktzone zwischen Reifen und Boden zur Verschmierung der Bodenporen in Folge der Gleitbewegungen. Durch den reduzierten Wasserabfluss sind die aufliegenden Bodenpartikel verstärkt durch Erosionsvorgänge gefährdet.

Da es sich bei Scherbelastung um die „Gegenkraft“ der Fahrzeugzugkräfte handelt, nimmt die Belastung des Bodens mit steigendem Zugkraftbedarf zu. Während Harvester und Forwarder (als tragende Arbeitsmaschinen) unter günstigen Geländevoraussetzungen nur die eigene Mobilität sicherstellen müssen, erhöht sich die Scherbeanspruchung des Bodens bei ziehenden Fahrzeugen oder wenn die Geländebedingungen höhere Radumfangskräfte erfordern. Letzteres trifft somit auch auf Maschinen der hochmechanisierten Holzernte zu, wenn diese in Hanglagen eingesetzt werden.

Zur Schonung des Bodens sollte die Scherbelastung auf ein Minimum reduziert werden. Da die Scherbeanspruchung gleichbedeutend mit dem Antriebsschlupf der eingesetzten Maschinen ist, gilt entsprechendes für den Schlupf. Technische Möglichkeiten, den Schlupf bei gleichbleibender Zugkraft zu reduzieren, bieten sich beispielsweise durch die Absenkung des Reifeninnendrucks oder die Montage von Traktionshilfsmitteln. Die positive Wirkung reduzierter Fülldrücke auf das Traktionsverhalten ist vielfach beschrieben (vgl. u.a. ZOZ UND TURNER, 1994; LÖFGREN ET AL., 1997;

PYTKA ET AL., 2006) und bereits im Rahmen eigener Untersuchungen bestätigt worden (JACKE ET AL., 2004; HITTENBECK, 2004; 2007a; 2008). Im Falle der Innendruckabsenkung vergrößert sich die Aufstandsfläche des Reifens, und somit wird die Kraftübertragung auf den Boden verbessert. Gleiches gilt für die Montage von Bändern, da sich eine zusätzliche Abstützung der Maschinenmasse im Bereich zwischen den Rädern eines Bogies ergibt. Trotz der damit verbundenen Erhöhung der Eigenmasse verringert sich als positiver Nebeneffekt der Schlupfreduktion durch Bänder oder die Reduktion des Reifenfülldrucks der Bodendruck der Maschinen.

1.3 Holzernte in steilen Lagen

Durch die Ausweitung der agrarwirtschaftlichen Nutzung wurde Wald bis ins letzte Jahrhundert in Lagen verdrängt, die eine landwirtschaftliche Verwendung nicht lohnend bzw. technisch nicht möglich erschienen ließ. Für den Wald bedeutete dies einen menschlich gesteuerten „Rückzug“ auf Standorte mit niedriger Ertragsfähigkeit oder Gebiete, die durch ihre Lage nicht wirtschaftlich zu bearbeiten waren. Letzteres trifft vor allem auf Hanglagen zu, da diese mit Gerätschaften oder mit Hilfe von Zugtieren nur unter erschwerten Bedingungen bewirtschaftet werden können. Die seinerzeit durch Handarbeit geprägte Forstwirtschaft bereitete hier geringere Probleme und konnte bis weit in die Mitte des letzten Jahrhunderts für eine profitable Nutzung dieser Flächen sorgen. Mit dem Preisanstieg für menschliche Arbeitskraft in den sogenannten Hochlohnländern stellen arbeitsintensive Verfahren die ökonomische Nutzung der aufstockenden Bestände zunehmend in Frage (DUFFNER, 2003; JACKE, 2004). Dies gilt insbesondere dann, wenn bei Durchforsteingriffen die relativ kostengünstige hochmechanisierte Holzernte (aus der Kombination von Harvester und Forwarder) an ihre technischen Grenzen stößt.

Im Zuge einer zunehmenden Nachfrage nach dem nachwachsenden Rohstoff Holz gerät auch die Holzernte in Hanglagen verstärkt in den forstlichen Fokus, wie speziell dafür entwickelte Maschinen zeigen (HEIL, 1999; FORBRIG ET AL., 2004; STUHLMANN UND FINDEISEN, 2009). In den Mittel- und Hochgebirgslagen ist die Holzernte eine aus ökonomischen und ökologischen Aspekten sowie vor dem Hintergrund der Bestandesstabilität eine wichtige, jedoch häufig vernachlässigte Tätigkeit (BACHER-WINTERHALLER ET AL., 2007). Ursache hierfür sind die je nach Geländebedingungen erforderlichen Arbeitssysteme, die sich oftmals durch vergleichsweise hohe Kosten bei geringer Produktivität sowie erhöhte ergonomische Belastungen für den Arbeiter auszeichnen. Um eine intensivere Nutzung nachhaltig produzierten Holzes aus einheimischen Wäldern zu verstärken, wie es das BMVEL (2004) in der „Charta für Holz“ fordert, ist jedoch eine Nutzung der in Hanglagen stockenden Holzreserven notwendig. Mit Anpassungen der bestehenden Erntetechnik oder technischen Neuentwicklungen stellen sich immer mehr Forstmaschinenhersteller den Anforderungen einer ökonomischen Holzernte in Hanglagen. Darüber hinaus gibt es Experten, die eine Ausweitung der hochmechanisierten Holzernte mit Standard-Radmaschinen propagieren. Neben den Belastungen für die Bediener solcher Maschinen stellt sich dabei oftmals die Frage, inwieweit die angegebenen Grenzen für unterschiedliche Fahrwerkskonfigurationen einer terramechanischen Überprüfung stand halten.

Das Spektrum der angegebenen Grenzneigungen für den Einsatz von Radfahrwerken, wie bei den meisten Forstspezialmaschinen üblich, reicht von 30 % bis hin zu Werten von 60 % bei aus-

gespröchen guten Rahmenbedingungen. Ein genauer Blick zeigt jedoch, dass die getroffenen Angaben vorwiegend auf subjektiven Einschätzungen beruhen und oftmals nur die Versuchsbedingungen einzelner Kurzstudien widerspiegeln. Belastbare Neigungsangaben aufgrund terramechanischer Betrachtungen oder Versuche fehlen dabei gänzlich.

Einigkeit herrscht dabei unter den meisten Autoren über die Unterscheidung zwischen Forwardern und Harvestern (HEINIMANN, 1999; HEIL, 1999; STAMPFER ET AL., 2001; FEHRLE, 2006; LWF 2004; FORBRIG ET AL., 2004). Es wird einheitlich davon ausgegangen, dass Harvester größere Neigungen bewältigen können. Ursache hierfür ist die Schädigung des Bodens durch die wiederholte Befahrung durch den Forwarder (vgl. u.a. SPRENGER 2001), die zu einer Reduzierung der maximalen Steigungsangabe führt. STAMPFER (2002) fordert daher, wie FORBRIG ET AL. (2004), eine Beschränkung auf Neigungen bis 30 %, wobei FORBRIG ET AL. (2004) in der forstlichen Praxis von regelmäßigen Überschreitungen dieser Grenze ausgehen. Etwas mehr Vertrauen in die Fähigkeiten eines Radfahrwerkes haben HEINIMANN (1999), LWF (2004), CONRAD UND KREBS (2005), FEHRLE (2006) sowie BACHER-WINTERHALLER ET AL. (2007), die allesamt eine Grenze von 35 % vorgeben. HEINIMANN (1999) sieht in diesem Neigungswert eine ökonomische und ökologische Limitierung ohne Einschränkungen, während BACHER-WINTERHALLER ET AL. (2007) unter den gleichen Bedingungen eine Lastfahrt mit dem Forwarder nur noch Hang abwärts vorsehen. HEIL (1999), SPRENGER (2001) und WSL (2003) machen keine Einschränkungen bei der Angabe der Grenzneigungen für den Forwardereinsatz mit 40 %. Bei HEIL (1999) und WSL (2003) scheinen sogar Hanglagen bis 50 % unter besonderen Bedingungen befahrbar, wobei hierfür auf einen sogenannten Hangforwarder des Typs HEMEK 800 bzw. auf die Verwendung von Ketten und Bändern hingewiesen wird. Die höchsten Angaben finden sich für den Forwardereinsatz bei SAUTER ET AL. (1998) und in einer gemeinsamen Studie verschiedener Organisationen um die FAO (JOINT COMMITTEE, 1971; vgl. HEINIMANN, 1999). Die jeweils angegebenen Neigungswerte von 50 % (normale Bedingungen) und 60 % beziehen sich dabei jedoch lediglich auf die Arbeit entsprechend der Gefällerrichtung. SAUTER ET AL. (1998) geben für die 60 % Neigung an, dass diese unter leichtem Rutschen des Forwarders befahrbar wäre. Von einer kontrollierten Fahrt kann unter solchen Einsatzbedingungen jedoch nicht gesprochen werden, vielmehr kann der Bediener hier nur noch auf die Auswirkungen der Hangneigung auf die Maschine reagieren als diese steuern.

Sind für Harvester separate Grenzen angegeben, so liegen die Werte mit 40 % (STAMPFER ET AL., 2001; STAMPFER, 2002) und 45 % (HEINIMANN, 1999; FEHRLE, 2006) um 10 % über den Angaben für den Forwardereinsatz. Die Holzrückung erfolgt nach den Vorstellungen der Autoren dabei durch Seilanlagen oder den Einsatz von Skiddern.

Um die Verwendung radbasierter Maschinen auf Geländebereiche mit höheren Neigungen auszuweiten, setzen verschiedene Hersteller auf den Einsatz von Traktionshilfswinden. Erste Hinweise zu den Entwicklungen bei Herzog Forsttechnik in der Schweiz finden sich Ende der 1990er Jahre. Nach eigenen Angaben musste die Entwicklung des späteren Forcar jedoch in Folge der gestiegenen Arbeitsbelastungen bei HERZOG (2006) durch die Windwürfe zum Jahrtausendwechsel zurückgestellt werden. Kurz vor der Vorstellung des fertigen Produktes in Form des Hangforwarders Forcar FC 200 (BIERNATH 2004; FORBRIG ET AL. 2004; NICK, 2005) stellten BOMBOSCH ET AL. (2003a) einen Forwardereinsatz mit Unterstützung durch einen Pisten-Bully vor. BOMBOSCH ET AL. (2003a) nutzten zum Fahren auf stark geneigten Bestandesflächen die Winde eines Pisten-Bul-

lys, um damit einen Forwarder des Typs Timberjack 1010 bei Hangfahrten zu sichern. Die verwendete Winde wird in den Wintermonaten bei der Bearbeitung von Skipisten eingesetzt. Dazu lässt sich die Windenzugkraft einstellen, sodass diese die Hangabtriebskraft ausgleicht. Durch den Einsatz in Verbindung mit einem Forwarder konnte nach BOMBOSCH ET AL. (2003a) schlupffreies Fahren in Hanglagen ermöglicht werden. Die dabei aufgeführten Neigungsangaben von im Mittel 70 % und in der Böschungskante bis zu 85 % lösten jedoch eine Diskussion über die Sicherheit und die auftretenden Belastungen für die Fahrer aus (PRÖLL ET AL., 2003; BOMBOSCH ET AL., 2003b). Realistische Grenzen für ein solches System der Holzbringung werden zwischen 45 % (PRÖLL, 2005) und 60 % (BACHER-WINTERHALLER ET AL., 2007) Hangneigung gesehen. WEISE (2004) nimmt aufgrund der Kraftschlussgrenze zwischen Reifen und dem Untergrund je nach Bodenbeschaffenheit maximale Neigungen bis zu 60 % an, während FORBRIG ET AL. (2004) auf die Grenzen durch die Nivellierung von Kran und Sitz verweist. Diese sind zumindest für den Forcar FC 200 bis zu einem Wert von 50 % tiltbar.

Mittlerweile hat sich die Diskussion um diese Maschine gelegt. Andere Hersteller bieten ähnliche Hilfswinden für ihre Forwarder und Harvester an. So zeigten die Komatsu Forest GmbH und Hohenloher Spezial-Maschinenbau GmbH & Co. KG (HSM) auf der Austroforma 2007 Harvester mit unterstützender Winde für Hangfahrten. Beim Valmet Harvester 911.3 ist eine Winde am Vorderwagen montiert und soll beim Überwinden von Böschungskanten und kürzeren Steilpassagen helfen. Die Lösung von HSM für den Harvester 405H2L 8WD sieht eine tiltbare Winde des Typs EHY16 am Hinterwagen der Maschine vor. Daraus ergibt sich im Gegensatz zur Valmet Lösung eine Arbeitsrichtung Hang abwärts. Für die Verbesserung der Standstabilität sowie, um Platz zu schaffen, für einen erweiterten Tiltbereich des Auslegers wurde die Maschine zudem um 30 cm gegenüber der Standardvariante verlängert. Zusätzlich bietet HSM einen Hangforwarder an, der als Ergänzung zum hauseigenen Steilhangharvester gesehen wird. Gemeinsam mit der Wahlers Forsttechnik GmbH adaptiert Herzog Forsttechnik die Steilhangtechnik des Forcar in Ponsse Rückezüge des Modells Buffalo (ANONYMUS, 2008), um so bestehende Vermarktungswege für diese Technik zu nutzen. Insgesamt zeigt sich daher, dass Traktionshilfswinden und speziell für die Arbeit in Hanglagen angepasste Maschinen heute als akzeptiert gelten können und zunehmend an Bedeutung gewinnen .

Neben der Möglichkeit, die Fahrzeugmassen und den Antrieb über Radfahrwerke auf den Boden zu übertragen, hat sich in den Gebirgslagen die Verwendung von Raupenfahrwerken bei Harvestern etabliert. Üblicherweise werden dabei starre Baggerfahrgestelle mit Forstausrüstung versehen und um Einrichtungen zur Kabinennivellierung erweitert. Einen anderen Weg geht der Valmet Harvester des Typs 911.1 X3 M, der auch als Valmet „Snake“ bezeichnet wird. Basis dieser österreichischen Entwicklung ist ein Standard-Vierradharvester, dessen Räder durch einzelne Delta Kettenlaufwerke ersetzt werden können. Durch den Einsatz von vier flexiblen Laufwerken kann sich die Maschine besser an den Untergrund anpassen und erreicht dadurch eine verbesserte Stabilität bei Hangfahrten (BOHLANDER, 2001; STAMPFER 2002; STAMPFER UND STEINMÜLLER, 2004). Versuche, auf ähnliche Weise einen Raupenforwarder zu schaffen, sind über Versuchseinsätze nicht hinausgekommen (SOPPA, 2001). Als Ursache ist die geringe Geschwindigkeit bei Raupenfahrwerken anzunehmen, die sich auf den für den Transport ausgelegten Forwarder erheblich stärker auswirkt als auf den Harvestereinsatz.

Im Gegensatz zu den Radfahrwerken weichen die Vorstellungen über Grenzneigungen bei Raupenharvestern nur geringfügig voneinander ab. In Anlehnung an eine Empfehlung des Forsttechnischen Prüfausschusses (FPA) sieht PRÖLL (2005) die Grenze bei lediglich 45 % Geländeneigung. Dies scheint vor allem beim Vergleich mit den Angaben, die für radbasierte Harvester gemacht werden, ein sehr vorsichtig gewählter Wert. Die meisten Autoren aus Österreich und der Schweiz (HEINIMANN, 1999; DÜRRSTEIN UND STAMPFER, 2000; STAMPFER ET AL., 2001) sehen dagegen die Einsatzgrenzen bei 60 % Steigung. Ähnliche Vorstellungen bestehen bei der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF, 2004), die den Einsatzbereich für Raupenharvester zwischen 35 % und 65 % Geländeneigung beziffert. Optimistischere Einschätzungen hierzu finden sich bei THIEME (1999) und BOHLANDER (2001). So geht THIEME (1999) von guten Holzernteleistungen bis zu Neigungen von 65 % aus, während BOHLANDER (2001) einen Raupenharvestereinsatz bei einer mittleren Hangneigung von 70 % beschreibt.

Die Vorstellungen über die Grenzneigungen beim Valmet „Snake“ reichen von 50 % (SPRENGER, 2001; FORBRIG ET AL., 2004) bis hin zu Werten von 70 % (STAMPFER, 2002) und unter besonders guten Bedingungen sogar 80 % (STAMPFER ET AL., 2001) Steigung. SPRENGER (2001) orientiert sich bei seiner Einschätzung an ergonomischen Aspekten der Maschinenführer, da oberhalb von 50 % die Nivellierbarkeit der Kabine nicht ausreicht, um die Hangneigung auszugleichen.

Neben Fahrzeugen mit Rad- oder Raupenfahrwerken gibt es Schreitbagger, die für die hochmechanisierte Holzernte ausgerüstet werden. Diese können in ähnlichen Neigungen arbeiten wie Raupenharvester, zeichnen sich jedoch darüber hinaus durch die Möglichkeiten der Schreitfunktion aus (LACKNER, 1999). Damit ist es möglich Hindernisse, zum Beispiel in Form von Blocküberlagerungen, zu überwinden, ohne die Standsicherheit der Maschine zu gefährden. Bei derartigen Einsätzen ist jedoch eine Rückung mit bodengebundenen Maschinen (Forwardern) nicht mehr denkbar.

Trotz aller technischen Möglichkeiten, die eine Arbeit mit selbstfahrenden Forstmaschinen in geneigtem Gelände ermöglichen bzw. erleichtern (vgl. a. Kap. 6.5.2), ergeben sich Einschränkungen der Leistungsfähigkeit durch die Geländebedingungen. Mit zunehmender Neigung ist daher mit einer Reduktion der Holzernte bzw. Rückeleistungen zu rechnen. In Produktivitätsmodellen für die Holzernte mit Raupenharvestern in geneigten Gelände nach STAMPFER (2002) hat die Hangneigung entscheidenden Einfluss auf die Modellierung der Fortbewegung. Wegen der nivellierbaren Auslegerplattformen sieht STAMPFER (2002) keine Beeinflussung der zweiten Modellkomponente (Baumbearbeitungsmodell) durch die Neigung des Bestandes, sodass sich der produktivitätsmindernde Einfluss nur über die Fortbewegung auswirkt. Für Harvester ist daher von relativ geringen Auswirkungen auszugehen, während der Forwarder wegen der häufigeren Fahrbewegungen stärker durch die Geländeneigung beeinträchtigt wird. Zudem verfügen die wenigsten Rückzüge über geeignete Tilteinrichtungen für den Kran, weshalb hier eine weitere Minderung der Produktivität zu erwarten ist. Für den Harvesterbetrieb stützen Untersuchungen von SAUTER ET AL. (1998) den vergleichsweise geringen Einfluss der Geländeneigung auf die Leistung des Harvesters. So konnte beim Vergleich der Ernteleistungen bis 20 % Neigung mit dem Bereich zwischen 40 % und 60 % keine signifikante Verschlechterung festgestellt werden. Demgegenüber zeigte sich jedoch eine deutliche Zunahme der Bestandesschäden um 30 %.

1.4 Zielsetzung

Die vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, dass der hochmechanisierte Holzernte in Hanglagen eine wachsende Bedeutung zukommt, jedoch im gleichen Moment belastbare Grenzen für den Technikeinsatz fehlen. Holz als teilweiser Ersatz fossiler Energieträger, aber auch als langfristiger Kohlenstoffspeicher wird politisch gefördert (BMELV, 2004), und so ist langfristig mit einer zunehmenden Nachfrage zu rechnen. In den Hanglagen der Mittelgebirge stocken größere noch ungenutzte Holzreserven, die sich zum Teil mit hochmechanisierter Technik ernten lassen. Für den Boden dieser Bestände birgt der Einsatz von Harvestern und Forwardern Gefahren, die sich zum einen aus den Eigenmassen der Maschinen und zum anderen aus der erosionsfördernden Befahrung mit hohem Schlupf ergeben. Die Auswirkungen der Maschinenmassen auf den Boden sind gut untersucht. Es bestehen bereits Systeme, die eine unangepasste Befahrung verhindern sollen (ZIESAK, 2004). Insbesondere in Hanglagen nimmt jedoch die Bedeutung des Schlupfs für die Schädigung des Bodens zu. Einerseits ist zur Bewältigung entsprechender Hangneigungen eine höhere Zugkraft der Maschinen, die mit einem Anstieg des Schlupfniveaus einhergeht, erforderlich, und andererseits sind die Hanglagen mit den höheren Niederschlägen und der Geländeneigung durch den Austrag des Bodenmaterials stärker gefährdet.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, ein auf dem Antriebsschlupf basierendes Modell zur Bestimmung von Grenzneigungen bei Forstmaschineneinsatz zu entwickeln. Anhand von Zugkraftmessungen wird das Traktionsvermögen eines Forwarders untersucht und dieses in einem zweiten Schritt den Steigungswiderständen gegenübergestellt. Aus dem Traktionsvermögen der Maschine werden zwei Grenzneigungen für den Einsatz in Hanglagen bestimmt: eine bodenökologische Neigungsgrenze, die sich am Schlupf orientiert, und eine absolute Grenzneigung, die sich anhand der maximalen Zugkraft ergibt. Zur Reduktion der Bodenerosionsgefahr erfolgt die Limitierung des Schlupfs für eine bodenökologisch vertretbare Befahrung auf 25 %. Die Betrachtung einer absoluten Einsatzgrenze ist unabhängig von den Bodenschäden und dient der Angabe von Grenzen für die reine Arbeit in Gefällerichtung sowie für den Einsatz von seilunterstützten Erntemaschinen.

Das Traktionsverhalten einer Maschine unterliegt dabei vielen Einflussfaktoren, die im Rahmen der Arbeit weitestgehend berücksichtigt werden. So erfolgen die Versuche auf typischen Böden des Niedersächsischen Berglandes bei wechselndem Bodenwassergehalt. Hinzu kommen übliche Veränderungen der Maschine zur Optimierung des Zugkraftverhaltens. Hierzu zählen neben dem Einsatz von Gleitschutzketten und Bogie-Bändern auch die Reduktion des Reifeninnendrucks und der Wechsel der Bereifung. Insgesamt ergibt sich so ein guter Überblick über das Traktionsverhalten der Versuchsmaschine bei unterschiedlichen Einsatzbedingungen.

Zur Überprüfung des Grenzneigungsmodells werden zusätzlich Befahrungen in Hanglagen durchgeführt und messtechnisch begleitet. Die resultierenden Daten dienen einem Vergleich der Vorhersagewerte des Modells und dem realen Verhalten des Rückezugs unter geneigten Fahrbedingungen. Mögliche Abweichungen werden zur weiteren Feinjustierung des Modells genutzt.

Insgesamt sollen am Ende der Versuche belastbare und einfach zu ermittelnde Einsatzgrenzen für die hochmechanisierte Holzernte bestimmt werden. Man erhält dadurch für die Einschlagspla-

nung ein Instrument, die ökonomische und sichere Holzernte in Hanglagen voranzutreiben und gleichzeitig die nötige Rücksicht auf den Waldboden zu wahren.

2 Ausgewählte Aspekte der Fahrzeugmobilität bei Geländefahrt

2.1 Fahrzeugzugkraft

Selbstfahrende Forstmaschinen müssen eine Zugkraft erzeugen, welche die Mobilität im Gelände sicherstellt. Um dies zu gewährleisten, kommen leistungsstarke Motoren und ebensolche Fahrtriebe in Forstmaschinen zum Einsatz. Unter der Annahme einer ausreichenden Antriebsleistung lässt sich die Zugkraft der Maschine nach der folgenden allgemeinen Zugkraftformel beschreiben (verändert nach JACKE, 1989; JACKE, 1999):

$$F_Z = F_N * (\mu_h + \mu_g + \mu_f - \mu_r) \quad [1]$$

mit:

- F_Z = Fahrzeugzugkraft [kN]
- F_N = Normalkraft, die auf die angetriebenen Achsen wirkt [kN]
- μ_h = Haftreibungskoeffizient
- μ_g = Gleitreibungskoeffizient
- μ_f = Formschlusskoeffizient
- μ_r = Rollreibungskoeffizient

Die Fahrzeugzugkraft hängt somit entscheidend von der Normalkraft, die auf die angetriebenen Räder wirkt, ab. Unter ebenen Bedingungen entspricht die Normalkraft auf den Achsen eines allradgetriebenen Fahrzeugs der Gewichtskraft der Maschine. Diese wiederum bestimmt sich aus der Eigenmasse multipliziert mit der Erdbeschleunigung ($g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$).

Vier weitere Einflussfaktoren stehen als Koeffizienten (μ) in Zusammenhang mit der möglichen Kraftübertragung zwischen den Endtriebskomponenten (meistens Luftreifen) und dem Untergrund. Mit Ausnahme des Rollreibungskoeffizienten haben alle Faktoren einen positiven, also erhöhenden Einfluss auf die umsetzbare Zugkraft einer Maschine. Haftreibung und Gleitreibung sind durch die Materialpaarung zwischen Reifen und dem Untergrund geprägt, während der Formschlusskoeffizient die Verzahnung der Endtriebskomponenten mit dem Untergrund beschreibt. Mit zunehmendem Zugkraftbedarf und damit einhergehendem Radschlupf (Def. s. Kap. 2.2) reduziert sich die Bedeutung der Haftreibung für die Kraftübertragung zwischen Reifen und Untergrund, wohingegen der Einfluss der Gleitreibung zunimmt. Für Fahrzeuge auf nicht befestigtem Untergrund ist zudem der Formschluss zwischen dem Reifenprofil und dem Boden von entscheidender Bedeutung. Durch die Profilstollen kommt es zu einer Verzahnung mit dem jeweiligen Untergrund, die eine zusätzliche Abstützung von Zugkräften ermöglicht. Die reduzierende Wirkung der Rollreibung besteht im Abrollwiderstand des Reifens, der zum einen durch dessen Aufbau und zum anderen durch den Untergrund bestimmt wird. Je nach Untergrund ist der Rollreibungskoeffizient vernachlässigbar gering bzw. nimmt für weiche Böden, wie zum Beispiel Sand oder Schlamm, sehr hohe Werte an (PAMPEL, 1982).

Alle Koeffizienten mit positivem Einfluss auf die Zugkraft lassen sich mit Hilfe des Kraftschlusskoeffizienten (μ_k) zusammenfassen und verkürzen die allgemeine Zugkraftformel zu:

$$F_Z = F_N * (\mu_k - \mu_r) \quad [2]$$

Während der Geländefahrt mit einem Forwarder und den vorherrschenden geringen Fahrgeschwindigkeiten kann für einen homogenen Boden von einem nahezu konstanten Rollreibungskoeffizienten ausgegangen werden. Durch die Einführung des Traktionsbeiwertes (μ_{tr}) lassen sich Rollreibung und Kraftschluss zu einen Koeffizienten (μ_{tr}) verbinden:

$$F_Z = F_N * \mu_{tr} \quad [3]$$

Die Fahrzeugzugkraft ergibt sich somit aus der Multiplikation des Traktionsbeiwerts mit der Normalkraft (F_N) der Maschine. Für die vorliegende Fragestellung scheint eine Reduktion der allgemeinen Zugkraftgleichung auf diese u.a. auch bei RENIUS (1987) und STOILOV (2007) beschriebene verkürzte Form angemessen, da es bei der Betrachtung der erforderlichen Zugkräfte zur Überwindung der Hangabtriebskraft nicht darauf ankommt, auf welche Reibungskomponente die umsetzbaren Kräfte zurückzuführen sind oder wie sich deren Verhältnis zueinander mit steigendem Antriebsschlupf verändert.

Wird die verkürzte Form der allgemeinen Zugkraftgleichung nach dem Traktionsbeiwert umgestellt, so beschreibt dieser das Verhältnis zwischen der verfügbaren Zugkraft und der Gewichtskraft auf den angetriebenen Achsen:

$$\mu_{tr} = \frac{F_Z}{F_N} \quad [4]$$

Die möglichen Werte variieren dabei zwischen den unterschiedlichen Ausprägungen des Endantriebs, so beispielsweise zwischen Rad- und Raupenfahrwerken (HITTENBECK, 2004; 2007b). KUNZE ET AL. (2002) geben für letztere Traktionsbeiwerte auf Erdboden bis zu 1,2 an, während für Gummiluftreifen das Maximum auf vergleichbarem Untergrund bei 0,5 gesehen wird.

Unter anderem haben Untersuchungen an der Abteilung für Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie der Georg-August-Universität Göttingen (ifa) gezeigt, dass sich der Traktionsbeiwert in Abhängigkeit vom Antriebsschlupf anhand von Zugkraftmessungen bestimmen lässt (vgl. HITTENBECK, 2004; JACKE ET AL., 2004). Im Bereich der Agrartechnik ist die Verwendung des Traktionsbeiwerts seit langen Jahren sehr verbreitet (vgl. u.a. STEINER, 1979; SÖHNE UND BOLLING, 1981). Aber auch für Baumaschinen (KUNZE ET AL., 2002) und in der Nutzfahrzeugentwicklung (HOEPKE UND APPEL, 2002) wird das Verhältnis zwischen Zugkraft und Eigenmasse berechnet. Insbesondere im landwirtschaftlichen Bereich liegt der Fokus auf der effizienten Zugkraftübertragung durch den

Schlepperreifen, die durch entsprechende Wahl der Bereifung und des Reifeninnendrucks verbessert werden kann (vgl. BOCK, 1952; SÖHNE, 1970; SONNEN, 1970; REMPFER, 1998; SOMMER ET AL., 2001).

2.2 Antriebsschlupf

Schlupf bezeichnet einen Weg- bzw., unter Einbeziehung der Zeit, einen Geschwindigkeitsverlust bei Fahrbewegungen. Der zurückgelegte Weg der Endabtriebskomponenten unterscheidet sich dabei von der Strecke, die relativ zum Untergrund zurückgelegt wird. Für eine mit Rädern ausgestattete Maschine bedeutet dies, dass sich die Räder langsamer oder schneller drehen als sich die Maschine tatsächlich bewegt. Drehen die Reifen dabei langsamer, handelt es sich um Bremschlupf, drehen sie sich schneller, wird dies als Antriebsschlupf bezeichnet. Bei der Betrachtung des Zugkraftverhaltens sowie der Überwindung von Steigungswiderständen hat Bremschlupf keine Bedeutung, sodass sich die weitere Betrachtung des Schlupfes auf den Antriebsschlupf beschränkt. Die Berechnung des Schlupfes basiert auf der theoretischen Geschwindigkeit (v_{theo}) am Radumfang und der tatsächlichen Geschwindigkeit (v_{tats}) relativ zum Untergrund. Wird der Schlupf (σ) in Prozent angegeben, folgt die Berechnung folgender Gleichung (verändert nach RENIUS, 1987):

$$\sigma = \frac{v_{theo} - v_{tats}}{v_{theo}} * 100 [\%] \quad [5]$$

Dabei wird die Differenz zwischen der Radumfangsgeschwindigkeit (v_{theo}) und der tatsächlichen Geschwindigkeit (v_{tats}) ins Verhältnis zur Radumfangsgeschwindigkeit gesetzt. Sind beide Geschwindigkeiten identisch, wie es bei gezogenem Fahrzeug vorkommen kann, berechnet sich der Schlupf zu Null. Das andere Extrem ist der Stillstand der Maschine ($v_{tats} = 0$) bei durchdrehenden Antriebsrädern, sodass sich ein Schlupf von 100 % ergibt.

Die Berechnung des Schlupfes ist abhängig von den zwei Geschwindigkeiten, die gemessen werden müssen. Dabei ist insbesondere die Frage des Radumfangs bei Luftreifen problematisch, da minimale Veränderungen zwischen Nullschlupf, Bremschlupf und Antriebsschlupf entscheiden. So widmet sich beispielsweise STEINKAMPF (1971) den Auswirkungen unterschiedlicher „Nullschlupf“-Definitionen und schlägt für die Bewertung von Reifen eine vom Antriebsschlupf unabhängige Ermittlung des Wirkungsgrades¹ der Kraftübertragung vor. Ähnliches ist bei SCHREIBER UND KUTZBACH (2007) beschrieben, die das Zugkraftverhalten einer Maschine oder eines Reifens ebenfalls ohne Berücksichtigung der Nullschlupf-Definition beschreiben wollen. Darüber hinaus gibt es weitere Untersuchungen, die sich der Problematik der richtigen Bestimmung des Schlupfes widmen, ohne jedoch eine eindeutige und verbindliche Lösung zu finden (u.a. STEINKAMPF, 1971). Problematisch ist dabei, dass frühere Untersuchungen vorwiegend mit landwirtschaftlichen Schlep-

¹ Wirkungsgrad: Verhältnis zwischen Nutzleistung (P_n) und zugeführter Leistung (P_z), im Falle des Fahrtriebs – Verhältnis zwischen der Leistungsabgabe an der Radnabe und der realisierten Zugleistung der Maschine; vgl. u.a. SASS ET AL. (1970)

pern ohne Allradantrieb durchgeführt wurden. Bei objektiver Betrachtung muss für diese Maschinen die Zugkraftkurve die X-Achse bei positivem Schlupf schneiden. Ursache hierfür ist die theoretische Lage des Schlupf-Nullpunktes zwischen dem Zustand des gezogenen Schleppers und des angetriebenen Schleppers ohne messbare Zugkräfte. Zur Überwindung des Rollwiderstands der nicht angetriebenen Vorderachse ist eine gewisse Antriebskraft der Hinterräder erforderlich, die somit zu leichtem Schlupf führen muss (SÖHNE, 1952a; HOLM, 1969 vgl. STEINKAMPF 1971, STEINER, 1979). STEINKAMPF (1971) und auch BOLLING (1987) haben beispielsweise einen Verlauf durch den Ursprung erzwungen, während neuere Untersuchungen von WEISSBACH UND WINTER (1996) sowie REMPFER (1998) darauf verzichten. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die möglichen Verläufe der Traktionskurven bei unterschiedlichen Nullschlupf-Definitionen.

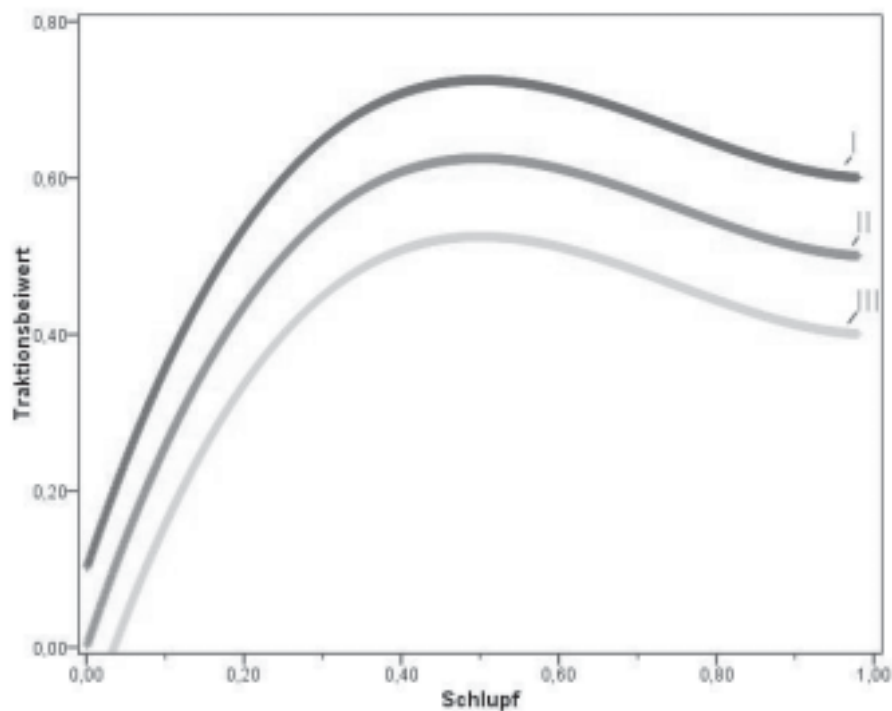


Abbildung 2: Verlauf der Traktionsbeiwertkurve bei unterschiedlicher Festlegung des Radumfangs; I: Traktions-Schlupfkurve mit positiven Traktionsbeiwerten bei 0 % Schlupf, II: Traktions-Schlupfkurve durch den Ursprung, III: Traktions-Schlupfkurve schneidet Abszisse bei positivem Schlupf

Trotz der Bedeutung für die Kraftübertragung und den Boden finden sich nur wenige Forschungsvorhaben, die sich dem Schlupf beim Forstmaschineneinsatz widmen. Lediglich im skandinavischen Raum lassen sich neben eigenen Arbeiten (HITTENBECK, 2004; JACKE ET AL., 2004; JACKE UND DREWES, 2004) vereinzelt ältere Untersuchungen finden. Einen kurzen Überblick hierzu geben SAARILAHTI UND ALA-ILOMÄKI (1997). So haben AHO UND RANTAPUU (1971) bei Mobilitätsuntersuchungen für Forstmaschinen den Schlupf unter ebenen Bedingungen sowie bei einer Hangneigung von 20 % gemessen. Die Messungen auf geschotterten Strecken ergaben einen Schlupf von 7 % in der Ebene und 15 % unter geneigten Bedingungen. Ebenfalls bei Mobilitätsanalysen auf Moorböden hat VILKKO (1986) den Schlupf an einem Forwarder erfasst und dabei festgestellt, dass sich durch die Verwendung von Breitreifen der Schlupf beinahe halbiert. ALA-ILOMÄKI UND HÖGNÄS (1987)

haben darüber hinaus den Einfluss der Beladung auf nassen Standorten mit geringer Tragfähigkeit untersucht. Dabei wurden mit unbeladener Maschine Schlupfwerte zwischen 8 % und 15 % festgestellt, während sich diese Werte bei beladenem Forwarder auf 12,5 % bis 20 % erhöhten. Als entscheidende Faktoren für den auftretenden Schlupf nennt FRØNSDAL (1985) neben dem Maschinentyp und der Hangneigung die Fertigkeit des Fahrers sowie kleinere Hindernisse (z.B. Stöcke, Blöcke, etc.), die während der Fahrt überwunden werden müssen. Letzteres zeigt die Problematik von Schlupfmessungen unter forstlichen Bedingungen. So sind die Untergründe für Forstmaschinen deutlich inhomogener als auf landwirtschaftlich genutzten Flächen (SAARILAHTI UND ALALOMÄKI, 1997).

2.3 Traktionsbeiwert vs. Schlupf

Antriebsschlupf und die Zugkraft bzw. der Traktionsbeiwert sind eng miteinander verbunden. So geht der Anstieg des Traktionsbeiwertes bis zum Erreichen des Maximalwertes einher mit der Zunahme des Schlupfes (vgl. BOCK, 1952; KOMANDI, 1975; STEINER, 1979; KUTZBACH, 1982; FODA, 1991; HITTENBECK, 2004; BLOCK, 2008). Je nach befahrenem Untergrund und den Endantriebskomponenten des untersuchten Fahrzeugs entwickelt der Traktionsbeiwert ein Maximum über dem Schlupf oder nimmt bis zum völligen Stillstand der Maschine bei drehenden Rädern zu. Einheitlich ist bei allen Untersuchungen für geringe Schlupfwerte ein anfangs steiler Anstieg der Traktion zu erkennen, der mit zunehmendem Unterschied zwischen der Antriebsgeschwindigkeit und der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit, d. h. mit steigendem Schlupf, in einen flacheren Verlauf übergeht. Unterschiedliche Vorstellungen bestehen darüber, ab wann die Traktionsbeiwerte fallen und wie sich der Verlauf nach Überschreiten des Maximums entwickelt. Für die meisten Untersuchungen wird jedoch von einem zugkraftoptimalen Schlupf ausgegangen, nach dessen Überschreiten die Traktionskurve in einen flach abfallenden Verlauf wechselt.

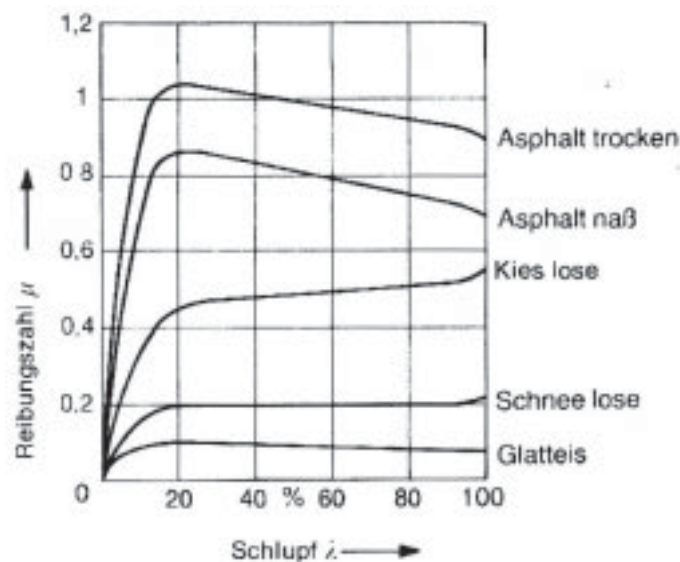


Abbildung 3: Exemplarische Verläufe von Traktionsbeiwerten (Reibungszahlen) über dem Schlupf für verschiedene Untergründe (nach ZOMOTOR, 1991)

Messungen auf festem Untergrund, wie beispielsweise auf Asphaltstraßen, zeigen einen sehr steilen Anstieg des Traktionsbeiwerts (hier Reibungszahl) bis zu einem Maximum bei vergleichsweise geringen Schlupfwerten. Wie Abbildung 3 zeigt, gibt ZOMOTOR (1991) das Maximum der umsetzbaren Zugkraft auf trockenem sowie nassem Asphalt bei 20 % Schlupf an. Während er dabei Traktionsbeiwerte von über 1 für erreichbar hält, beziffert RENIUS (1987) den maximalen Traktionsbeiwert für Allradtraktoren auf trockenem Beton mit 0,9. Untersuchungen am ifa mit einem Flurförderfahrzeug weisen exemplarisch berechnete Traktionsbeiwerte von 0,7 auf trockenem geschliffenen Hallenboden aus (BLOCK, 2008). Diese decken sich wiederum mit den Ergebnissen von WEINHOLD (2001), der bei Versuchen zum Bremschlupf vergleichbare Werte gemessen hat.

Ändert sich der Untergrund hin zu landwirtschaftlichem Acker, so reduziert sich zum einen die umsetzbare Zugkraft der Endabtriebskomponenten, und zum anderen verschiebt sich das Maximum der Traktionsbeiwerte hin zu größeren Schlupfwerten (vgl. u.a. SÖHNE UND BOLLING, 1981; STEINKAMPF, 1971; STEINER, 1979). RENIUS (1987) gibt beispielsweise je nach Bodenbedingungen die maximale Zugkraft in Prozent der Achslastsumme für Allradtraktoren mit 45 % bis 65 % an, wobei diese Werte bei einem Schlupf zwischen 50 % und 60 % erreicht werden. Vielfach wird die Betrachtung der Traktionskurven jedoch nicht auf den gesamten Schlupfbereich zwischen 0 % und 100 % ausgedehnt, sondern auf den für den jeweiligen Autor interessanten Bereich reduziert. SOMMER ET AL. (2001) betrachten beim Vergleich zwischen Standardreifen und modernen Breitreifen mit geringerem Reifeninnendruck lediglich die Entwicklung des Traktionsbeiwertes bis zu einem Schlupf von 25 %. Durch diese Beschränkung auf den Bereich geringen Schlupfs sind bei vielen landwirtschaftlichen Untersuchungen keine Aussagen über die Lage des Zugkraftmaximums enthalten. Ursache hierfür ist der Fokus auf den Wirkungsgrad der Zugkraftübertragung, der bei unter 10 % Schlupf sein Optimum erreicht (vgl. a. RENIUS, 1987).

Zugkraftuntersuchungen bei forstlichen Untergrundbedingungen sind deutlich seltener als Versuche auf sehr homogenen landwirtschaftlichen Flächen. Neben eigenen Untersuchungen von JACKE ET AL. (2004) und HITTENBECK (2004) sind Zugkraftmessungen unter forstlichen Bedingungen in Deutschland, also auf Rückegassen, lediglich von BLEY (2002) bekannt. Selbst ein Blick über die Grenzen Deutschlands erweitert das Spektrum nur gering. So beklagen VECCHINSKI ET AL. (1999) das Fehlen forstlicher Untersuchungen zum Zugkraftverhalten eingesetzter Forstmaschinen. Aktuellere Messungen werden bei KOŠIR ET AL. (2007) beschrieben, die jedoch keine Zugkraftkurven bestimmt haben, sondern die maximale Hangneigung in Abhängigkeit von der Orientierung und der Masse der angehängten (Rücke-) Last. Für forstliche Bedingungen ergeben sich, wie die eigenen Untersuchungen zeigen, nur geringe Unterschiede zu den Ergebnissen landwirtschaftlicher Studien. Auf lössdominierten Standorten steigt auch hier der Traktionsbeiwert über dem Schlupf rapide, um zwischen 50 % und 70 % Antriebsschlupf ein Maximum zu erreichen.

Für die Verwendung von Raupenfahrwerken werden, abgesehen von den höheren Traktionsbeiwerten, nur geringe Abweichungen des Fahrverhaltens im Vergleich zu Luftreifen auf nachgiebigem Boden ermittelt. Bei WEISSBACH UND WINTER (1996) ist der Verlauf der Zugkraftkurve für ein Raupenfahrwerk nahezu eine Parallelverschiebung des Verlaufs für einen Allradtraktor. Der Unterschied der Traktionsbeiwerte zwischen den Fahrwerksystemen beläuft sich bei dieser Untersuchung auf etwa 0,2. Eigene Messungen mit einem MHT Raupenharvester der Typs 132 HVT bestätigen die ähnliche Entwicklung des Traktionsbeiwertes zwischen Rad- und Raupenfahrwerken

(HITTENBECK, 2007b; JACKE UND HITTENBECK, 2009). Unterschiede beschränken sich zum einen auf die erwartungsgemäß deutlich höheren Werte bei Raupenantrieben und zum anderen auf einen nahezu konstant hohen Traktionsbeiwert nach Erreichen des Maximalwertes. Höherer Schlupf scheint sich hier nicht negativ auf die Zugkraft auszuwirken, wie es vergleichbare Messungen mit einem radbasierten Forwarder zeigen (HITTENBECK, 2004).

Der Zusammenhang zwischen dem Antriebsschlupf eines Fahrzeugs und der umsetzbaren Zugkraft bzw. dem Traktionsbeiwert ist in den unterschiedlichen Forschungsdisziplinen hinreichend untersucht. Für die meisten Paarungen aus verschiedenen Fahruntergründen und Antriebsvarianten bestehen bereits Erkenntnisse über den Verlauf des Traktionsbeiwertes in Abhängigkeit vom Schlupf. Grundsätzlich lassen sich Unterschiede zwischen einem festen Untergrund (z.B. Asphalt oder Beton) und nachgiebigem Boden feststellen, die einerseits Auswirkungen auf die maximalen Traktionsbeiwerte haben und andererseits auf den Schlupf, der bei maximaler Fahrzeugzugkraft auftritt.

2.4 Hangabtriebskraft

Beim Befahren von Hanglagen werden zusätzliche Zugkräfte für die Mobilität der Maschine benötigt. Die erforderliche Zugkraft geht einher mit dem Anstieg des Schlupfes an den Endabtriebskomponenten der Maschine. Wie bereits für die Bodenbefahrung (vgl. Kap. 1.2) beschrieben, bedeutet dies eine zusätzliche Scherbeanspruchung des Bodens und somit eine zunehmende Zerstörung der Oberbodenstrukturen mit der Folge einer erhöhten Erosionsgefahr. Um die empfindlichen Böden der Hanglagen ausreichend vor der schädigenden Wirkung der Befahrung mit Maschinen zu schützen, sind verlässliche Informationen über die notwendigen Zugkräfte für die Überwindung des Steigungswiderstands erforderlich.

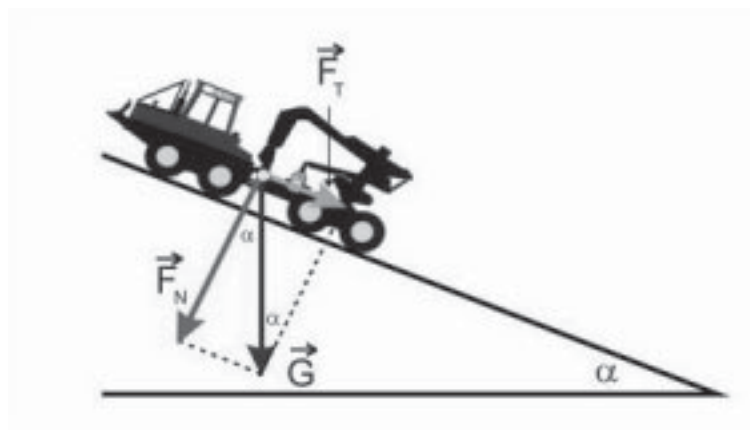


Abbildung 4: Auf Fahrzeuge wirkende Kräfte bei der Befahrung von Steigungen (nach JACKE UND DREWES, 2004)

Beim Befahren von Steigungen muss die vom Fahrzeug umsetzbare Zugkraft die Hangabtriebskraft, welche auf die Maschine wirkt, kompensieren. Die erforderliche Kraft, um den Hangabtrieb auszugleichen, ist abhängig von der Eigenmasse des Fahrzeugs und der Neigung des Untergrunds (vgl. u.a. SAARILATHI, 2002b; JACKE UND DREWES, 2004). Abbildung 4 verdeutlicht die auf ein Fahrzeug wirkenden Kräfte bei Befahrung von geneigten Oberflächen.

Die mit F_T bezeichnete Hangabtriebskraft berechnet sich aus dem Produkt der Fahrzeuggewichtskraft (G) und dem Sinus des Neigungswinkels nach folgender Gleichung:

$$F_T = F_G * \sin \alpha \quad [6]$$

Für die unbeladene Versuchsmaschine mit einer Eigenmasse von 11.750 kg (einem Gewicht von ca. 11.750 daN) ergibt sich bei einer Neigung des Geländes von 25 % eine Hangabtriebskraft von knapp 2800 daN. Die auf diese Weise berechnete Hangabtriebskraft wird bei der Datenaufbereitung dazu verwendet, die gemessenen Zugkraftwerte bei gering geneigten Versuchsstandorten, auf ebene Bedingungen zu übertragen. Je nach Neigung werden die gemessenen Werte um die Hangabtriebskraft ergänzt oder reduziert.

2.5 Rechnerische Bestimmung von Grenzneigungen

Um aus den gemessenen Zugkräften und damit Traktionsbeiwerten Grenzen für den Einsatz der Maschine in geneigtem Gelände zu berechnen, müssen die umsetzbaren Zugkräfte des Forwarders der Hangabtriebskraft gegenüber gestellt werden. Der Grundgedanke zu diesem Vorgehen basiert auf Überlegungen von JACKE UND DREWES (2004), die eine Abbremsung eines Forwarders durch eine schiefe Ebene skizzieren. Die Gegenüberstellung von Zugkraft und Hangabtriebskraft ist jedoch auch für nicht forstliche Anwendungen beschrieben. So geben KUNZE ET AL. (2002) eine Formel zur Berechnung der maximalen Steigfähigkeit von Kettenfahrwerken bei Planierraupen an. Die Formel gleicht dabei der hier im Folgenden rechnerisch entwickelten Lösung, während z.B. HOEPKE UND APPEL (2002) für Allrad-LKW zusätzlich eine Mindestgeschwindigkeit mit einbeziehen, die für Forstmaschinen und Raupenfahrwerke in Hanglagen nur von untergeordneter Bedeutung ist.

Die rechnerische Gegenüberstellung der Hangabtriebskraft (Gleichung 6) und der zuvor berechneten reduzierten Zugkraftformel (Gleichung 3) ergibt:

$$F_N * \mu_{ir} = F_G * \sin \alpha \quad [7]$$

Es zeigt sich, dass die beiden Seiten der Gleichung mit unterschiedlichen Kräften berechnet werden. Die Bestimmung der Zugkraft basiert auf der Normalkraft (F_N) des Forwarders, während die Hangabtriebskraft anhand der Gewichtskraft (F_G) der Maschine bestimmt wird. Wie Abbildung 4 zeigt, sind die Normalkraft und die Gewichtskraft unter ebenen Bedingungen identisch. Mit zunehmendem Steigungswinkel α wird die Normalkraft der Maschine, also die Kraft senkrecht zur Fläche, kleiner, wohingegen die Gewichtskraft unverändert bleibt. Mit Hilfe der trigonometrischen Funktionen lässt sich die Normalkraft aus dem Produkt der Gewichtskraft und des Kosinus des Steigungswinkels berechnen:

$$F_N = F_G * \cos \alpha \quad [8]$$

Eingesetzt in Gleichung 7 lässt sich auf beiden Seiten der Gleichung die Gewichtskraft (F_G) der Versuchsmaschine herauskürzen. Wird zudem nach dem Traktionsbeiwert (μ_{tr}) umgestellt, verkürzt sich der Zusammenhang zwischen Fahrzeugzugkraft und Hangneigung zu:

$$\mu_{tr} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha \quad [9]$$

Da der Tangens des Steigungswinkels multipliziert mit 100 die Steigung in Neigungsprozent angibt, folgt aus Gleichung 9, dass der gemessene Traktionsbeiwert direkte Schlüsse auf die mögliche Hangneigung zulässt. Bei SCHULZ (1988) finden sich zudem Berechnungen für Fahrzeuge, die lediglich über Vorder- oder Hinterradantrieb verfügen. PAMPEL (1982) gibt darüber hinaus die Veränderungen bei unterschiedlichen Varianten der Holzrückung an. So reduziert sich beim Schleiftransport die befahrbare Steigung mit dem Gewicht der angehängten Last. Für den Einsatz von Forwardern geht PAMPEL (1982) dagegen von einem lastunabhängigen Verhalten aus, da die zusätzliche Gewichtskraft der Beladung sowohl Auswirkungen auf die Zugkraft (über die Multiplikation mit dem Traktionsbeiwert) als auch auf die Hangabtriebskraft hat. Dies wird auch beim rechnerischen Übergang zwischen Formel 7 und Formel 9 deutlich. Durch die Umrechnung der Normalkraft in das Produkt aus Gewichtskraft und dem Kosinus des Neigungswinkels lässt sich die Gewichtskraft auf beiden Seiten der Gleichung herauskürzen.

Der unter Kapitel 2.3 beschriebene Zusammenhang zwischen dem Radschlupf und dem Traktionsbeiwert ermöglicht zudem, den zu erwartenden Schlupf für befahrbare Hanglagen anzugeben. Im Umkehrschluss wird es auch möglich, für einen bodenphysikalisch noch tolerierbaren Schlupf die maximal befahrbare Neigung des Untergrunds zu berechnen. Im Bereich der Befahrung von landwirtschaftlichen Böden werden Schlupfwerte bis 25 % als noch akzeptabel betrachtet (SÖHNE, 1952a). Werte darüber führen durch die Scherbelastung in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Boden zu einer nicht zulässigen Beeinträchtigung der Oberbodenstrukturen. Das Abscheren der durch das Reifenprofil geschaffenen „Startblöcke“ (SÖHNE, 1952a; JACKE, 1999) zerstört den natürlichen Zusammenhalt des Oberbodens und bildet damit die Basis für Erosionsvorgänge (YONG ET AL., 1978; SAARILATHI UND ALA ILOMÄKI, 1997; WANJII ET AL., 1997; PYTKA UND KONSTANTKIEWICZ, 2002).

3 Material und Methoden

3.1 Versuchsaufbau

Zugkraftversuche mit einem Rückezug unter ebenen Geländebedingungen bilden die Basis für die Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Zugkraft und Radschlupf. Aus dieser Beziehung lassen sich Traktionskurven für die einzelnen Varianten des Versuchs ermitteln, die in einem späteren Schritt die Basis für eine Grenzneigungsprognose bilden. Diese Vorhersagen der ausrüstungsspezifischen Maschinenmobilität werden in einem zweiten Versuchsschritt in Hanglagen überprüft.



Abbildung 5: Verankerungstechnik für Zugkraftmessungen an Forstmaschinen in aufgebautem Zustand (Eigenkonstruktion des ifa)

Bei den Versuchen in ebener Lage wird die eigens entwickelte Verankerungstechnik (siehe Kap. 3.7), wie in Abbildung 5 dargestellt, in einer geeigneten Rückegasse installiert. Der Aufbau beinhaltet eine Sicherung der Verankerungstechnik gegen Verrutschen. Dies erfolgt zum einen durch Lastgurte, mit denen der Grundrahmen an Bäumen fixiert wird, und zum anderen, um die Querstabilität zu gewährleisten, durch massive Erdnägeln, die in spezielle Haltetaschen am Rahmen eingeschlagen werden. Vor der Sicherung gegen Querkräfte werden die Lastgurte gespannt, so dass sich die Position der Verankerungstechnik während der Versuchsfahrten und den damit verbundenen hohen Belastungen nicht mehr verändert. So kann ein sicherer Stand der Anlage auch bei hohen Zugkräften sichergestellt werden. Nach der erfolgreichen Verankerung in der Rückegasse wird der Versuchsvorwärtler über eine Umlenkrolle mit der Seilwinde verbunden. Die Umlenkrolle ist dabei am Rückezug montiert (vgl. Kap. 3.6.3), während das Stahlseil an einem Baum als Ankerpunkt befestigt wird. Dieser Anbau ermöglicht, dem „Flaschenzugprinzip“ folgend, eine

Reduktion der direkten Kräfte auf die Verzögerungstechnik und führt zum anderen zu höheren Drehzahlen und damit geringeren Drehmomenten an der Bremsscheibe.

Während der Fahrversuche in geneigtem Gelände kann auf die Abbremsstechnik verzichtet werden. Die Versuchsmaschine befindet sich auf möglichst geraden mit gleichmäßiger Hangneigung ausgestatteten Rückegassen und fährt den Hang hinauf. Dabei werden die Radumfangsgeschwindigkeit sowie die tatsächliche Geschwindigkeit des Fahrzeugs erfasst und durch das Messsystem (s. Kap. 3.6) gespeichert.

3.2 Versuchsablauf

3.2.1 Ebene Lagen

Zur Erfassung des Traktionsverhaltens zieht der Versuchsforwarder ein Stahlseil gegen den ansteigenden Ausspulwiderstand der Verzögerungstechnik. Dabei werden die Zugkraft sowie die theoretische und tatsächliche Geschwindigkeit durch das Messsystem aufgezeichnet.

Der Fahrversuch beginnt mit dem Einschalten der druckluftbasierten Steuerung. Der daraufhin von der Verzögerungstechnik durchlaufene Testzyklus umfasst einen kontinuierlichen Anstieg des Drucks in der Bremsanlage bis zum Maximaldruck von 4 bar, gefolgt von einem schnellen Druckabfall, der zum Lösen der Bremse führt. Die Versuchsmaschine fährt gegen den sich entsprechend der Steuerung ändernden Ausspulwiderstand der Verzögerungstechnik. Während der Fahrt sind die Differentiale des Forwarders zu 100 % gesperrt, sodass kleinräumige Traktionsunterschiede das Ergebnis nicht beeinflussen. Die Fahrt erfolgt mit maximaler Auslenkung der Einspritzpumpe („Vollgas“) und kleinster Übersetzung der Versuchsmaschine. Ist die Maschine durch die Verzögerungstechnik zum Stillstand gekommen, wird die Fahrt gestoppt, bis der Testzyklus von neuem beginnt. Das Ende des Testzyklus lässt sich zum einen an der nachlassenden Spannung auf dem haltenden Stahlseil erkennen und zum anderen anhand des angezeigten Zugkraftmesswertes ablesen. Dieser wird durch das in der Versuchsmaschine untergebrachte Messsystem bereitgestellt und visualisiert.

Je nach Länge der Rückegasse ermöglicht ein Auszug des Stahlseils bis zu zehn Abbremsungen des Rückezugs. Nach jedem Auszug wird das Stahlseil mit Hilfe des Elektromotors an der Verzögerungstechnik wieder auf die Seiltrommel aufgezogen. Dies kann je nach Bodenwassergehalt und sonstigen Gegebenheiten zwischen sechs- und zwölfmal pro Rückegasse wiederholt werden. Der überwiegende Teil der Versuchsstrecken wurde jedoch achtmal befahren. Im Anschluss an die Traktionsmessungen gilt es die Bodenbedingungen des Versuchs zu ermitteln. Hierzu wird an mehreren Stellen der Fahrspur mittels der FDR-Sonde Thetaprobe MLxx der Wassergehalt des Oberbodens erfasst. Zusätzlich werden Stechzylinderproben entnommen, die der Bestimmung der Lagerungsdichte dienen. Für jede Versuchsgasse wird zudem eine Stechzylinderprobe entnommen und im Labor der Abteilung „Ökopedologie der gemäßigten Zonen“ der Georg-August-Universität Göttingen analysiert (s. Kap 3.3.5).

3.2.2 Hanglagen

Die Fahrversuche in Hanglagen unterscheiden sich von jenen in der Ebene durch den Verzicht auf die Verzögerungstechnik. Für die Versuchsfahrten werden Strecken oder Streckenabschnitte ausgewählt, die sich durch eine möglichst konstante Steigung und einheitliche Bodenbedingungen auszeichnen. Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei der Querneigung, die nach Möglichkeit auszuschließen ist, da die Zugkraft der Maschine ansonsten für „zwei“ Steigungswiderstände aufgebracht werden muss. Dies würde zu einer Überschätzung des Schlupfes für eine bestimmte Hangneigung führen. Die Versuchsfahrten werden wiederum mit voll ausgelenkter Einspritzpumpe und gesperrten Achsdifferentials durchgeführt. Nach den Vergleichsfahrten werden auch hier der Wassergehalt des Bodens ermittelt und die entsprechenden Bodenproben für die weitere Analyse im Labor entnommen.

3.3 Bodenkundliche Untersuchungen

3.3.1 Einführung

Durch die Beschränkung des Versuchsraums auf das Südniedersächsische Bergland und in Absprache mit dem Niedersächsischen Forstplanungsamt in Wolfenbüttel ergeben sich zwei Bodenartengruppen, die typisch für Hanglagen zwischen 20 % und 40 % Geländeneigung sind. Nach STÜBER (2006) sind die Hanglagen in Niedersachsen vorwiegend durch Lössauflagen gekennzeichnet. Er geht davon aus, dass über 70 % der niedersächsischen Staatswaldflächen über einen lössdominierten Oberboden verfügen. Unterschiede bestehen lediglich im Skelettanteil der Böden, der je nach Ausgangsgestein und Verwitterungsgrad variiert. So ist im Harz und Teilen des Sollings mit höheren Skelettanteilen zu rechnen, wohingegen sich beispielsweise im Bereich des Forstamtes Reinhausen vorwiegend skelettfreie Oberböden finden. Da die Wirkung des Skelettanteils auf die Kraftübertragung vom Reifen auf den Untergrund nicht bekannt ist, wurde im Nachhinein für jede Versuchsgasse der Skelettgehalt der oberen Bodenschichten ermittelt. Anhand der vorgefundenen Skelettanteile der oberen 20 cm lassen sich die einzelnen Versuchsserien in drei verschiedene Skelettgehaltsstufen (vgl. Kap. 4.2.6) einteilen.

Die Analyse der befahrenen Versuchsbestände in Hinblick auf die bodenkundlichen Gegebenheiten erfolgt in mehreren Schritten. So wird im Rahmen einer nachträglichen Datenaufnahme eine Standortkartierung durch einen Mitarbeiter des Niedersächsischen Forstplanungsamtes durchgeführt. Dieser ermittelt die Schichtung des Bodens bis in eine Tiefe von ca. 1 m und bestimmt anhand eines Bohrprofils die Bodenart und den Skelettgehalt des Mineralbodens. Zusätzlich erfolgt eine Ansprache der Humusform unter Angabe der Schichtstärken sowie die Bestimmung der Scherfestigkeit des Oberbodens zur Zeit der Standortaufnahme.

Bereits während der Versuche wird aus möglichst jeder befahrenen Rückegasse eine Bodenprobe mit Hilfe von Stechzylindern entnommen. Die Proben werden einer Analyse im Labor der Abteilung „Ökopedologie der gemäßigten Zonen“ der Georg-August-Universität Göttingen unterzo-

gen. Neben der Auswertung der Korngrößenzusammensetzung können anhand der Stechzylinderproben Wasserspannungskurven (pF), das Verhältnis von organischem Kohlenstoff zu Stickstoff (C/N) und die Trockendichte bestimmt werden. Die Ergebnisse der Korngrößenanalyse sind bedeutsam für die Einordnung der Versuchsflächen. So könnten einzelne Bestandteile des Bodens für das Traktionsverhalten des Forwarders entscheidend sein. Die pF-Kurven geben indirekt Auskunft über die Zusammensetzung des Bodengesamtporenvolumens aus Grob-, Mittel- und Feinporen (SCHEFFER ET AL., 1998).

Neben der Analyse im Labor werden weitere Stechzylinderproben zur Bestimmung der Trockendichte sowie zur Einschätzung eines gravimetrischen Bodenwassergehaltes verwendet. Die erforderliche Probenentnahme erfolgt in jeder Versuchsgasse nach Ablauf der Fahrversuche in den drei Bereichen „Bestand“, „Mitte“ zwischen den Fahrspuren und direkt aus der „Fahrspur“ der Gasse. Die Proben aus dem Bestand dienen dabei der Beschreibung der ungestörten Bestandessituation, während der Entnahmepunkt „Mitte“ für die Erfassung der Gasse vor der erfolgten Mehrfachbefahrung vorgesehen ist. Aus den Proben der Fahrspur kann die Verdichtungswirkung der Befahrung abgeschätzt werden.

Die Bestimmung des für den Traktionskoeffizienten mit entscheidenden volumetrischen Bodenwassergehalts in Prozent erfolgt am Ende eines Versuchstages bzw. nach Abschluss einer Versuchsserie mittels einer FDR-Sonde (Frequency Domain Reflectometry). Dabei werden zufällig über der Gassenlänge zwischen sechs und zwölf Messungen durchgeführt, deren arithmetischer Mittelwert die Bodenfeuchte der Versuchsgasse bestimmt. Eine Zuordnung der gemessenen Zugkraft- und Schlupfwerte zu den einzelnen Bodenwassergehaltswerten ist nicht praktikabel und würde zudem kleinräumige Unterschiede auf der Rückegasse überbewerten.

3.3.2 Standortansprache

Nach Abschluss der Versuche wird für alle befahrenen Rückegassen eine Kartierung des Standortes durch einen Mitarbeiter des Niedersächsischen Forstplanungsamtes vorgenommen. Die nachträgliche Flächenaufnahme durch einen Spezialisten bietet die Gewähr einer direkten Vergleichbarkeit der Angaben zu Bodenart, Humusaufgabe und Skelettanteil. Die erhaltenen Bodeninformationen werden den gemessenen Datensätzen zugeordnet und ermöglichen so eine gezielte Auswertung. Anhand der während der Standortbestimmung zusätzlich erhobenen Parameter zu Lage, Klima und Schichtung des Bodens, auch in den nicht direkt befahrenen tieferen Bodenschichten, kann zudem eine Einschätzung des Wasserhaushaltes gegeben werden. Aus der Vielzahl der Informationen lässt sich so die Bedeutung einzelner Bodenvarianten abschätzen.

Die Standortaufnahme beginnt jeweils mit einer Einordnung der Fläche in eine geographisch verwaltungstechnische Einheit, hier dem Forstamt und der Revierförsterei, sowie einer anschließenden Zuordnung zu einem Wuchsgebiet oder Wuchsbezirk als naturräumliche Gliederungsebene. Für die Versuchsgassen werden daraufhin die Geländebedingungen genauer ermittelt. Hierzu zählt die Bestimmung der Höhenlage, der Geländeneigung und der Exposition der Fläche. Zusammen mit der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmenge und der Dauer der Vegetationsperiode ergibt sich daraus eine Einschätzung der geographischen Lage und der klimatischen Bedingungen des Bestandes (u.a. ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG, 1996).

Im nächsten Schritt erfolgt eine bodenkundliche Bestimmung der Standortmerkmale. Diese beginnt mit der Beschreibung der Humusform und der Mineralbodenhorizonte und umfasst zusätzlich die Ansprache des Ausgangsgesteins. Die Humusform ergibt sich dabei aus der Mächtigkeit und dem Vorkommen der unterschiedlichen Humusschichten. Diese werden in die drei Horizonte L, O_f und O_h eingeteilt, wobei der L- oder Litter-Horizont die Streuschicht aus wenig zersetztem Pflanzenmaterial mit nur geringen Feinhumusanteilen beschreibt. Der O_f-Horizont ist geprägt durch einen höheren Feinanteil und eine Verzahnung der Humusschichten. Gebildet wird dieser Fermentationshorizont aus halb zerfallenen Blättern oder Nadeln und dem Kot der streuzersetzenden Organismen. Kommt zusätzlich ein O_h-Horizont vor, so deutet dies auf schlechtere Humusformen hin, die sich aus der verlangsamten Streuumsetzung ergeben. Zu erkennen ist der O_h-Horizont an dem hohen Feinanteil von über 70 % und den kaum zerkleinerten Resten der Auflagestreu. Je nach Zusammensetzung des Auflagehumus ergeben sich die Humusformen Mull (L-Schicht), Moder (L- u. O_f-Schicht) und Rohhumus (L-, O_f u. O_h-Schicht) bzw. Zwischenvarianten dieser Formen. Die für eine Versuchsgasse bestimmte Humusform wird direkt mit den Daten verknüpft, um den möglichen Einfluss der Humusaufgabe auf das Traktionsverhalten bewerten zu können.

Damit der Einfluss der Bodenzusammensetzung auf das Traktionsverhalten analysiert werden kann, muss zumindest die Bodenart in der Interaktionsfläche zwischen den Endabtriebskomponenten (typischerweise Reifen) und dem Mineralboden bestimmt werden. Bei der Standortansprache erfolgt dies für eine Tiefe von bis zu einem Meter mit Hilfe eines Pürkhauer-Bohrstocks. Neben der Mächtigkeit der einzelnen Bodenhorizonte werden Bodenart, Tongehalt, Humusanteil sowie Skelettanteil der jeweiligen Schicht bestimmt. Die Bodenart und damit auch der Tongehalt ergeben sich aus der Einordnung der Bodenprobe in das Korngrößendreieck. Der Humusgehalt lässt sich im Wald mit relativ geringem Aufwand abschätzen, während die Einschätzung des Skelettanteils eine gewisse Erfahrung voraussetzt und am besten am gegrabenen Profil zu bestimmen ist.

3.3.3 Volumetrischer Bodenwassergehalt (FDR-Sonde)

Die Auswirkungen einer Befahrung auf den Boden sowie das Zugkraftverhalten eines Fahrzeugs hängen stark von der Bodenstruktur und dem Bodenwassergehalt ab. Bei vergleichbaren Oberbodenarten ist vor allem der Bodenwassergehalt für die Schadwirkung (MATTHIES UND KREMER, 1999; ZIESAK, 2004) auf den Boden und die Mobilität einer Radmaschine entscheidend. So haben JACKE ET AL. (2004) und HITTENBECK (2004) bei vergleichbarem Bodensubstrat und Veränderung des Bodenwassergehalts von 20,7 % auf 40,0 % eine Reduktion der maximalen Zugkräfte um über 30 % festgestellt.

Da die Bodenfeuchte (im Weiteren als Synonym für den Wassergehalt) einen erheblichen Einfluss auf die Traktion hat, werden nach jeder Messserie sowie am Ende eines Versuchstages mehrere Messungen mit einer FDR-Sonde (Frequency Domain Reflectometry) durchgeführt. Die Messsonde vom Typ Theta Probe ML2x bestimmt den volumetrischen Wassergehalt des Bodens anhand der Dielektrizitätszahl, die für Wasser deutlich höher als für den Mineralboden ist. Gemessen wird bei der FDR-Sonde der Scheinwiderstand des Bodens, der Rückschlüsse auf den Was-

sergehalt zulässt (JMEG, 2002). Der Sensor wird an ein Bodenfeuchtemessgerät „Moisture Meter HH 2“ angeschlossen.



Abbildung 6: Messung des Bodenwassergehalts mit der Theta Probe ML2x und dem Handauslesegerät

Die FDR-Sonde bemisst ein Volumen, das durch vier Metallstäbe begrenzt ist. Der Sensor wird, wie in Abbildung 6 dargestellt, bis zum Plastikgehäuse im Mineralboden versenkt. Ein Sinussignal wird von dem Sensor über die Stäbe in den Boden ausgesandt. Das bemessene Bodenvolumen erzeugt dabei einen Scheinwiderstand, der abhängig von der Dielektrizitätszahl und der ionischen Leitfähigkeit ist. Um den Einfluss der Leitfähigkeit zu reduzieren, arbeitet der Sensor mit dem 100 MHz-Signal, sodass der Scheinwiderstand des Bodens nahezu vollständig auf die Dielektrizitätszahl zurückzuführen ist. Da diese für Wasser (~81) deutlich höher als für (trockenen) Boden (typisch sind 3 bis 5) und Luft (1) ist, wird die Dielektrizitätszahl des Bodenvolumens hauptsächlich durch den Wassergehalt bestimmt.

3.3.4 Scherfestigkeitsmessung

Während der Zugkraftmessungen werden neben der Gewichtskraft des Forwarders auch die Antriebskräfte gegen die oberen Bodenschichten abgestützt. Die Abstützung der Antriebskräfte erfolgt dabei in horizontaler Richtung formschlüssig, bis die durch das Profil geschaffenen „Startblöcke“ abgesichert werden. Je nach Bodenartenzusammensetzung, Bodenwassergehalt, Humusgehalt und der Trockendichte des befahrenen Bodens variieren die übertragbaren Antriebskräfte. Die Scherfestigkeit der befahrenen Standorte bietet somit weiteres Erklärungspotential für die unterschiedliche Ausprägung der Traktionsbeiwerte in Abhängigkeit des Antriebsschlupfs. Um dieser Bedeutung gerecht zu werden, wird auf allen Versuchsgassen die Scherfestigkeit gemessen. Das erforderliche Messequipment ist erst zum Ende der Versuchsserien beschafft worden, so-

dass die Messung auf den meisten Versuchsgassen erst deutlich nach den Versuchen durchgeführt wurden.



Abbildung 7: Scherfestigkeitsmesser mit halb versenkter Messvine

Die Messungen werden mit einem leichten Scherfestigkeitsmesser der Firma Eijkelkamp Agri-search Equipment BV (Niederlande) durchgeführt. Bestimmt wird dabei die maximale Schubspannung, die in tangentialer Richtung auf den Boden übertragen werden kann, bevor dieser abgeschert wird. Die Angabe der Scherfestigkeit erfolgt in der Maßeinheit kPa. Für die Messungen wird eine Achse mit daran montierten Flügeln in den Boden gesteckt und mit gleichmäßiger Geschwindigkeit und Kraft gedreht. Der in Abbildung 7 dargestellte Scherfestigkeitsmesser bestimmt dabei die maximale Scherkraft, die auf den Boden ausgeübt werden kann. Diese wird auf einem Schiebering mit Skalierung angezeigt. Je nach Bodenbedingungen kann zwischen drei unterschiedlichen Messflügeln und einem Nullmessstab gewählt werden. Der Nullmessstab dient dabei der Bestimmung der geräteinternen Reibung, die vom gemessenen Wert abgezogen werden muss.

3.3.5 Laboruntersuchungen

3.3.5.1 Trocknung der Stechzylinderproben

Neben den direkt im Bestand erhobenen Daten werden, wie in Abbildung 8 gezeigt, Stechzylinderproben aus den unterschiedlichen Bereichen „Bestand“, „Mitte“ und „Fahrspur“ entnommen. Die Stechzylinder haben einen Durchmesser von knapp 80 mm und eine Höhe von 50 mm, woraus sich ein Bodenvolumen von jeweils 250 cm³ ergibt. Zur Bestimmung der Trockendichte und des gravimetrischen Wassergehalts werden diese gewogen und darauf einer Trocknung bei 40 °C unterzogen. Aus dem Vergleich des Ausgangsgewichts und des Trockengewichts ergibt sich der gravimetrische Bodenwassergehalt, während das Trockengewicht zusammen mit dem festen Volumen des Stechzylinders Auskunft über die Trockendichte des Bodens gibt. Anhand der für jede Versuchsgasse entnommenen Proben können Aussagen über die Unterschiede zwischen den einzelnen Bereichen einer Rückegasse getroffen werden.



Abbildung 8: Entnahme einer Mineralbodenprobe mit Hilfe eines Stechzylinders (250 cm³)

3.3.5.2 Korngrößenzusammensetzung

Die Einordnung der befahrenen Standorte in die lössdominierten Böden erfolgt anhand der Korngrößenverteilung, die Auskunft über die Zusammensetzung des Mineralbodens aus den unterschiedlichen Korngrößenfraktionen - Sand, Schluff und Ton - gibt. Die Zusammensetzung einer Stechzylinderprobe aus den unterschiedlichen Fraktionen entscheidet über die Zuordnung zu den relevanten Böden. Aufgrund der hohen Kosten der Korngrößenanalyse wird für jede Versuchsgasse nur eine Bodenprobe entnommen und analysiert. Durch die präzise Bestimmung im Labor besteht die Möglichkeit, den Einfluss selbst geringer Unterschiede in den Zusammensetzungen auf das Traktionsverhalten von Fahrzeugen zu untersuchen.

Vor der Analyse werden die Proben von Kalk und organischer Substanz befreit. Zur Entkalkung wird eine 10 %ige Salzsäurelösung (HCl) verwendet, während die Auflösung der organischen Bestandteile mittels Wasserstoffperoxid (H_2O_2) erfolgt. Anschließend werden alle Bestandteile des Mineralbodens in einer Flüssigkeit aufgelöst, sodass sich eine Suspension ergibt. Hierzu werden diese mit tetrabasischem Natriumdiphosphat ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) dispergiert (fein verteilt). Eine erste Trennung der Fraktionen kann durch Sieben des Materials erfolgen, sodass zumindest Korngrößen über 50 bis 100 μm aussortiert werden können. Daran schließt eine Trennung des verbleibenden Materials mittels Sedimentation an, die bis zu einer Korngröße von 1 μm verwendet wird. Eine weitere Aufspaltung nach Korngrößen erfordert eine stärkere Beschleunigung, als dies von der Erdanziehungskraft geleistet werden kann, weshalb der letzte Trennungsprozess in einem Zentrifugalfeld erfolgt. Um bei diesem Verfahren vergleichbare Ergebnisse zu gewährleisten, ist es erforderlich stets die Prozeduren genau einzuhalten sowie die Vorbehandlung genau zu protokollieren (HARTGE UND HORN, 1999).

Neben der Zusammensetzung aus den unterschiedlichen Bodenfraktionen wurde zusätzlich das C/N-Verhältnis, die Wasserspannungskurve sowie der Humusgehalt der Proben bestimmt. Da diese Informationen jedoch im Weiteren keine Verwendung finden, erfolgt auch keine Beschreibung der Untersuchungsmethoden.

3.4 Versuchsbestände

3.4.1 Überblick / Hintergrund

Die beschriebenen Versuche wurden in unterschiedlichen Beständen im Bereich des südniedersächsischen Berglandes (s. Abbildung 9) durchgeführt. Die Auswahl der Bestände erfolgte anhand der Oberbodenzusammensetzung, die einer der bereits in Kap. 3.3. beschriebenen Bodenvarianten entsprechen musste. Diese sind jeweils durch eine mächtige Lössauflage geprägt und unterscheiden sich anhand des Skelettanteils. Besonders die niedersächsischen Forstämter Reinhausen und (Bad) Lauterberg stellten einen Großteil der Versuchsflächen. Im Bereich des Forstamtes Reinhausen wurden vorwiegend Flächen ohne nennenswerte Skelettanteile im Oberboden ausgewählt, während in Lauterberg hauptsächlich die Varianten untersucht wurden, die Skelettanteile im Oberboden aufwiesen. Ein weiterer Teil der Versuche erfolgte im Bereich der Revierförstereien Bursfelde und Goseplack des niedersächsischen Forstamtes Münden, die sich bezüglich des Vorkommens kleinerer Steine im Oberboden nicht eindeutig einordnen lassen.

Für die einzelnen Versuchsserien wurde auf eine räumliche Nähe der Flächen geachtet, um die Kosten und den Aufwand für das Umsetzen des Forwarders und der Verzögerungstechnik gering zu halten. Dadurch lassen sich die Versuchsblöcke oftmals einzelnen Bereichen einer Revierförsterei zuordnen. Wo möglich wird im Weiteren das „Versuchsgebiet“ genauer beschrieben, während für die einzelnen Bestände nur Besonderheiten hervorgehoben werden. Genauere Informationen zu den Versuchsbeständen finden sich im Anhang (Tabellen III, 1 – 4).



Abbildung 9: Lage der Versuchsrevierförstereien im Süd-niedersächsischen Bergland

3.4.2 Rfö Reinhausen (NFA Reinhausen)

Im Zeitraum vom 20. November 2006 bis zum 15. Dezember 2006, im darauffolgenden Jahr in der Zeit vom 19. November bis 14. Dezember sowie vereinzelt im Frühjahr und Sommer des Jahres 2008 wurden Fahrversuche in der Revierförsterei (Rfö.) Reinhausen vorwiegend im Bereich des „Jägersteins“ durchgeführt. Die Forstabteilungen (Abt.) 11 bis 17 liegen auf einem Plateau, das durch überwiegend starke Steigungen begrenzt wird. Die Abteilungen befinden sich dabei auf einer Höhe zwischen 250 m und etwas über 300 m über NN. Gleiches gilt für die Abteilungen 34, 36 und 40, die sich in der Nähe des Ortes Reinhausen befinden und damit räumlich getrennt von den übrigen Versuchsflächen, was jedoch nur geringe Auswirkungen auf die vorgefundenen Bodenarten hat. So wird der gesamte Bereich dem Wuchsbezirk Göttinger Wald zugeordnet und ist durch einige kleinere Kerbtäler geprägt, die jedoch die Versuche unter ebenen Bedingungen nicht beeinträchtigten. Insgesamt standen 25 Rückegassen in der Rfö. Reinhausen zur Verfügung. Die Bodenarten im Oberboden variierten dabei zwischen schwach lehmigem Sand und stark tonigem Schluff, wobei es zwei Schwerpunkte bei den Bodenarten gibt. So wurde bei der nachträglichen Standortkartierung ein häufiges Auftreten von lehmigen Sanden und tonigem Schluff festgestellt. Die vorgefundenen Humusformen unterscheiden sich demgegenüber nur geringfügig. Bei vorherrschender Buchenbestockung wurde die Humusform überwiegend als F-Mull angesprochen, während die vereinzelt Fichtenflächen einen typischen Moder aufwiesen.

3.4.3 Rfö Goseplack (NFA Münden)

In der Zeit von 26. März 2007 bis 13. April 2007 konnten Versuche im Bereich der Revierförsterei Goseplack des Forstamtes Münden durchgeführt werden. Durch die Lage am Rande des Sollings im Wuchsbezirk Unterer Solling zeichneten sich einige Versuchsgassen durch eine geringe Mächtigkeit der Lössauflage und in der Folge ein entsprechendes Vorkommen von deutlichen Skelettanteilen aus. Die Versuche wurden in den Plateaulagen der Abteilungen 2004 bis 2008 in einer Höhe zwischen 300 m und 350 m absolviert. In der Abteilung 2005 b fanden sich in direkter Nähe zu den Versuchsgassen unter ebenen Bedingungen ebensolche mit Hangneigungen zwischen 30 % und 33 %, die für Vergleichsfahrten in Hanglagen verwendet werden konnten. Die Bestände der Abteilungen sind vorwiegend durch Fichtenbestockung geprägt, die in den Randbereichen in einen Buchenwald übergeht. Während des Versuchszeitraums herrschte warmes und trockenes Wetter, sodass ein erheblicher Teil der resultierenden Datensätze den Varianten mit geringerem Wassergehalt im Boden zugeordnet wird. Durch die räumliche Nähe der Versuchsgassen sind nur geringe Unterschiede zwischen der Bodenzusammensetzung der einzelnen Bereiche festzustellen. So wurden während der Nachkartierung der Flächen vorwiegend mittel bis stark lehmige Sande festgestellt. Das Bild vergleichsweise einheitlicher Bodenbedingungen setzt sich zudem bei der Ansprache der Humusformen fort. So handelt es sich vorwiegend um typische Moderhumusformen.

3.4.4 Rfö Bursfelde (NFA Münden)

Auf den Flächen der Revierförsterei Bursfelde im Forstamt Münden fanden in der Zeit vom 16. Juli 2007 bis zum 27. Juli 2007 Fahrversuche unter ebenen Bedingungen statt. Die Versuchsfelder befinden sich an der sogenannten „Langen Bahn“, einem Forstweg entlang der Plateaulagen des Wuchsbezirks „Bramwald-Brackenberg“. Die schwach geneigten in einer Höhe von 390 m bis 410 m über NN gelegenen Versuchsbestände sind vorwiegend mit Buchen bestockt. Nach Westen fällt das Geländeprofil zur Weser hin ab, während sich im Osten das tiefer gelegene Leinetal anschließt. Auf den der Weser zugeneigten Flächen ist die Lössauflage deutlich geringer ausgeprägt, sodass teilweise während der Versuche der Eingriff der Reifen bis auf das Ausgangsgestein reichte. Demgegenüber weisen die Flächen mit leichter Exposition nach Osten eine mächtigere Lössauflage auf. Zusammen mit den witterungsbedingt hohen Bodenfeuchten der Versuchsgassen mussten, aufgrund starker plastischer Verformungen des Bodens, einzelne Versuche bereits nach wenigen Überfahrten beendet werden. Die vorgefundenen Bodenarten reichen von schwach-lehmigem Sand bis hin zu mittel sandigem Lehm, während die Humusform vorwiegend als Rohhumus angesprochen wurde.

3.4.5 Rfö Kapellenfleck (NFA Lauterberg)

Im Zeitraum vom 06. Mai 2008 bis zum 29. Mai 2008 wurden in Teilen der Revierförsterei Kappellenfleck des Forstamtes Lauterberg Versuche durchgeführt. Die Flächen befinden sich in einer Höhe von ca. 600 m über NN auf einem größerem Plateau in der Nähe von Braunlage. Bestockt sind diese mit Fichten unterschiedlichen Alters. Einige Versuchsgassen befinden sich zudem auf einer Windwurffläche aus dem Jahr 2007, die bislang noch nicht vollständig aufgeforstet wurde. Der gesamte Versuchsbereich ist durch Lössboden mit hohem Skelettanteil geprägt und aufgrund der steilen Hänge entlang des Plateaus mit einer Vielzahl von Rückewegen ausgestattet. Demgegenüber fehlt es in weiten Teilen an einem festen Rückegassennetz für die hochmechanisierte Holzernte mit Harvester und Forwarder. Ursache hierfür sind zurückliegende Pflegeeingriffe, die auch in den befahrbaren Lagen nicht immer mit hochmechanisierten Verfahren durchgeführt wurden. Dies bereitete insbesondere für die Auswahl von Gefällestrecken für die Vergleichsmessungen Probleme, sodass vereinzelt auch entsprechend geneigte Rückewege verwendet wurden. Diese weisen jedoch ein den Bestandesbedingungen vergleichbares Bodensubstrat auf. Zudem konnten auch Versuche auf Rückewegen unter ebenen Bedingungen absolviert werden, um so die direkte Vergleichbarkeit sicherstellen zu können.

3.5 Versuchsfahrzeug

3.5.1 Ponsse S10

Für die Messung des Traktionskoeffizienten und der Grenzhangneigungen kommt die Schulungsmaschine (siehe Abbildung 10) der Arbeitsgemeinschaft forstwirtschaftlicher Lohnunternehmer in Niedersachsen e.V. (AfL Nds) zum Einsatz. Dabei handelt es sich um einen Ponsse Forwarder des Typs S10 aus dem Jahr 1996. Die Maschine wurde 2006 für Ausbildungszwecke beschafft und steht den Mitgliedern des Verbandes sowie je nach Bedarf für die beschriebenen Versuche zur Verfügung. Stationiert und gewartet wird der Forwarder bei der FoWi Holzhandels und Holzeinschlags GmbH und Co KG in Wiegersen. Von hier erfolgt der Transport der Maschine in das jeweilige Versuchsgebiet im Südniedersächsischen Bergland.

Die zulässige Zuladung des Forwarders beträgt 10.000 kg bei einer gemessenen Eigenmasse von 11.750 kg. Diese verteilt sich auf eine Länge von 8.140 mm, eine Breite von 2.600 mm und eine Höhe der Maschine von 3.470 mm. Zu Beginn der Versuche wies die Maschine ca. 6.500 Betriebsstunden auf, was sich durch den betrieblichen Einsatz im Laufe des Versuchszeitraums auf über 10.000 Betriebsstunden erhöht hat. Diese Alterung hat für die Versuche und deren Vergleichbarkeit jedoch keine Bedeutung. Je nach Beladungszustand während der Versuche variiert die Achslastverteilung zwischen 60 % vorne und 40 % hinten in unbeladenem Zustand sowie 42 % auf der Vorderachse und 58 % auf der Hinterachse bei einer Beladung mit 8.100 kg Buchenabschnitten der Länge 5 m. Ein Vergleich dieser Werte mit der Achslastkalkulation für Forwarder nach JACKE (2003) weist die maximale Beladung des Rückezugs während der Messungen

als nicht kritisch aus. Erst ab einer Zuladung von knapp 9.000 kg ist eine unzulässige Belastung der Hinterachse zu erwarten. Diese ist jedoch angesichts der Rungenkorbgröße nur mit sehr frischem Holz oder aber einer Sortimentslänge über 5 m zu erreichen.



Abbildung 10: Versuchsforwarder Ponsse S10 mit Ketten und Bändern sowie montierter Messtechnik

3.5.2 Motor und Fahrtrieb

Als Antrieb für den Ponsse S 10 dient ein Perkins Dieselmotor des Typs 1004-4TW mit einer Nennleistung von 84 kW bei 2.600 Motorumdrehungen. Der wassergekühlte Motor verfügt über einen Abgasturbolader und liefert ein maximales Drehmoment von 402 Nm. Anhand der Motorleistung ordnet sich der Ponsse S 10, entsprechend der FPA-Definition (KWF, 1999), in die mittlere Leistungsklasse für Forwarder ein.

Die Leistung des Dieselmotors wird einer hydraulischen Wandlung unterzogen, um so den Kran und den Fahrtrieb zu versorgen. Dabei wird die Motorleistung von zwei hydraulischen Pumpen aufgenommen, wovon die eine für den Betrieb der Arbeitshydraulik erforderlich ist, während die zweite Hydraulikpumpe lediglich für den Fahrtrieb vorgesehen ist. Der hydrostatische Fahrtrieb zur Wandlung der Motordrehzahlen in Vortrieb der Maschine besteht somit aus einer stufenlos verstellbaren Axialkolbenpumpe, die über einen geschlossenen Hydraulikkreislauf mit einem zweistufig verstellbaren Axialkolbenhydraulikmotor verbunden ist. Durch den geschlossenen Kreislauf ergibt sich eine gegenseitige Beeinflussung zwischen Pumpe und Motor, sodass der Fahrtrieb auch ein Bremsmoment übertragen kann. Eine sogenannte Taumelscheibe in der Pumpe, deren Auslenkung verstellbar ist, ermöglicht zum einen eine Übertragung unterschiedlicher Momente und zum anderen durch die Auslenkung in „negativer Richtung“ eine Umkehr der Fahrtrichtung. Neben den Verstellmöglichkeiten der Fahrtriebepumpe, die Fahrtrichtung und

übertragene Leistung bestimmen, kann der Hydraulikmotor des Forwarders zweistufig voreingestellt werden. Daraus ergibt sich eine Art „Zwei-Gang-Getriebe“, dessen erste Fahrstufe für Geländefahrten mit höherem Zugkraftbedarf bestimmt ist, wohingegen die zweite Stufe für Umsetzfahrten mit höherer Geschwindigkeit vorgesehen ist. Die Verstellung der Fahrtriebepumpe geschieht während des Fahrbetriebes je nach geforderter Abtriebsleistung und Geschwindigkeit. Die Wahl zwischen den zwei Stufen des Hydraulikmotors ist demgegenüber auf den Stillstand der Maschine beschränkt.

Die weitere Kraftübertragung vom Hydraulikmotor auf die Antriebsräder erfolgt über ein Achsverteilergetriebe auf mechanischem Wege. Das Getriebe treibt wahlweise eine oder beide Bogieachsen des Forwarders an, die ihrerseits über ein Differential und das eigentliche Bogie die 4 Räder einer Achse antreiben. In der Geländestellung werden beide Bogieachsen angetrieben, während für Straßen- und Umsetzfahrten die Achse des Hinterwagens (unter dem Rungenkorb) vom Antrieb getrennt werden kann und daher kein Drehmoment übertragen wird. Da ausschließlich in der Geländestellung gefahren wird, hat diese Stellung hinsichtlich der Versuche jedoch keine Bedeutung.

Die Grenzen des beschriebenen Antriebsstrangs wurden zu Beginn des Projekts bei Versuchen mit beladener Maschine und aufgezogenen Gleitschutzketten sowie Bogiebändern eher zufällig ermittelt. Im Rahmen der Versuche zog der Forwarder das Stahlseil von der Verzögerungstechnik so lange, bis die Maschine bei vollausgelenkter Einspritzpumpe (Vollgas) auf der Versuchsgasse stehen blieb, ohne dass die Räder durchdrehten. Während der Motor vor dem Stillstand des Forwarders noch deutlich über den hydrostatischen Fahrtrieb gedrückt wurde, drehte er mit Beginn des Fahrzeugstillstands ohne akustisch erkennbare Last, obwohl das Messsystem eine Zugkraft von ca. 100 kN anzeigte. Aufgrund einer anfänglichen Sorge um den technischen Zustand der Maschine wurden die Drücke der Fahrtriebepumpe an dafür vorgesehenen Anschlussstellen gemessen und mit den Angaben des Herstellers (MÜLLER, 2006) verglichen. Die Messungen ergaben in beiden Fahrrichtungen Drücke von ca. 415 bar, was angesichts des Alters und der bisher geleisteten Betriebsstunden der Versuchsmaschine durchaus als normal anzusehen ist. Eine neue Maschine weist an den vorgesehenen Messstellen Drücke von ca. 425 bar auf.

3.5.3 Fahrwerk

3.5.3.1 Allgemeines

Das Fahrwerk des Ponsse S10 besteht, wie bei Forwardern üblich, aus einem Vorder- und Hinterwagen in Rahmenbauweise. Während der Vorderwagen die Fahrerkabine sowie den Motor und den hydraulischen Antrieb trägt, nimmt der Hinterwagen den Kran auf und ist als Rungenkorb ausgelegt. Vorder- und Hinterwagen verfügen über eine Starrachse, an der je zwei Bogie-Radträger sitzen, sodass sich die Maschine über 8 Räder auf dem Boden abstützt. Die Lenkung des Forwarders erfolgt durch eine hydraulische Rahmenknicklenkung zwischen den beiden Rahmen teilen. Eine Besonderheit des Forwarders ist die bereits werkseitige Verwendung von zwei unter-

schiedlichen Reifengrößen auf der Vorder- und Hinterachse: Für den Vorderwagen sind Reifen der Dimension 600/50 – 22,5² vorgesehen, für den Hinterwagen hingegen 700/45 – 22,5.

Für das Traktionsverhalten der Maschine ist die Zusammenstellung der Endantriebskomponenten von entscheidender Bedeutung. Um diesem Umstand gerecht zu werden, wird während der Versuche bei der Bereifung zwischen gebrauchten und neuen Reifen gewechselt und zudem der Einfluss von Traktionshilfsmitteln untersucht. Zur Verbesserung der Fahrzeugmobilität unter schwierigen oder geneigten Geländebedingungen kommen bei Forstspezialmaschinen oftmals Gleitschutzketten und Bogiebänder zum Einsatz. Eine typische Kombination besteht dabei aus Bändern auf dem Bogie des Hinterwagens und einem Paar Ketten auf den dem Mittelgelenk zugewandten Rädern des Vorderwagens (s. Abb. 10).

3.5.3.2 Bereifung

Bei der Variante „gebrauchte Reifen“ handelt es sich um jene Reifen, die zu Beginn der Versuche auf der Maschine montiert waren und durch die vorherige Nutzung bereits deutliche Alterungsspuren aufwiesen. Die „gebrauchten“ Reifen des Typs TRS-LS2 stammen vom Hersteller Nokian Tyres plc. Während der ersten Versuche im Bereich des Forstamtes Reinhausen wurden die Reifen der vorderen Bogie-Achse vermessen. Dabei konnten Profiltiefen zwischen 22 mm und 30 mm festgestellt werden. Es zeigte sich, dass die mittelgelenkseitigen Reifen geringere Profiltiefen von lediglich 22 mm aufwiesen, während die beiden anderen Reifen des Bogies mit 27 mm und 30 mm eine reduzierte Abnutzung zeigten. Messungen von EBEL (2006) weisen für den Neuzustand eine Profiltiefe von 42 mm aus. Das entspricht Restprofiltiefen zwischen 52 % und 71 % bezogen auf den Neuzustand.

Als alternative Variante „Neubereifung“ dienen neue Trelleborg Pneus mit dem Profil T 428. Diese weisen nach EBEL (2006) eine Profiltiefe von 35 mm auf und werden lediglich während der Versuchseinsätze auf dem Forwarder montiert, um so den „Neuzustand“ aufrecht zu erhalten. EBEL (2006) ordnet die Trelleborg Reifen mit dem Profil T 428 ebenso wie die „gebrauchten“ Nokian Reifen den Softprofilen zu, welche sich im Vergleich zu Traktionsprofilen durch geringere Profiltiefen und einen geringeren Anteil des Stollenzwischenraums (Negativprofil) auszeichnen. Hinzu kommt, dass die Reifen eine rundere Reifenschulter haben und durch den höheren Stollenanteil in der Lauffläche einen vibrationsärmeren Lauf bei längeren Transportfahrten bieten. Die Reifen für den Hinterwagen weichen in der Dimensionsbezeichnung (710/40 – 22,5) geringfügig von den „gebrauchten“ Reifen ab, was auf eine Vereinheitlichung der Bezeichnungen bei Trelleborg zurückgeht.

Weitere Informationen zu den Abmessungen und Abnutzungserscheinungen des „gebrauchten“ Reifensatzes sowie Bilder der Reifen befinden sich im Anhang (Abb. III, 1-4; Tab. III, 5).

² Die Reifendimensionsangabe enthält Angaben zur Reifenbreite, zum Höhen-Breiten-Verhältnis, zur Reifenbauweise sowie zum Felgendurchmesser. Für einen exemplarischen Reifen der Dimension 600/50 – 22,5 folgt: 600: Angabe der Reifenbreite in mm; 50: die Reifenflankehöhe entspricht 50 % der Reifenbreite; – : Angabe der Schlagweise des Reifens, hier Diagonal (alternativ R für Radial); 22,5: Nenndurchmesser der Felge in Zoll (1 Zoll (") entspricht 2,54 cm)

3.5.3.3 Traktionshilfsmittel

Viele Forstunternehmer setzen zur Verbesserung der Steigfähigkeit sowie für ein sicheres Fahren auf Steigungen Gleitschutzketten und Bogie-Bänder ein. Eine häufig verwendete Kombination besteht aus Bändern auf dem Hinterwagen und einem oder zwei Paar auf dem vorderen Bogie montierten Gleitschutzketten. Für die Versuche stehen Gleitschutzketten des Typs PRO-GRIP S sowie Bänder des Typs ECO-OFF, jeweils von der Olofsfors AB, zur Verfügung.

Während der Versuche mit Traktionshilfsmitteln ist das Paar Bänder auf dem Hinterwagen des Forwarders montiert. Bei dem Band ECO-OFF handelt es sich um ein speziell für steinige und lehmige Böden in geneigtem Gelände entwickeltes Traktionsband. Zudem ist es laut Herstellerangaben auch für schwierige Schneesverhältnisse geeignet und zeichnet sich durch eine gute Säuberungseigenschaft aus. Wie bei den Bändern der ECO-Serie üblich, ist das (Außen-) Gelenksystem nahe dem Abrollumfang des Reifens positioniert, was eine reduzierte Reibung des Bandes auf dem Reifen bewirkt. Bei früheren Konstruktionen und für einige Sondereinsatzgebiete kommen heute noch Bänder mit tiefer liegenden Seitengliedern zum Einsatz, wodurch die Strecke einer Radumdrehung länger als die einer Bandumdrehung auf Gelenkhöhe ist. Dadurch entsteht Schlupf zwischen Band und Reifen und es kommt zu einer deutlich höheren Reibung. Dies hat negative Auswirkungen auf den Treibstoffverbrauch und auf den Verschleiß der Reifen sowie des Bandes (WIPPERMANN, 2000).

Die Gleitschutzketten PRO-GRIP S werden auf den mittelgelenkseitigen Rädern des vorderen Bogies montiert. Es handelt sich dabei um eine Netzkette mit einer Materialstärke von 13 mm, bei der zur Verbesserung der Traktionseigenschaften die Verbindungsglieder mit Doppelspikes ausgestattet sind. Durch die Spikes verbessert sich neben der Traktion auch die Abrutschsicherheit bei verschneiten oder vereisten Untergründen.

3.6 Datenerfassung

3.6.1 Einführung

Die bei den Fahrversuchen verwendete Messtechnik setzt sich aus mehreren Bausteinen verschiedener Hersteller zusammen. Basis der Datenerfassung ist dabei das Messverstärkersystem MGCsplit von Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM). Dieses wird durch Sensoren und Messaufnehmer zur Erfassung der Geschwindigkeiten und der Zugkraft ergänzt. Das Messsystem besteht für die Versuche aus vier modularen Bausteinen: ein separates Netzteil versorgt zwei angeschlossene Messverstärkermodule sowie die Kommunikationseinheit CP 42 mit der nötigen Spannung. Die einzelnen Module werden über eine Split-Line verbunden und ermöglichen dadurch die zeitparallele Aufzeichnung der Messdaten aus allen Messverstärkerkanälen. Dabei sind Messraten bis zu 2.400 Hz möglich, sodass auch hochdynamische Prozesse mit Hilfe des Messsystems untersucht werden können. Derart hohe Messraten sind jedoch für Fahrversuche mit Forstmaschinen nicht erforderlich, sodass eine Messrate von 10 Hz gewählt wurde.

3.6.2 Netzteil und Kommunikationsprozessor

Die Stromversorgung des Messsystems erfolgt zwischen dem Netzteil und den in Reihe geschalteten Messverstärkermodulen über die Split-Line (blau). Abbildung 11 zeigt die Unterbringung der Messverstärkermodule in einem Raupenharvester. Das Netzteil vom Typ NT 650 kann mit Eingangsspannungen zwischen 10 V und 50 V betrieben werden und ist somit für den Anschluss an alle gängigen Fahrzeugbordnetze (12, 24, 42 V) geeignet. Die Versorgungsspannung für die bis zu zehn anschließbaren Module beträgt 28 V (DC). Angeschlossen wird das Netzteil an die Standard-Bordsteckdose der Versuchsmaschine. Spannungsschwankungen oder –unterbrechungen, wie sie beispielsweise beim Starten des Verbrennungsmotors auftreten, werden bis zu einer Dauer von 50 s ohne Ausfall des Messsystems überbrückt.



Abbildung 11: MGCsplit Messtechnik (bestehend aus Netzteil, Kommunikationsprozessor und 2 Messverstärkermodulen) in der Fahrerkabine eines Raupenharvesters

Das Netzteil ist direkt verbunden mit dem Kommunikationsprozessor (Typ CP42), der die Daten aus den Messverstärkern auf einer PCMCIA-Card abspeichert. Aufgrund der internen Datenspeicherung kann auf einen weiteren Computer, bei dem langfristig durch die Erschütterungen beim Maschinenbetrieb Schäden zu erwarten wären, während der Messwertaufzeichnung verzichtet werden. Die Bedienung und Einstellung des Messsystems erfolgt über die mit dem Kommunikationsprozessor verbundene Anzeige- und Bedieneinheit vom Typ ABX22A. Diese dient zur Visualisierung der Messwerte und zur Einstellung der Messverstärkerkanäle inklusive Justierung. Die Messung lässt sich von der Bedieneinheit aus starten und beenden.

3.6.3 Zugkrafterfassung

Die Zugkraftmessung erfolgt über einen Kraftaufnehmer im Zugmaul der Versuchsmaschine, der mit einer Umlenkrolle verbunden ist. Der in Abbildung 12 dargestellte HBM-Kraftaufnehmer vom Typ U2B ermittelt die Zugkraft zwischen der Maschine und der Abbremsstechnik auf Basis der Dehnungsmessstreifentechnik. Diese beruht auf der Änderung des Widerstands, sobald ein elektrisch leitendes Material verformt wird (HOFFMANN, 1987). Der Gesamtwiderstand setzt sich aus dem Grundwiderstand des Materials und dem Dehnungswiderstand zusammen. Letzterer lässt sich in die Änderung des Leiterquerschnitts und die veränderte Leitfähigkeit des Materials aufteilen (BAUMGARTNER UND RUHM, 2001). Wird ein Draht gedehnt, reduziert sich zum einen der Querschnitt, während die Länge zunimmt, und zum anderen verändert sich das Kristallgitter, was wiederum die Leitfähigkeit des Materials beeinflusst (KLECKERS UND GÜNTHER, 2007). Dieser Effekt ist speziell bei Halbleitern besonders ausgeprägt und übertrifft oftmals den Einfluss der Querschnittsänderung.



Abbildung 12: Zugkraftmessdose montiert zwischen dem Versuchsforwarder und der Umlenkrolle zur Reduktion der Seilkräfte durch das „Flaschenzugprinzip“

Bei dem Kraftaufnehmer handelt es sich um eine DMS-Vollbrücke, die werkseitig mit einer Sechselekterschaltung ausgestattet ist, sodass ein verlässlicher Messwert auch bei längeren Kabeln oder Temperaturschwankungen sicher gestellt ist. Der Aufnehmer wird in die Genauigkeitsklasse 0,1 % eingeordnet und ist nach Schutzart IP67 geschützt. Dadurch können selbst unter widrigsten Bedingungen präzise die Kräfte gemessen werden. Der Kraftaufnehmer kann mit Speisespannungen zwischen 0,5 V und 12 V betrieben werden. Üblicherweise erfolgt die Speisung jedoch mit 5 V aus dem Messverstärker. Während des Messens hoch dynamischer Prozesse erlaubt der Kraftaufnehmer eine relative Schwingbeanspruchung von 160 % des Messbereichsendwerts. Die Belastung des Aufnehmers kann, ohne dass dieser Schaden nimmt, schlagartig von einer Druck-

beanspruchung von 120 kN auf eine Zugbelastung von 200 kN gewechselt werden. Höhere Beanspruchungen führen zu einer nachhaltigen Veränderung des Aufnehmers. Gleiches gilt für die maximale Gebrauchskraft, die das 1,5-fache des Endwerts nicht überschreiten darf.

Der Anschluss des Kraftaufnehmers erfolgt an das Mehrkanalmessverstärkermodul ML 801, das mit einer Anschlussplatte des Typs AP815i zum Anschluss von Dehnungsmessstreifenempfängern ausgerüstet ist. Es können insgesamt acht Empfänger an die AP815i angeschlossen werden. Je nach Einsatzzweck lassen sich DMS-Vollbrücken, -Halbbrücken und -Viertelbrücken anschließen, die wiederum je nach Ausrüstung des Empfängers in Sechs-, Fünf- oder Vierleiterschaltung angeschlossen werden können. Dabei sind nach Möglichkeit höherstufige Leiterschaltungen zu bevorzugen, da für diese Temperatureffekte, Beeinflussungen durch lange Kabel und elektromagnetische Einflussfaktoren nahezu ohne Bedeutung sind. Der Kraftempfänger ist daher mit einer Sechsliterschaltung ausgestattet. Die Anschlussplatte AP815i entspricht nach HBM-Einstufung der Genauigkeitsklasse 0,1 %. Dies bedeutet, dass kein die Messgenauigkeit beeinflussender Faktor zu einem Messfehler über 0,1 % des Messbereichsendwertes führt.

3.6.4 Geschwindigkeiten

3.6.4.1 Hintergrund

Die Berechnung des Schlupfes (s. Kap 2.2) beruht auf der Erfassung von Weg- oder Geschwindigkeitsverlusten. Im Rahmen der Fahrversuche werden zwei Geschwindigkeiten ermittelt, aus denen der Schlupf bestimmt wird. Dies ist zum einen die theoretische Geschwindigkeit, die an den Rädern der Versuchsmaschine gemessen wird und zum anderen die tatsächliche Geschwindigkeit, welche die relative Bewegung des Fahrzeugs über Grund beschreibt. Gemessen werden die Geschwindigkeiten mit inkrementalen Drehgebern. Die verwendeten Sensoren vom Typ 5800 der Firma Fritz Kübler GmbH verfügen über eine eigene Messwelle, die je nach Messaufgabe mit variierenden Messrädern bestückt werden kann. Die verwendeten inkrementalen Drehgeber liefern 5.000 Signale pro voller Wellenumdrehung bei einer maximal zulässigen Drehzahl von 12.000 min^{-1} . Bei der Versorgungsspannung für den Sensor kann zwischen 5 V und 30 V gewählt werden.

Im Sensor werden von einer lichtemittierenden Diode (LED) ausgesendete Lichtwellen durch eine rotierende Codescheibe mit Schlitzern verändert und von einem (speziellen) optischen Sensor aufgenommen. Dreht sich die Welle, entstehen sinusförmige Impulse, die in rechteckförmige Ausgangssignale gewandelt werden. Diese sind für eine eindeutige Signalerkennung erforderlich und zeichnen sich durch sehr geringe Anstiegs- und Abfallzeiten von maximal $1 \mu\text{s}$ aus. Während einer Wellenumdrehung werden 5.000 Impulse an das Messverstärkersystem abgegeben. Je nach Einstellung des Messverstärkers können Winkel erkannt, Strecken bestimmt oder im vorliegenden Fall über eine Verschneidung mit der Zeit Frequenzen ermittelt werden. Über die Eingabe einer Empfängercharakteristik wird aus der gelieferten Frequenz direkt die Umfangsgeschwindigkeit des Messrades errechnet und abgespeichert.

Die Messsignale der inkrementalen Drehgeber werden an ein Messverstärkermodul ML 460 mit einer Anschlussplatte AP460i zur Verarbeitung von Impuls- und Frequenzsignalen angeschlossen. Für die Geschwindigkeitsmessung wird aus den Impulssignalen des Sensors und der Zeit eine Frequenz bestimmt, die proportional zur gefahrenen Geschwindigkeit ist. Die erforderliche Kennlinie zur Umrechnung wird über das Bedienteil eingegeben.

3.6.4.2 Tatsächliche Geschwindigkeit

Für die Ermittlung der tatsächlichen Geschwindigkeit, also der Geschwindigkeit „über Grund“, kommt eine dem Fadenmessgerät nachempfundene Spill-Konstruktion mit einem inkrementalen Drehgeber zum Einsatz. Die in Abbildung 13 dargestellte Konstruktion basiert auf dem Auszug der nahezu dehnungsfreien Angelsehne über ein Mess- beziehungsweise Spillrad. Das mehrfach umschlungene Messrad treibt einen inkrementalen Drehgeber (hier orange) an. Die Angelrolle dient dabei dem Abbremsen, um eine gleichmäßige Spannung der Angelsehne sicherzustellen, und darüber hinaus als Speicher für den Faden. Anhand des Umfangs des Messrades lässt sich die Abrollgeschwindigkeit des Fadens von der Rolle bestimmen, welche der tatsächlichen Geschwindigkeit der Versuchsmaschine relativ zum Untergrund entspricht. Die in anderen fachlichen Disziplinen verwendeten Peisler-Räder sind für den Einsatz unter den typisch forstlichen Bedingungen einer Rückegasse mit zum Teil Resten einer Reisigauflage nicht geeignet. Zudem würden die Unebenheiten, die sich aus Wurzelanläufen und teilweise Baumstubben ergeben, beim Einsatz von Peisler-Rädern zu hohe Ungenauigkeiten erzeugen.



Abbildung 13: Spill-Konstruktion zur Erfassung der tatsächlichen Geschwindigkeit

3.6.4.3 Theoretische Geschwindigkeit

Die zur Bestimmung des Schlupfs erforderliche theoretische Geschwindigkeit wird am vorderen linken Bogie der Versuchsmaschine erfasst. Abbildung 14 zeigt eine eigens für diesen Zweck gefertigte Verlängerung der Radachsen mit einem darauf montierten Drehgeber. Die Radachsenverlängerungen werden durch „Sternaufnahmen“ mit den Radbolzen an den zwei Rädern der Bogie-Achse des Forwarders befestigt. Auf die zwei Verlängerungen der Radachse wird zum einen ein Lager gesteckt und zum anderen ein inkrementaler Drehgeber montiert, der die Rotation des Rades misst. Das Lager und der Drehgeber sind über einen Bogieausgleichsträger miteinander verbunden. Dieser ist mit Schubstücken ausgestattet, um Spannungen zwischen Lager und Drehgeber beim Anbau und späteren Betrieb zu vermeiden. Durch diese Konstruktion werden die Bewegungen der Räder beispielsweise durch Geländeunebenheiten ausgeglichen. Eine Verbindung mit dem Fahrzeugaufbau würde höhere Streuungen der Messwerte bedingen, da stärkere Unebenheiten zu einem veränderten Montagewinkel des Drehgebers führen würden.



Abbildung 14: Montage der inkrementalen Drehgeber in der Verlängerung der Radachsen zur Messung der theoretischen Geschwindigkeit

3.7 Verzögerungstechnik

3.7.1 Grundaufbau

Neben der verwendeten Messtechnik ist ein zentraler Bestandteil der Versuche die in Abbildung 5 (vgl. Kap. 3.1) dargestellte Verzögerungstechnik. Diese dient während der Versuche mit unterschiedlichen Maschinen zur standardisierten und damit reproduzierbaren Verzögerung. Der mechanische Teil der Verzögerungsanlage lässt sich, wie in Abbildung 15 dargestellt, grob in vier Bestandteile trennen. Dies sind der Grundrahmen inklusive der erforderlichen Seilführungen, die Seiltrommel, die Bremsanlage sowie der Motor zum Aufspulen des Seils.



Abbildung 15: *Technischer Teil der Verzögerungstechnik bestehend aus Elektromotor, Seiltrommel und Bremsanlage montiert auf dem Grundrahmen*

3.7.2 Grundrahmen

Die Fertigung des Rahmens erfolgte in der Werkstatt des ifa nach den Erfordernissen des Versuchs und wurde durch eine Vielzahl von Vorversuchen weiter optimiert. Hauptaufgabe des Rahmens ist die Verbindung der einzelnen Komponenten zu einer Einheit. Darüber hinaus muss der Rahmen die Zugkräfte der angehängten Maschine aufnehmen und an geeignete Ankerpunkte weitergeben. Während der Konstruktionsphase wurde von Zugkräften bis 300 kN ausgegangen, die keinen Schaden an der Verzögerungstechnik oder am Rahmen verursachen dürfen. Die Auslegung auf derart hohe Zugkräfte dient zum einen der Sicherheit beim Betrieb und soll zum anderen Versuche mit Raupenfahrwerken ermöglichen. Im letzten Fall ist mit Traktionswerten zu rech-

nen, die über 1 liegen. Somit entstehen Zugkräfte, die höher als die Maschinengewichtskraft ausfallen (KUNZE ET AL., 2002). Angesichts der bei Raupenharvestern üblichen Eigenmassen von 20.000 kg und mehr scheint daher die Auslegung der Verzögerungstechnik auf entsprechend hohe Zugkräfte angebracht.

Die Verankerung der Anlage erfolgt über spezielle Laschen zur Befestigung im Boden sowie eine zusätzliche Anbindung an stabile Ankerbäume. In die Laschen werden Erdnägeln mit einem Durchmesser von 30 mm eingeschlagen, sodass die Verzögerungstechnik gegen seitliches Verutschen gesichert ist. Zudem sind diese Erdankerpunkte in der Lage, einen Teil der auftretenden Zugkräfte aufzunehmen. Die Hauptlast (Zugkraft) wird jedoch durch Lastgurte getragen, die an passenden Ankerbäumen befestigt werden.

Um ein sauberes Auf- und Abspulen des Stahlseils zu gewährleisten, verfügt der Rahmen über eine Seileinlaufrolle, die das Seil führt und dadurch eine automatische Seilspulung erlaubt. Für den Transport der gesamten Verzögerungsanlage mit einem PKW-Anhänger wurde der Grundrahmen zusammenschiebbar konstruiert. Die Anlage kann so auf ein Transportmaß von 250 cm * 150 cm reduziert werden. In ausgezogenem Zustand wird der vordere Teil des Rahmens durch eine Verschraubung arretiert.

3.7.3 Seiltrommel

Die aufgebaute Seilwindentrommel wurde nach den speziellen Anforderungen des Versuchs bei der Firma A. Ritter und Söhne GmbH gefertigt. Für den Versuch war eine hohe Seilkapazität ausschlaggebend, da ein Seilauzug auch nach dem Flaschenzugprinzip über eine Distanz von 75 m (150 m abgespultes Seil) möglich sein sollte. Des Weiteren muss die Seiltrommel den hohen Zugkräften schwerer (oftmals beladener) Forstmaschinen gewachsen sein. Die Belastungen für Lager und Flansche sind sowohl bezüglich der Zugkraft (max. 150 kN) als auch des Drehmoments (bis zu 30.000 Nm) enorm. Um die Drehmomente gering zu halten und nicht zu viele Seillagen übereinander zu spulen, wurde eine Seiltrommel verwendet, die breiter ist als im Forstbereich üblich. Die realisierbare Breite ist jedoch beschränkt durch die Anforderungen des Transports und der automatischen Seilaufspulung. Letztere basiert auf einem ausreichenden Abstand zwischen Seileinlaufrolle und Seiltrommel und ermöglicht ein sauberes Aufspulen des Seils auf die Trommel ohne spezielle Seilführung. Die Trommelinnenbreite beträgt 450 mm, während der Kerndurchmesser zur Begrenzung der Drehmomente mit 188 mm wiederum gering gehalten wurde. Damit die erforderliche Seillänge (150 m) von der Seiltrommel aufgenommen werden kann, hat die Bordscheibe einen Durchmesser von ebenfalls 450 mm. Unter Zuhilfenahme des Korrekturfaktors K lässt sich die maximal zulässige Seilkapazität (c) für ein Stahlseil mit einem Durchmesser von 14 mm nach den folgenden Formeln (ISO, 2006) berechnen:

$$K = \frac{\pi}{1,04 * d_{Seil}} \quad [10]$$

$$c = \left(D_T + \frac{D_B - D_T}{2} - 1,5 * d_{Seil} \right) * \left(\frac{D_B - D_T}{2} - 1,5 * d_{Seil} \right) * T_B * K * 10^{-3} \quad [11]$$

$$c = 171,5 \text{ m}$$

mit:	Seiltrommeldurchmesser	D_T	= 188 mm
	Seiltrommelbreite	T_B	= 450 mm
	Bordscheibendurchmesser	D_B	= 450 mm
	Seildurchmesser	d_{Seil}	= 14 mm

Bei dem aufgelegten Stahlseil handelt es sich um ein hochverdichtetes Seil mit einem Durchmesser von 14 mm. Durch die Verdichtung der stärkeren Außendrähte weist das Stahlseil eine besonders glatte Oberfläche auf und ist damit verschleißfester als herkömmlich geschlagene Seile. Zudem verringert sich der Durchmesser bei höheren Bruchlasten, dadurch werden bei gleichem Durchmesser im Vergleich zu herkömmlichen Stahlseilen ca. 50 % höhere Mindestbruchlasten erreicht. Für das verwendete Seil bedeutet dies eine Mindestbruchlast von 187,48 kN. Entscheidend für die Auswahl des verdichteten Stahlseils ist das geringere Volumen des Seils und damit die Möglichkeit, bei gleicher Belastbarkeit ein längeres Seil auf die Trommel legen zu können.

3.7.4 Aufspulmotor und Bremse

Die Seiltrommel ist an beiden Trommelenden mit Anschlussmöglichkeiten versehen, die zum einen für einen Elektromotor zum Aufspulen des Seils und zum anderen für die Montage einer Bremsanlage, die den erforderlichen Seilauszugswiderstand generiert, verwendet werden.

Bei der verwendeten Bremsanlage SN7 von der Knorr Bremse AG handelt es sich um die stärkste Ausführung für Nutzfahrzeuge. Die Bremse setzt sich aus der an die Seiltrommel angeflanschten Bremsscheibe sowie aus dem Bremsenträger, der Zuspansseinheit und dem Membranbremszylinder zusammen. Die Bremsscheibe hat einen Durchmesser von 430 mm und verfügt im Neuzustand über eine Stärke (Dicke) von 45 mm. Über einen Flansch mit zehn Schrauben wird die Verbindung zur Seiltrommel hergestellt. Für die Verzögerung sorgt der Bremsattel, bestehend aus Bremsenträger, Zuspansseinheit, Membranbremszylinder und Bremsbelägen. Der Bremsattel ist über eine separate Halterung mit dem Grundrahmen verbunden.

Wird der Membranbremszylinder durch die Steuerung mit Druckluft beaufschlagt, wird die Kraft auf die Zuspansseinheit weitergeleitet und werden die Bremsbeläge an die Bremsscheibe gepresst. Durch die entstehende Reibung können Bremsmomente von bis zu 30.000 Nm erzeugt werden. Bei einem Kraftangriffspunkt im Abstand von 20 cm zum Kern der Seiltrommel entspricht dies einer Abbremsung mit 300 kN Zugkraft am umgelenkten Fahrzeug, d.h. 150 kN, die auf die Verzögerungstechnik wirken.

Das Aufspulen des Stahlseils erfolgt mit Hilfe eines elektrischen Stirnradtriebemotors. Dieser verfügt über eine Leistung von 0,25 kW und dreht die Seiltrommel mit 26 upm. Das maximale Drehmoment des Elektromotors beträgt 91 Nm. Unter der Annahme, dass keine Reibungsverluste in den Lagern der Seiltrommel auftreten, sind zum Aufspulen des Stahlseils Zugkräfte von ca. 450 N verfügbar. Diese geringe Kraft reicht, um das Seil in der erforderlichen Qualität auf die Seiltrommel zu „legen“. Die Qualität des Aufspulens ist dabei wichtig für einen schonenden Umgang mit dem Stahlseil. Wird dieses zu locker gewickelt, kommt es zu Seilquetschungen, und deshalb besteht bei höheren Zugkräften die Gefahr eines Seilrisses. Um für jeden Versuch gleichbleibend gute Bedingungen zu bieten, wird das Seil während des Aufspulens von Hand geführt.

3.7.5 Steuerung

Zur Gewährleistung standardisierter und untereinander vergleichbarer Abbremsungen wird die Verzögerungstechnik durch eine elektrische Steuerung geregelt. Diese besteht zum einen aus der eigentlichen Steuerung, die über ein Panel eingestellt werden kann, und zum anderen aus einem elektrisch geregelten, pneumatischen Proportional-Druckregelventil des Typs MPPE-3-1/8-10-010-B der Festo AG & Co. KG an der Bremsanlage. Es handelt sich dabei um ein elektrisch gesteuertes Kolbenregelventil mit einem Druckbereich von 0 bis 10 bar. Die Betriebsspannung des Ventils beträgt 19 V bis 30 V, während die Steuerung über eine Referenzspannung von 10 V erfolgt. Als Betriebsmedium sind neutrale Gase sowie gefilterte Druckluft geeignet. Letztere wird während der Versuche durch eine Pressluftflasche mit einem Fülldruck von 200 bar geliefert. Um einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten, wird der Druck aus der Pressluftflasche durch ein Druckbegrenzungsventil auf ca. 5 bar reduziert und zusätzlich durch eine Filtereinheit vor dem Proportionalventil gereinigt.

Kern der Steuerung ist ein Versuchszyklus, der nach dem Start durchlaufen wird. Dieser sieht vor, den pneumatischen Druck auf die Bremszange der Verzögerungstechnik bei Null beginnend kontinuierlich auf einen vorher eingestellten Maximalwert zu steigern. Der Maximalwert wird dabei abhängig von den erwarteten Spitzenzugkräften der Versuchsmaschine variiert. Unabhängig vom gewählten Maximalwert, wird immer mit der gleichen Steigerungsrate gearbeitet, sodass die Messungen trotz verschiedener Zielwerte der Steuerung vergleichbar bleiben.

Sobald die Steuerung mit Strom und Druckluft versorgt wird, stellt sich am Druckausgang der Steuerung und somit an der Bremszange der vorher programmierte Offset-Wert ein. Dieser beträgt 0,5 bar und stellt sicher, dass die Seiltrommel nach dem Lösen der Bremse nicht nachläuft. Wird der Prüfzyklus gestartet, beginnt die Steuerung, den Druck auf die Bremsanlage entsprechend der programmierten Steigerungsrate zu erhöhen. Dabei wird der Druck jede Sekunde um den eingestellten Wert (0,15 bar) erhöht, bis der Wert der Stufe 1 erreicht wird. Dieser wiederum beschreibt den Maximaldruck (4 bar) für die Bremsanlage und wird abhängig von der erwarteten Zugkraft der Maschine eingestellt. Die Ausstattung mit Traktionshilfsmitteln oder die Beladung der Versuchsmaschine bedingen höhere Level 1-Werte, da hier mit entsprechenden Zugkräften zu rechnen ist. In Abhängigkeit von der eingestellten Impulsdauer (T_H ; Anstiegszeit) wird der Maximalwert gehalten oder mit dem Druckabbau begonnen. Dieser wiederum erfolgt mit der gleichen Abstiegsrate wie der vormalige Druckanstieg. Je nach programmierter Impulspausendauer (T_L),

die den Zeitraum beschreibt, in dem der Offset-Wert angestrebt wird, kann der Offset-Wert am Druckausgang über einen beliebigen Zeitraum nach dem Druckabbau gehalten werden. Dies wird während der Fahrversuche genutzt, um die Versuchsmaschine ohne Zuglast auf eine Geschwindigkeit von ca. 1 m/s zu beschleunigen. Hat der Forwarder die Geschwindigkeit nach einigen Sekunden erreicht, beginnt der Prüfzyklus von vorne. Die Einstellung der Parameter für den Maximaldruck sowie den Druckanstieg erfolgt in 1/100 bar Schritten.

Im Rahmen eines Vorversuchs mit der kompletten Verzögerungstechnik (bestehend aus elektropneumatischer Steuerung und mechanischer Umsetzung) wurden die verwendeten Parameter bestimmt. Ziel bei der Parameterermittlung war ein ausreichend langer Abbremsvorgang bei möglichst geringem Fahrweg. Dabei zeigten sich die Auswahl der Steigerungsrate, also des Druckanstiegs pro Zeiteinheit, und der Zeitraum zwischen den Abbremsungen als entscheidend für die Optimierung.

4 Datenanalyse

4.1 Datenvorbereitung

Während der Versuche werden die Signale der angeschlossenen Sensoren durch das Messsystem aufgezeichnet und auf einer PCMCIA Speicherkarte im MGC-Dateiformat (*.mea) abgelegt. Die weitere Verarbeitung der Daten erfolgt nach Übertragung auf einen Computer mit der catman® Software Version 4.5 von HBM. Durch Aufrufen der mea-Dateien mit catman® werden die Daten automatisch in die Datenbasis des Programms geladen. Hier erfolgt eine Transformierung in das programmeneigene Binärformat (*.bin) und die Weiterverarbeitung zu ASCII-Dateien, die von der Statistiksoftware SPSS 16.0 eingelesen werden können.

Parameter	Value	Parameter	Value
Datei	.JAEG005	Beladung	0
Auswahl	0	Steigung	2
Bestand	20001	Guerneigung	0
Gasse	0	Feuchte	35,2
Baumart	2	Bodenart	2
Konfig	0	Skelettanteil	0
Reifen	0	Humusvork	2
Druck	2,7	Humusform	2
Ketten	0	SF_spez	124
Baender	0	SF_allg	89
Befahrung	4	Probenr	450

Abbildung 16: Eingabemaske des am ifa geschriebenen Programms CAT2ASC

Ein eigens hierfür am ifa geschriebenes Programm ordnet den Datensätzen die Varianten des Versuchs zu. Die Eingabemaske des Programms CAT2ASC ist in Abbildung 16 dargestellt. Durch das Aufrufen einer der bereits in catman® bearbeiteten asc-Dateien wird der Dateiname automatisch in die erste Spalte übernommen, sodass die Zuordnung zu den Ausgangsdaten möglich ist. Die übrigen Felder dienen der Codierung für eine getrennte Auswertung nach einzelnen Faktoren. Die Bedeutung der verwendeten Codierungszahlen sowie deren Bedeutung (Häufigkeit) für die Datengrundlage ist dem Anhang (Tabelle V, 1 - 19) zu entnehmen. Aus den eingegebenen Informationen erzeugt das Programm im nächsten Schritt eine neue Datei im asc-Format, bei der die zahlenmäßig codierten Informationen in Spalten den Datensätzen vorangestellt werden. Dadurch wird für jeden Datensatz eine Zuordnung zu beispielsweise der Bodenart, dem Bodenwassergehalt, dem Reifeninnendruck oder der Baumart möglich. Für spätere Auswertungsschritte kann so

das Gesamtdatenkollektiv auf einen Teilbereich reduziert werden, ohne jeweils einen neuen Datensatz zu erzeugen.

Für die Datenauswertung mit der Statistiksoftware SPSS 16.0 und für weitere Bearbeitungsschritte werden die insgesamt 625 Daten vom asc-Format zusammengefügt und in einem weiteren Schritt in das SPSS eigene Format sav übertragen. Damit geht eine Beschreibung der Variableigenschaften in SPSS einher. Die weitere Datenbearbeitung kann so mit SPSS Syntax Routinen erfolgen. Die entstandene Gesamtdatendatei ermöglicht die Auswertung nach den unterschiedlichen Konfigurationen der Maschine, aber auch nach den einbezogenen Bodenparametern.

4.2 Datenaufbereitung

4.2.1 Einführung

Das Messsystem erhebt die Daten nach den Einstellungen, die im Vorfeld der Messungen gemacht wurden. Je nach Versuchskonfiguration ändern sich jedoch einzelne Faktoren, deren Änderungen nicht auf das Messsystem übertragen wurden. Ursache hierfür ist die Fehleranfälligkeit für Veränderungen der Messparameter, die insbesondere bei den variierenden Radumfänge wirksam wird. Bereits zu Beginn der Versuche zeigte sich, dass die Veränderung des Radumfangs oftmals zu spät bedacht wurde und im nachhinein eine Umrechnung der Daten erfolgte. Bereits nach wenigen Versuchen wurde daher mit immer den gleichen Einstellungen gearbeitet, sodass diese im Anschluss an die Versuche angepasst werden müssen.

Neben der Anpassung der Radumfänge für jede Konfiguration des Forwarders werden so gleitende Mittelwerte aus den Messwerte berechnet sowie die gemessenen Zugkräfte um den Einfluss der Hangabtriebskräfte (siehe Kap. 2.4) bereinigt. In einem weiteren Schritt erfolgt die Berechnung weiterer Variablen, die für die Auswertung und die Datenbehandlung von besonderer Bedeutung sind. Hierzu zählen die konfigurationsbedingte Eigenmasse und Gesamtmasse der Versuchsmaschine, der Antriebsschlupf und der Traktionsbeiwert, der sich aus der korrigierten Zugkraft und der Gesamtmasse berechnet.

4.2.2 Gleitende Mittelwerte

Das Messsystem erfasst pro Sekunde zehn Messwerte aus den einzelnen Sensoren, wodurch vielfach kurzzeitige Spitzen- oder Tiefstwerte entstehen, die das Verhalten der Versuchsmaschine nicht korrekt beschreiben. Hier zeigen sich die Grenzen der hochauflösenden Messung unter forstlichen Bedingungen. Dem wird entgegengewirkt durch die Bildung eines gleitenden Mittelwertes für alle Signale. Die Berechnung gleitender Mittelwerte hat sich bereits in mehreren Projekten mit der verwendeten Messtechnik bewährt (vgl. u.a. HITTENBECK, 2004; JACKE ET AL., 2005; BLOCK, 2008) und bewirkt eine verbesserte Plausibilität der Messwerte.

Für die gemessene Radgeschwindigkeit wird aus vier Werten gemittelt, sodass die zwei Messwerte vor sowie nach dem aktuellen Datensatz in die Mittelwertbildung einbezogen werden. Die gleitenden Mittelwerte der Zugkraftmessungen sowie der Vergleichsgeschwindigkeit der Spill-Konstruktion stützen sich auf die umliegenden zehn Messwerte. Ausschlaggebend hierfür ist die größere Streuung der Werte, die sich aus einem leichten Schlagen des Stahlseils bzw. der Bremse der Spill-Konstruktion ergibt. Die berechneten gleitenden Mittelwerte werden jeweils als neue Variable dem Datensatz angehängt, sodass die Rohdaten weiterhin unverändert zur Verfügung stehen.

4.2.3 Korrigierte Radumfangsgeschwindigkeiten

Die im Messsystem hinterlegten Radumfänge stimmen nicht mit den tatsächlichen Radumfängen überein. Dies ergibt sich zum einen aus den unterschiedlichen Konfigurationen der Maschine und zum anderen aus der grundsätzlich problematischen Bestimmung des dynamischen Halbmessers. Letzterer verändert sich durch die Montage von Ketten, den Reifeninnendruck oder auch den Untergrund.

Für die Bestimmung des Schlupfes ist jedoch eine genaue Ermittlung sowohl der (theoretischen) Radumfangsgeschwindigkeit als auch der (tatsächlichen) Geschwindigkeit über Grund erforderlich. Im Laufe der Versuche zeichnete sich ab, dass die gemessenen Geschwindigkeiten bei „freier“ Fahrt des Forwarders, also ohne Abbremsung durch die Verzögerungstechnik, leicht differieren. Um diesen Eindruck unterschiedlicher Geschwindigkeiten genauer zu untersuchen, wurden unter anderem Vergleichsfahrten mit einigen Konfigurationen durchgeführt. Während dieser Fahrten legte der Rückezug eine leicht abschüssige Strecke mit konstanter Geschwindigkeit zurück. Das Gefälle von ca. 5 % ermöglicht ein annähernd schlupffreies Fahren der Maschine. Wurde der Umfang der Räder richtig bestimmt, so müssten die Geschwindigkeiten der Spill-Konstruktion und der Räder identisch sein. Ein Vergleich der Geschwindigkeiten über der Zeit zeigte jedoch, dass kleinere Abweichungen zwischen den Messwerten bestehen. Anhand der mittleren Geschwindigkeiten wurde deutlich, dass die theoretische Geschwindigkeit am Rad von der tatsächlichen Geschwindigkeit abweicht. Dadurch ergeben sich fehlerhafte Schlupfwerte, die somit auch den Verlauf der Zugkraft-Schlupf-Kurven verändern.

Die endgültige Bestimmung der Radumfänge für die Konfigurationen des Forwarders erfolgt jedoch anhand der Versuchsdaten. Für eine allradgetriebene Maschine ist nach Erfahrungen aus der land- und forstwirtschaftlichen Mobilitätsforschung (STEINKAMPF, 1975; HITTENBECK, 2004; SCHREIBER UND KUTZBACH, 2007) unter trockenen und festen Untergrundbedingungen ein Verlauf der Traktions-Schlupf-Kurven durch den Ursprung zu erwarten. Die angetriebenen Räder überwinden die vergleichsweise geringen Fahrwiderstände und können so bereits bei geringem Schlupf zu positiven Zugkräften führen. Um diesen Zustand für die Messdaten zu erreichen, wird für jede Konfiguration unter entsprechend guten Traktionsbedingungen, die sich aus einer geringen Bodenfeuchte und möglichst hohem Skelettanteil ergeben, ein geeigneter Radumfang bestimmt. Die Eignung richtet sich dabei zum einen nach dem Verlauf des kubischen Ausgleichs nahe dem Ursprung und zum anderen nach der gutachterlichen Einschätzung der Punktwolke. Im nächsten Schritt werden die bestimmten Radumfänge auf die übrigen Messdaten einer Konfiguration über-

tragen und der Verlauf der Punktwolken verglichen. Hieraus ergibt sich teilweise ein weiterer Anpassungsbedarf, der jedoch nur noch zu geringfügigen Veränderungen führt.

Für jede Konfiguration der Maschinenendabtriebskomponenten ergibt sich so ein Radumfang, der auf die Messdaten übertragen wird. Tabelle IV,1 (im Anhang) zeigt die resultierenden Radumfänge der einzelnen Versuchskonfigurationen.

4.2.4 Hangneigungskorrektur

Ein weiterer Korrekturbedarf ergibt sich aus den unterschiedlichen Neigungen der Versuchsflächen. Ziel sind Messungen unter ebenen Bedingungen, also ohne Steigungen oder Gefälle in der Messstrecke. Die natürlichen Gegebenheiten der Versuchsgassen ermöglichen dies jedoch nicht immer, sodass auch geringe Neigungen im Einzelfall bis zu 8 % als „eben“ toleriert werden. Um den Einfluss der jeweiligen Versuchsbedingungen gering zu halten, werden die Zugkräfte daher um die Hangabtriebseffekte bereinigt. Bei Fahrten im Gefälle kommt es so zu einem Abzug von den gemessenen Zugkräften, während bei einer Steigung ein Zuschlag erfolgt.

Die Berechnung der Hangabtriebskraft (F_T) folgt der allgemeinen in Kapitel 2.4 beschriebenen Gleichung 6. Dabei ergibt sich die Gewichtskraft (F_G) des Forwarders aus der konfigurationsbedingten Eigenmasse zwischen 11.750 kg (ohne Traktionshilfsmittel) und 13.280 kg (mit Ketten und Bändern) sowie der jeweiligen Zuladung. Die Umrechnung von der Gesamtmasse in die Gewichtskraft in kN erfolgt durch die Multiplikation mit der mittleren Erdbeschleunigung ($g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$) und die anschließende Reduktion von N in kN durch Division mit 10^3 .

Die Neigung der Versuchsflächen wird in der für praktische Anwendungen üblichen Angabe in Neigungsprozent bestimmt. Die Gleichung [6] benötigt jedoch eine Angabe des Neigungswinkels. Hier ist somit ein weiterer Umrechnungsschritt erforderlich. Mit Hilfe des Arkustangens kann die Prozentangabe in eine Winkelangabe transferiert werden, sodass sich die allgemeine Gleichung [6] zu der folgenden speziellen Formel verändert:

$$F_{\text{Hang}} = ((G_{\text{Eigenmasse}} + G_{\text{Zuladung}}) * 9,81 / 10^3) * \sin(\arctan(\text{Steigung})) \quad [12]$$

Die Eigenmasse des Forwarders sowie das Gewicht der Zuladung sind dabei ebenso bekannt wie die Steigung der einzelnen Flächen, sodass die Berechnung der Hangabtriebskraft (F_{Hang}) automatisiert für die verschiedenen Varianten erfolgen kann. Im Anschluss an die Berechnung der Hangabtriebskräfte wird eine neue Variable (*zug_cor*) mit den um die Neigungseinflüsse bereinigten Zugkräften berechnet.

4.2.5 Berechnung zusätzlicher Variablen

4.2.5.1 Schlupf

Im Anschluss an die Korrektur der Radumfangsgeschwindigkeit sowie die Berechnung der gleitenden Mittelwerte wird der Schlupf anhand der in Kapitel 2.2 beschriebenen allgemeinen Schlupfformel (Gleichung 5) basierend auf den Geschwindigkeiten (verändert nach RENIUS, 1987) berechnet:

$$\sigma = \frac{v_{theo} - v_{tats}}{v_{theo}} * 100 [\%] \quad [5]$$

Dabei ist v_{theo} die Umfangsgeschwindigkeit der Räder, während v_{tats} die Vergleichsgeschwindigkeit über Grund ist. Die Berechnung des Schlupfs erfolgt lediglich für den Bereich des Antriebschlupfs, bei dem die Vergleichsgeschwindigkeit geringer oder gleich der Radumfangsgeschwindigkeit ist, sodass sich Schlupfwerte zwischen 0 % und 100 % ergeben. Neben der prozentualen Angabe des Schlupfs ist dieser in den Daten auch als Verhältniszahl zwischen 0 und 1 (entspricht 100 % Schlupf) enthalten.

4.2.5.2 Gesamtmasse

Für die Berechnung des Traktionsbeiwertes ist für jede Konfiguration der Versuchsmaschine die Gesamtmasse entscheidend. Diese ergibt sich aus der Eigenmasse der Maschine von 11.750 kg, dem Gewicht der verwendeten Traktionshilfsmittel und der Beladung des Rungenkorbes. Für alle Varianten mit Beladung ist die Zuladung der Maschine mittels Radlastwaagen des Typs Haenni WL 103 erfasst worden. Durch Addition der Massen ergibt sich die Gesamtmasse der Versuchsmaschine, die den Datensätzen zugeordnet wird. So lässt sich zum einen der Traktionsbeiwert berechnen und zum anderen der Einfluss unterschiedlicher Beladungszustände auf das Zugkraftverhalten untersuchen. Die Zuordnung der Gesamtmassen erfolgt über eine SPSS Syntax, so dass Fehlern bei der manuellen Dateneingabe vorgebeugt werden kann.

4.2.5.3 Traktionsbeiwert

Die von einem Fahrzeug gegen den Boden abstützbaren Zugkräfte sind unmittelbar mit dem Gewicht auf den angetriebenen Rädern der Maschine verbunden. Wie bereits in Kapitel 2.5 beschrieben, sind für die Bestimmung der Grenzneigungen beim Maschineneinsatz weniger die absoluten Zugkräfte entscheidend als vielmehr die Zugkraft im Verhältnis zur Gesamtmasse. Bei der Bestimmung ausrüstungsspezifischer Grenzneigungen wird dies durch das Rechnen mit dem Traktionsbeiwert berücksichtigt.

Für jeden Datensatz wird der Traktionskoeffizient anhand der Gesamtmasse und der um den Hangabtrieb korrigierten Zugkraft berechnet. Bei einer Gewichtskraft eines Allradfahrzeugs von z.B. 100 kN (ca. 10.000 kg) und einer gemessenen Zugkraft von 35 kN errechnet sich ein Traktionsbeiwert von 0,35. Der Traktionsbeiwert nimmt so in Abhängigkeit der Maschinenkonfiguration Werte zwischen 0 und 0,88 an.

4.2.6 Variablenrecodierung

Einige Information zum Boden sowie die Ergebnisse der Trockendichtebestimmung lassen sich mit Hilfe des RECODE Befehls von SPSS in neue Variablen verschlüsseln und den Datensätzen anhängen. Dies ist insbesondere für die nachträglichen Bodenanalysen eine erhebliche Erleichterung, bietet aber auch die Chance bestehende Variable in neue Dummy-Variablen zu übertragen bzw. die Datensätze in unterschiedliche Ausprägungsstufen eines Merkmals zu unterteilen.

Während der Versuche wurde für die meisten Bestände eine Bodenprobe entnommen, die einer nachträglichen Analyse im Labor der heutigen Abteilung Ökopedologie der gemäßigten Zonen der Georg-August-Universität Göttingen unterzogen wurde. Die entnommenen Bodenproben haben eine Nummer auf dem Prüfring eingeschlagen, die für die jeweiligen Versuchsserien im Datensatz durch die Variable *Probenr* enthalten ist. Anhand der Nummer lassen sich die Ergebnisse der Korngrößenanalyse den Datensätzen zuordnen. Für jede Versuchsgasse werden so die Information über den Tongehalt (Variable: *Ton*), den Schluffgehalt (*Schluff*) sowie den Sandanteil (*Sand*) der Probe in Prozent eingefügt.

Ebenfalls für einen Großteil der Versuchsfelder bestehen Daten über die Lagerungsdichte des Oberbodens in den drei Bereichen: Fahrspur, Mitte zwischen den Fahrspuren und unbefahrener Bestand. Die Lagerungsdichten der einzelnen Kompartimente werden über den Bestandeschlüssel (Variable: *Bestand*) in die Ausgangsdaten übertragen. Für jede Versuchsgasse, auf der die notwendigen Proben ausgewertet werden konnten, erfolgt so die Zuordnung der neuen Variablen *ld_spur*, *ld_mitte* und *ld_bestand*.

Für die Analyse wichtiger Einflussfaktoren hat sich die Verwendung von sogenannten Dummy-Variablen als sehr hilfreich erwiesen. Diese Variablen enthalten typischerweise zwei Ausprägungen, die sich durch die Ziffernzuordnung „0“ oder „1“ unterscheiden. Für die Berechnung linearer Regressionsmodelle kann so der Einfluss der Ausprägungsmerkmale abgeschätzt werden. Im Datensatz sind bereits einige dieser Variablen (z.B. *Ketten*, *Reifen*, *Baender*) enthalten. Diese markieren beispielsweise durch die Ziffer „0“, dass die Versuche ohne *Ketten* oder *Baender* absolviert wurden. Zusätzlich zu den bestehenden Dummy-Variablen wird der Datensatz um eine Variable zur Codierung des reduzierten Reifeninnendrucks (*druck_dummy*) sowie zur Trennung zwischen Laub- und Nadelholzbeständen (*baumart_dummy*) erweitert. Die Variablen nehmen den Wert „0“ für den Standardreifeninnendruck von 2,7 bar und die Bestockung mit Nadelhölzern ein. Umgekehrt enthalten die neuen Variablen den Eintrag „1“ für den reduzierten Fülldruck und die vorwiegende Laubholzbestockung.

Eine weitere Recodierung erfolgt für den während der Standortansprache bestimmten Skelettanteil der oberen 20 cm des Bodens. Die vorgefundenen Skelettgehalte reichen von skelettfreien

Böden bis zu Oberböden mit über 20 % Skelettanteil. Über 60 % der Versuchsgassen haben dabei keine Beimischung von kleineren Steinen im Oberboden, während die verbleibenden Flächen Skelettgehalte von knapp über 0 % bis zum Maximalwert aufweisen. Für die Bestimmung der Grenzneigungsprognose hat sich die Einteilung in Stufen unterschiedlichen Skelettgehalts bewährt. Daher entsteht eine neuen Variable (*Skelettstufe*), welche die Versuchsfläche in drei verschiedene Skelettgehaltsstufen einteilt. Für die skelettfreien Böden erhält die Variable den Eintrag „0“, während Skelettanteile bis 7 % zur Einordnung in die Klasse „1“ führen. Für höhere Skelettgehalte des Oberbodens erfolgt die Zuordnung der Ziffer „2“.

4.3 Artefaktbereinigung

4.3.1 Hintergrund

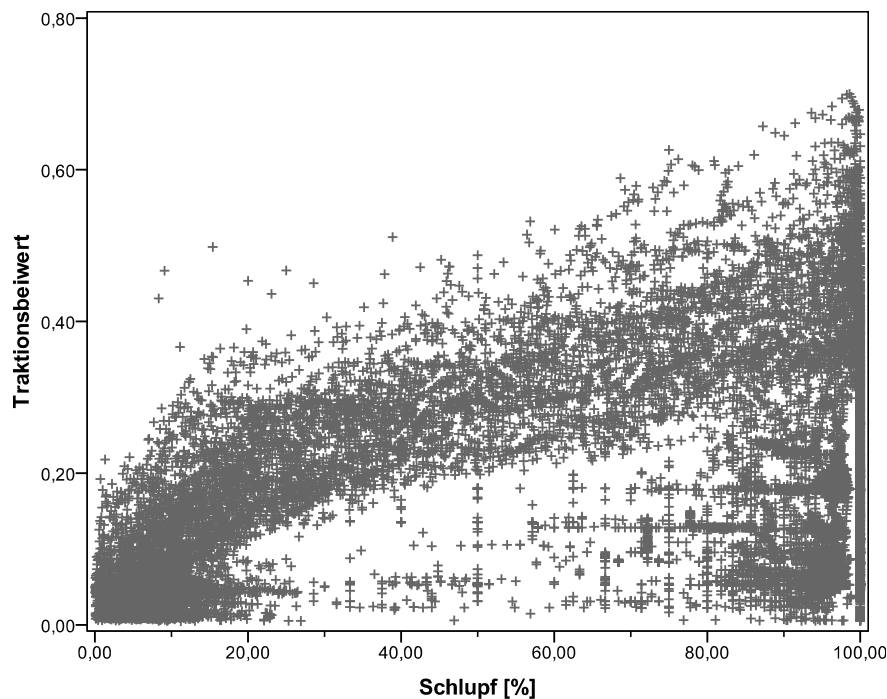


Abbildung 17: Exemplarische Traktionsbeiwerte über dem Schlupf vor der Artefaktbereinigung

Während der Zugkraft- und Schlupfmessungen unter ebenen Bedingungen zeichnet das Messsystem die Signale der einzelnen Sensoren mit einer Frequenz von 10 Hz auf. Da auch zwischen den einzelnen Abbremsungen Messwerte gespeichert werden, kommt es zu einer Vielzahl von Datensätzen, die nicht während der eigentlichen Zugkraftmessung erhoben wurden. Diese haben keinen erklärenden Charakter für die Beziehung zwischen dem Traktionsbeiwert und dem Schlupf der Räder. Abbildung 17 zeigt eine exemplarische Auswahl von Zugkraft und Schlupfwerten vor der Artefaktbereinigung. Insbesondere im Bereich hohen Schlupfs und geringer Traktionsbeiwerte

zeigt sich eine Vielzahl von Datenpunkten, die während des Stillstands der Maschine aufgezeichnet wurden. Die berechneten Traktionsbeiwerte entstehen aus den Haltekräften der Verzögerungstechnik, die für ein gespanntes Stahlseil und damit entsprechende Zugkräfte auf der Kraftmessdose verantwortlich sind. Durch die Übertragung von Fahrzeugvibration auf die hoch empfindlichen Messsensoren zur Geschwindigkeitsmessung entstehen zudem Messwerte, die zur Berechnung von Schlupfwerten (während des Fahrzeugstillstands) führen. Um die Auswertung auf die tatsächlichen Abbremsungen zu reduzieren, erfolgt eine Auswahl der Daten, die im Weiteren vorgestellt wird.

4.3.2 Mindestradgeschwindigkeit

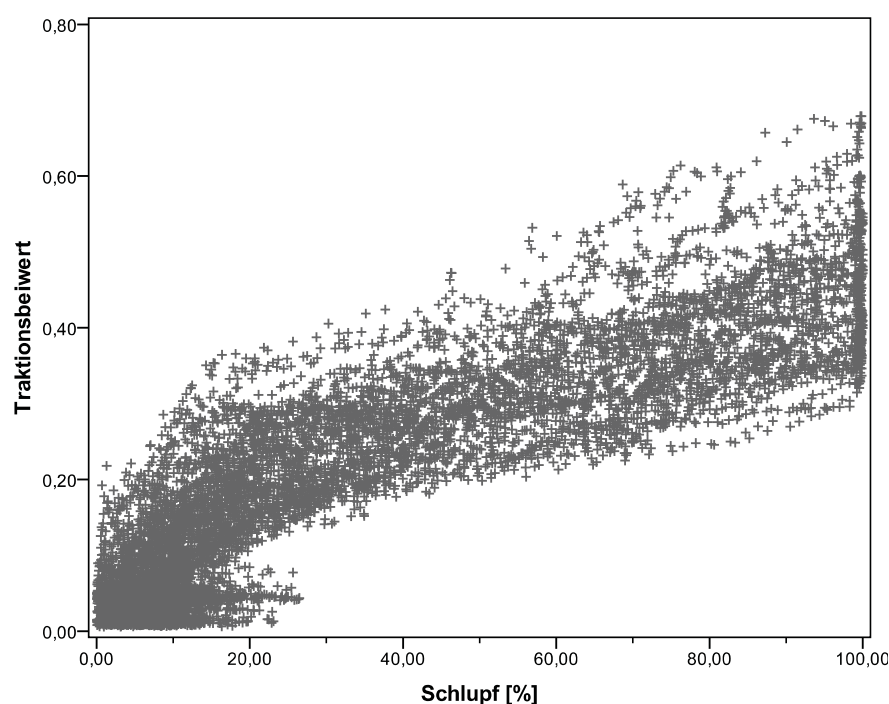


Abbildung 18: Exemplarische Traktionsbeiwerte über dem Schlupf nach der Beschränkung auf eine Mindestradumfangsgeschwindigkeit von 0,2 m/s

Das Messsystem erfasst während der Versuchsfahrten die Radumfangsgeschwindigkeit am linken Bogie der Vorderachse. Der dabei verwendete inkrementale Drehgeber erkennt dabei selbst kleinste Bewegungen des Rades, die bereits durch die vom Motor auf das Fahrwerk übertragenen Vibrationen entstehen können. Um die so „gewonnenen“ Messwerte nicht für die Datenanalyse zu nutzen, beschränkt sich die Auswertung auf Datensätze, bei denen die Radumfangsgeschwindigkeit mindestens 0,2 m/s beträgt. Durch diese Auswahl werden Datensätze ausgeschlossen, die im Stand oder bei extrem niedrigen Geschwindigkeit entstehen. So entspricht die Strecke, die bei einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s innerhalb einer Zeitstunde zurückgelegt wird, 720 m. Derart geringe Geschwindigkeiten kommen selbst bei einer Forstmaschine äußerst selten vor, sodass die ausschließliche Betrachtung höherer Geschwindigkeiten keine Verzerrung bedeu-

tet. Für die weitere Datenauswertung stellt diese Datenauswahl jedoch eine erhebliche Erleichterung dar. Abbildung 18 zeigt die Punktwolke aus Traktionsbeiwerten und Schlupf mit der Restriktion einer Mindestradumfangsgeschwindigkeit von 0,2 m/s. Es wird deutlich, dass durch die Beschränkung auf die tatsächliche Fahrt des Forwarders ein großer Teil der unrelevanten Datensätze eliminiert wird.

4.3.3 Mindestfadengeschwindigkeit

Eine weitere Anforderung an die Datensätze ergibt sich für die Vergleichsgeschwindigkeit über Grund, die mit der in Kap. 3.6.4 beschriebenen Spill-Konstruktion ermittelt wird. Während der Datenaufzeichnung kommt es vereinzelt vor, dass das Messsystem negative Vergleichsgeschwindigkeiten erfasst. Dies kann wiederum durch Fahrzeugvibrationen im Stand geschehen, die das leicht gespannte Messrad „schaukeln“ lassen und so beim Stillstand Messwerte erzeugen. Diese sind zum einen unplausibel und führen zum anderen zu Schlupfwerten über 100 %. Um beides auszuschließen, werden lediglich Datensätze zur Auswertung berücksichtigt, für die Fadengeschwindigkeiten von 0 m/s oder darüber registriert wurden. Die zusätzliche Reduktion der Datensätze durch dieses Vorgehen ist jedoch sehr gering.

4.3.4 Fehlerhafte Datensätze

Während der Datenaufnahme auftretende Besonderheiten einzelner Versuchsdateien werden in der Variable *Auswahl* codiert. Hierzu zählen neben der Identifikation von weniger wichtigen Bestandesinformationen (siehe Tab. V, 11 im Anhang) auch die Ausweisung fehlerhafter Versuchsdateien. Insgesamt sechs der Codierungen führen zum Ausschluss der Versuchsdateien von der weiteren Auswertung. Hierzu zählen Fehler durch den Faden der Spill-Konstruktion, die zum einen durch das Verfangen an Randbäumen auftreten und zum anderen durch die Verwendung sich dehnender Angelsehne bei zwei Versuchsserien. Beide Fehler haben nicht korrekte Messwerte zur Folge, die nicht korrigiert werden können. Ebenfalls ausgeschlossen werden unvollständige Datensätze und solche mit Messwertfehlern oder auch Versuche, die ohne aktivierte Differentialsperre absolviert wurden.

4.3.5 Besonderheiten der Traktionsmessungen

4.3.5.1 Hintergrund

Im Gegensatz zu den Vergleichsfahrten auf stärker geneigten Flächen gelten einige zusätzliche Einschränkungen für die Traktionsmessungen mit der Verzögerungstechnik. Die Unterscheidung der zwei Versuchsteile erfolgt über die Geländeneigung in Prozent. Steigungen unter 10 % weisen dabei auf Zugkraftmessungen hin, während Geländeneigungen über diesem Wert die Vergleichsfahrten in Hanglagen identifizieren.

Für die Auswertung der Messdaten unter ebenen Bedingungen ergeben sich weitere erforderliche Einschränkungen bezüglich des Schlupfes, des Traktionsbeiwertes sowie anhand der resultierenden Punktwolken aus Schlupf und Traktionsbeiwert.

4.3.5.2 Maximalschlupf

Der Forwarder durchläuft während der Zugkraftmessungen unter ebenen Bedingungen das gesamte Schlupfspektrum von nahezu schlupffreier Fahrt bis zum Stillstand der Maschine bei drehenden Antriebsrädern (100 % Schlupf). Bei der Datensichtung fällt jedoch auf, dass die Messwerte für Zugkraft bzw. Traktionsbeiwerte bei Schlupfwerten über 98% sehr stark variieren. Dies hat unterschiedliche Ursachen. So wird nach der Abbremsung bis zum Fahrzeugstillstand u.a. der Kraftfluss auf die Räder reduziert. Dadurch kann es zu einer kurzzeitigen Verringerung der gemessenen Zugkräfte kommen. Zudem greifen die Stollen der Bereifung sowie der Traktionshilfsmittel in regelmäßigen Abständen erneut in den Oberboden ein, wo es für kurze Zeit zu höheren abstützbaren Kräften kommt, bis der Boden absichert und in der Scherfläche bei reduzierter Reibung gleitet.

Für die weitere Auswertung ist der Bereich sehr hohen Schlupfes nur von untergeordneter Bedeutung, sodass die Betrachtung sich auf Schlupfwerte kleiner als 98% beschränkt. Die Auswirkungen dieser Dateneinschränkung zeigen sich in Abbildung 19.

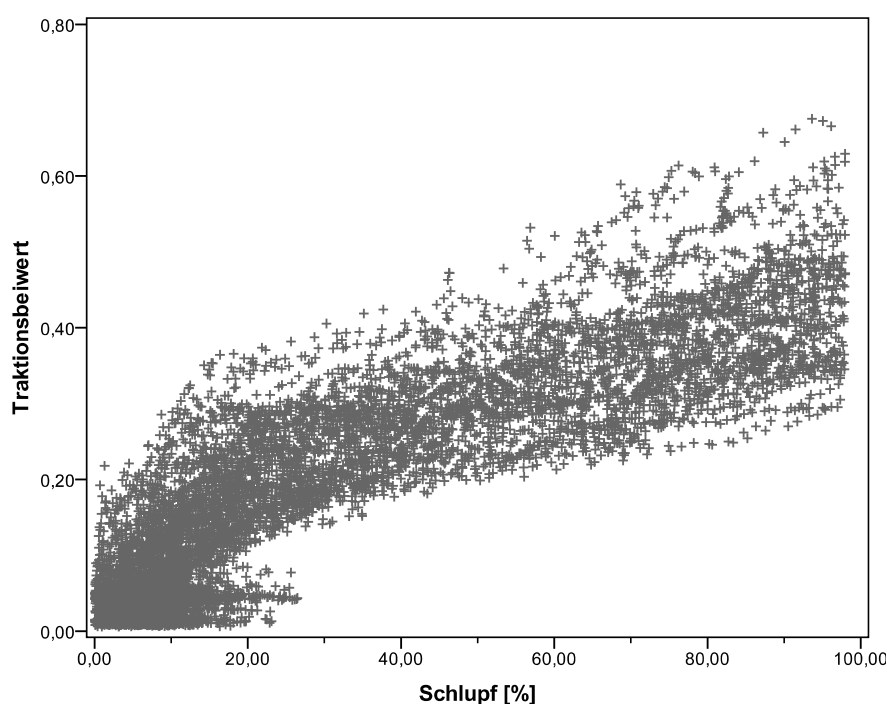


Abbildung 19: Exemplarische Traktionsbeiwerte über dem Schlupf nach der Beschränkung auf einen Maximalschlupf von 98 %

4.3.5.3 Kontrollvariable für ansteigenden Schlupf

Erfahrungen mit der verwendeten Messtechnik von HITTENBECK (2004), JACKE ET AL. (2004) und BLOCK (2008) zeigen, dass bei Fahrversuchen, die den Antriebsschlupf im Fokus haben, eine weitere Auswahl der Daten hilfreich ist. Die im Jahre 2003 durchgeführten Versuche mit einem angehängten Bremsschlepper zur Zugkraftenerhöhung machen deutlich, dass die Zugkraft über dem Antriebsschlupf nach dem Lösen der Betriebsbremse schneller abnimmt als während des Anstieges. Dieses Verhalten führt HITTENBECK (2004) auf eine Vermengung von eigentlicher Zugkraft und Beschleunigung des Versuchsfahrzeugs zurück. Die erforderliche Zugkraft für das Beschleunigen der Maschine wird dabei nicht von der Zugkraftmessdose erfasst und führt so systematisch zu niedrigen Zugkraftmesswerten. Dem wurde begegnet durch die Berechnung einer sogenannten Lagvariable. Mit Hilfe dieser Variable wird es möglich, eine gezielte Auswahl auf Datensätzen bei ansteigendem Radschlupf zu treffen. Durch die SPSS-Funktion *lag* (*Variablenname*, *n*) kann auf den Variablenwert des n-ten Falls vor dem aktuellen Fall zugegriffen werden. Die gebildete Variable enthält so den Schlupfwert des vorherigen (zeitlich zurückliegenden) Datensatzes und ermöglicht einen Vergleich des aktuellen Werts mit dem vorherigen. Für den Fall, dass der vorherige Schlupfwert (Inhalt der Lagvariable) geringer ist als der Wert der betrachteten Datenzeile, wird einer zusätzlichen Prüfvariable der Wert 1 zugewiesen, andernfalls der Wert 0. Alle Datensätze, bei denen die Prüfvariable den Wert 1 einnimmt, repräsentieren somit den aufsteigenden Ast der Traktions-Schlupf-Beziehung. Ist die Prüfvariable 0, so ist der gemessene Schlupf geringer als jener des vorherigen Datensatzes. In die Datenauswertung der Traktionsmessungen und die Darstellung in Abbildung 20 werden so nur Datensätze einbezogen, die den ansteigenden Ast der Traktionskurven beschreiben. Die Reduktion wirkt sich vor allem bei geringen Schlupf- und Traktionsbeiwerten aus.

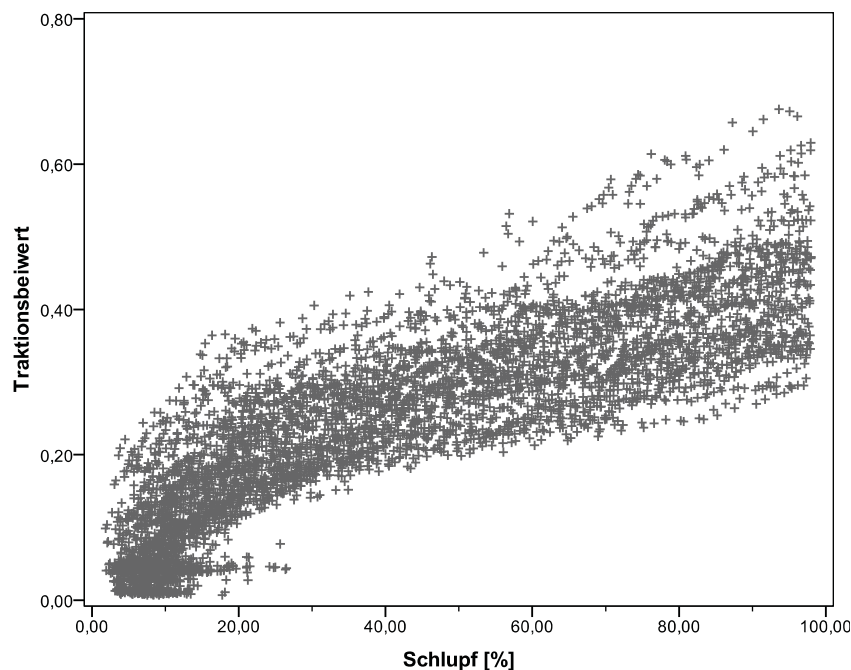


Abbildung 20: Exemplarische Traktionsbeiwerte über dem Schlupf nach der Beschränkung auf ansteigende Schlupfwerte

4.3.5.4 Traktionsbeiwerte

Im Laufe der Datenvorbereitung werden durch die Berechnung der Hangabtriebskräfte und deren Anwendung auf die Zugkraftmesswerte negative Zugkräfte und somit Traktionsbeiwerte erzeugt. Diese widersprechen jedoch den Vorstellungen von einem angetriebenen, nicht gezogenen Fahrzeug. Negative Traktionsbeiwerte deuten auf einen Zugkraftbedarf hin, der nicht durch den eigenen Antrieb gedeckt ist. Der Versuchsrückezug hat die Fortbewegung im Gelände jedoch während der Versuche immer über den Antrieb erzeugt. Für die weitere Betrachtung werden daher vereinzelte negative Traktionsbeiwerte ausgeschlossen.

4.3.5.5 Datenauswahl anhand der Punktwolken

Eine letzte Reduktion der Messdaten aus den Traktionsmessungen ergibt sich aus der gutachterlichen Einschränkung der Messwerte. Hierzu werden alle resultierenden Punktwolken aus Schlupf und Traktionsbeiwert auf weitere Artefakte überprüft. Dies sind in den meisten Fällen einzelne Messwertkombinationen, die bei vergleichsweise hohem Schlupf auffällig geringe Traktionsbeiwerte ausweisen. Ursache hierfür kann beispielsweise das Einklemmen des Stahlseiles auf der Bremswinde während der Versuche sein. Die Einschnürungen des Seils lösen sich dabei teilweise ruckartig, was zum Einbruch der gemessenen Kräfte bei hohem Schlupf führt. Als Auswahlkriterium für viele Versuche dienen dabei Schlupfwerte über 20 % kombiniert mit Traktionsbeiwerten unter 0,1. Durch diese Auswahl werden lediglich vereinzelte Werte eliminiert, die zudem nicht das eigentliche Traktionsverhalten des Forwarders wiedergeben. Darüber hinaus erfolgt ein Ausschluss der Traktionsmessungen für die Konfiguration 11. Diese beschreibt einen einzelnen Versuch mit beladener Maschine und montierten Traktionshilfsmitteln. Durch die Zuladung und den Einsatz der Gleitschutzketten sowie der Bogiebänder war der Antriebsstrang des Forwarders nicht in der Lage die erforderlichen Kräfte zum Durchdrehen der Räder bereitzustellen. Der Versuch diente somit lediglich zur Beschreibung der technischen Grenzen des Antriebsstranges, wie sie bereits in Kapitel 3.5 beschrieben sind.

4.3.6 Besonderheiten der Validierungsmessungen

Da die Messungen in Hanglagen ohne die Verzögerungstechnik erfolgen, sind die entsprechenden Artefaktbereinigungen für die Traktionsbeiwerte und den Schlupf nicht erforderlich. Während der Vergleichsfahrten in Hanglagen wurde während der ersten Versuche die Aufzeichnung der Messdaten vor Beginn der Befahrung gestartet. Dabei hat sich jedoch gezeigt, dass ein Start der Messwertaufzeichnung bei bereits fahrender Maschine vorzuziehen ist, da die Beschleunigungsphase nicht mit erfasst wird. Diese führt jedoch zu einer tendenziellen Überschätzung des mittleren Schlupfniveaus, welches für die Befahrung einer bestimmten Neigung zu erwarten ist. Neben den Hangabtriebskräften muss auch eine minimale Trägheit der Masse (des Fahrzeugs) überwunden werden. Die Auswirkungen sind minimal und könnten, ohne die Ergebnisse entscheidend zu verändern, vernachlässigt werden. Um jedoch eine optimale Vergleichbarkeit zwischen den Befahrungen sicherzustellen, wird die Mindestradumfangsgeschwindigkeit auf 0,6 m/s erhöht, sodass die Beschleunigungsmomente zu Beginn der Hanglagenbefahrung von der Betrachtung ausgeschlossen werden.

4.4 Datensätze

4.4.1 Hintergrund

Im Rahmen der Versuche sowie im Anschluss an die Messungen wurde eine Vielzahl von Daten erhoben. Für die jeweiligen Fragestellungen werden unterschiedliche Datensätze und Zusammenstellungen benötigt, die im Weiteren kurz vorgestellt werden. Um die Bedeutung der Versuchsbedingungen in Form von Maschinenparametern, Bestandesbedingungen und Bodenvoraussetzungen zu beschreiben, werden separate Datensätze zu den Versuchsserien und den Versuchsgassen erzeugt. Für die eigentliche Messwertaufzeichnung ergibt sich eine Unterteilung in die Messwerte der Traktionsmessungen und die Daten der Vergleichsfahrten in Hanglagen. Diese Unterteilung entsteht bereits durch die unterschiedliche Behandlung der Daten sowie die Aussonderung von Artefakten. Für die Zugkraftmessungen erfolgt zudem die Verdichtung der Messinformationen auf zwei weitere Datensätze, die für unterschiedliche Schritte der Modellbildung erforderlich sind. Hintergrund dieser Datenzusammenstellungen ist die deutliche Überrepräsentierung des unteren Schlupfbereichs.

4.4.2 Aggregierte Datensätze

4.4.2.1 Versuchsserien

Durch die Zugkraftmessungen und die Vergleichsfahrten sind insgesamt 88 verwertbare Versuchsserien entstanden. Eine Versuchsserie besteht dabei aus der Befahrung eines Standortes bei einem bestimmten Bodenwassergehalt. Für jede dieser Serien sind die Informationen zu den Versuchsbedingungen angegeben, sodass die Bedeutung einzelner Faktoren für das Versuchskollektiv ermittelt werden kann.

4.4.2.2 Versuchsgassen

Im Rahmen der Versuche wurde eine Vielzahl der Rückegassen mehrfach für Messungen genutzt. Die Anzahl der Versuchsgassen beträgt daher nur 56, obwohl 88 Versuchsserien durchgeführt wurden. Der entsprechende Datensatz der Versuchsgassen enthält die Boden- und Bestandesinformationen für die einzelnen Gassen, sodass sich deren Häufigkeit im Versuchsraum darstellen lässt.

4.4.3 Ebenendaten

4.4.3.1 Vollständiger Datensatz

Durch die Aufteilung der Gesamtdaten entsteht ein Datensatz, der die Messergebnisse der Traktionsmessungen unter ebenen Bedingungen enthält. Diese verteilen sich dabei ungleichmäßig über den gesamten Schlupfbereich, sodass insbesondere der Bereich geringen Schlupfs stärker im Ebenendatensatz vertreten ist. Anhand des Ebenendatensatzes wird das Traktionsvermögen der verschiedenen Versuchsvarianten in Kap 5.3.1 dargestellt. Die entsprechenden Punktwolken sind dem Kapitel 5.3.1 sowie dem Anhang (Abb. V,1 - 57) zu entnehmen.

4.4.3.2 Reduzierte Ebenendaten

Bereits anhand der exemplarischen Punktwolke in Abbildung 20 wird die ungleichmäßige Verteilung der Messdaten über dem Schlupf deutlich. Insbesondere bei geringem Schlupf stehen sehr viele Messdaten zur Verfügung, während sich bei mittlerem und höherem Schlupf eine entsprechend geringere Datengrundlage ergibt. Um die Verteilung der Messdaten über dem Schlupf gleichmäßiger zu gestalten, werden zwei unterschiedliche Wege beschritten. Gemeinsam ist den Vorgehensweisen die Zuordnung der Messdaten zu einer von zehn Schlupfstufen, die sich gleichmäßig über den Schlupfbereich zwischen 0 % und 100 % verteilen. Dazu wird der Schlupf in 10 % Schritten in die Variable *Stufen* umcodiert. Für den Bereich von 0 % bis 10 % Schlupf erfolgt die Einordnung in die erste Schlupfstufe mit der Ziffer „5“, für 10 % bis 20 % in die Stufe „15“ und so weiter. Insgesamt entstehen so 10 *Stufen*, die jeweils einen Schlupfbereich von 10 % abdecken. Die *Stufennummer* gibt dabei den mittleren Wert der Stufe an. Die Werteanzahlen der einzelnen Stufen variieren stark und zeigen eine hohe Bedeutung der unteren Schlupfstufen. Unter Beibehaltung einer möglichst großen Variabilität lassen sich die Datenanzahlen innerhalb der zehn Schlupfstufen angleichen. Die Anzahl der Daten ergibt sich dabei für jede Konfiguration und Feuchtekombination (Versuchsserie) aus der Schlupfstufe mit dem geringsten Datenumfang. Diese Anzahl wird durch eine normalverteilte Zufallsauswahl auf die anderen Schlupfstufen übertragen und führt zum reduzierten Ebenendatensatz. Durch diesen Schritt werden die Daten nicht verändert oder durch einen Mittelwert ersetzt, sondern die Variabilität der Daten kann weiterhin berücksichtigt werden. Durch die beschriebene Datenauswahl verringert sich die Anzahl der Datensätze von 92.886 für die Ebenendaten auf 37.550 Messwertkombinationen des reduzierten Datensatzes.

Für Qualitätsbeurteilung von Ausgleichsmodellen ist die Variabilität der Ausgangsdaten von entscheidender Bedeutung, sodass diese möglichst zu erhalten ist. Andererseits ergibt sich durch die überrepräsentierten unteren Schlupfwerte eine Beeinflussung des Ausgleichsergebnisses bei höherem Antriebsschlupf. Durch die Optimierung der Abweichungsquadrate bei geringem Schlupf werden stärkere Abweichungen bei hohem Schlupf aufgrund der deutlich geringeren Zahl der Wertepaare toleriert. Im vorliegendem reduzierten Ebenendatensatz ist dies behoben, sodass alle Schlupfbereiche mit gleichem Gewicht in die Regressionsberechnungen eingehen. Der Datensatz wird für die Berechnung der bodenökologischen Grenzneigungen, orientiert an der 25 % Schlupfgrenze, eingesetzt.

4.4.3.3 Stufenmittelwerte

Die deutlichste Einschränkung des Ausgangsdatensatzes ergibt sich für die Reduktion der Daten auf Stufenmittelwerte. Dabei werden für jede Versuchsserie als Kombination aus Konfiguration und volumetrischem Bodenwassergehalt die Mittelwerte für Schlupf und Traktionsbeiwert der zehn Schlupfstufen errechnet. Diese bilden zusammen mit den übrigen Gruppierungsvariablen der Ebenendaten einen neuen Datensatz der Stufenmittelwerte. Die ursprünglichen Ebenendaten verkürzen sich dadurch auf 570 Datensätze, die das Traktionsverhalten des Ruckezugs bei unterschiedlichen Untergrundbedingungen beschreiben. Die so gewonnenen Daten werden für die Identifikation der entscheidenden Einflussfaktoren verwendet. Durch die Reduktion der einzelnen Versuchsserien auf zehn Wertekombinationen aus Schlupf und Traktionsbeiwert gehen diese gleichwertig in die Regressionsberechnungen ein. Stärker besetzte Versuchsserien haben somit den gleichen Einfluss auf das Ergebnis wie Serien, die nur auf einem geringen Datenumfang basieren.

4.4.4 Hangdaten

Für die Befahrungen der Hanglagen erfolgt keine weitere Aufteilung der Daten, sodass es lediglich einen Hangdatensatz gibt. Verwendung finden die Daten bei der Überprüfung der Neigungsprognosen in Kap. 5.5.

4.5 Exemplarische Datenansicht

4.5.1 Kurvenverläufe

Für einen kurzen Einblick in die Daten wird im Folgenden exemplarisch für die gemessenen und berechneten Variablen des Datensatzes der Verlauf der Werte über der Zeit dargestellt. Die Daten umfassen jeweils einen Zeitraum von 125 Sekunden aus einer Erstbefahrung mit einem Reifeninnendruck von 2,7 bar in unbeladenem Zustand der Versuchsmaschine. Es werden nur die Abbremszyklen dargestellt, da durch die beschriebene Datenauswahl eine Beschränkung auf ansteigenden Schlupf erfolgte. Die Zeiten zwischen den Abbremsungen sind durch dieses Vorgehen ausgeblendet, sodass das Ergebnis der Datenauswahl deutlich wird.

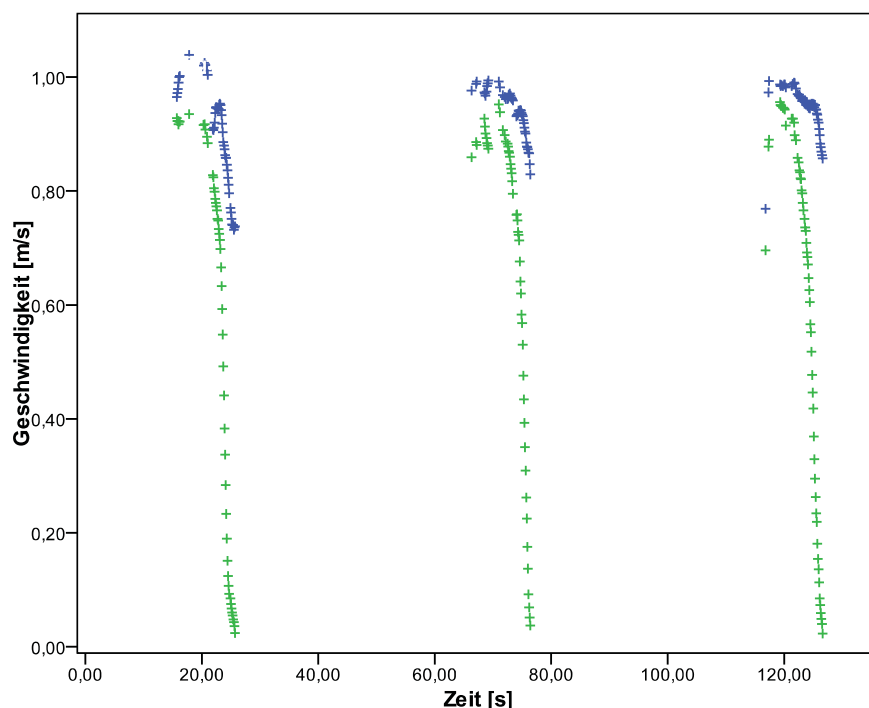


Abbildung 21: Verlauf der Radumfangs- (blau) und Fadengeschwindigkeit (grün) für einen exemplarischen Zeitausschnitt von 125 s

Abbildung 21 zeigt grün den Verlauf der tatsächlichen Fahrzeuggeschwindigkeit (Fadengeschwindigkeit) über Grund und den Verlauf der Radumfangsgeschwindigkeit (blau) für den gewählten Zeitausschnitt. Die tatsächliche Geschwindigkeit bewegt sich zwischen 0 m/s und ca. 0,85 m/s, wobei sich drei Abbremsungen der Versuchsmaschine bis zum Fahrzeugstillstand deutlich abzeichnen. Für die alle Abbremsung sind zudem Teile der Beschleunigungsphase zu erkennen, die sich im anfänglichen Anstieg der Geschwindigkeit auf den Maximalwert für die jeweilige Abbremsung zeigt. Hat der Forwarder die Maximalgeschwindigkeit erreicht, beginnt die Reduktion der Fahrgeschwindigkeit bis zum Stillstand. Der Verlauf der Abbremsung zeigt dabei für alle drei

Verzögerungsphasen einen gleichmäßigen Abfall der Geschwindigkeit ohne erkennbare Stufen, wie sie bei der Steuerung der Verzögerungswinde unumgänglich sind.

Ein Vergleich mit dem zeitlichen Verlauf der Radumfangsgeschwindigkeit (blau) zeigt die Unterschiede zwischen der theoretischen Geschwindigkeit und der tatsächlichen Geschwindigkeit, gemessen mit Hilfe der Spill-Konstruktion. Auch hier kommt es zu einem Abfall der Umfangsgeschwindigkeit durch die Abbremsungen. Dieser führt jedoch nicht zum Stillstand der Reifen, sondern lediglich zu einer Verringerung der Geschwindigkeit um bis zu 0,4 m/s. Ursache ist der Leistungsbedarf für die Zugkrafterhöhung, der sich auf die Motorbelastung und damit auf die Drehzahl auswirkt. Bei der zweiten und dritten Abbremsung ist zu erkennen, dass sich die Radumfangsgeschwindigkeit nach der beginnenden Abbremsung wieder erhöht. Hier zeigt sich die Reaktion des Antriebs und des Motors auf die gestiegene Belastung. So kann es zum Beispiel einen kurzen Moment dauern, bis der hydrostatische Antrieb den nötigen Druck für den Hydraulikmotor des Fahrtriebs aufgebaut hat.

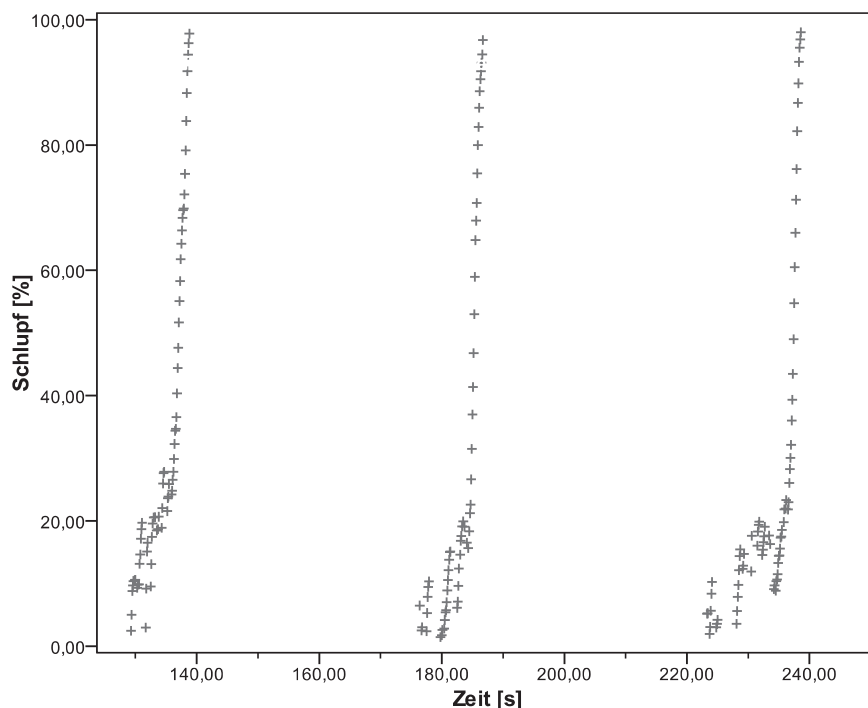


Abbildung 22: Verlauf der Schlupfwerte für einen exemplarischen Zeitausschnitt von 125 s

Wird aus der theoretischen Radumfangsgeschwindigkeit und der tatsächlichen (Faden-) Geschwindigkeit der Schlupf berechnet, stellt sich der zeitliche Verlauf der berechneten Größe wie in Abbildung 22 gezeigt dar. Mit zunehmendem Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten steigt der Schlupf im zeitlichen Verlauf, bis die gesetzte Grenze von 98 % Schlupf überstiegen ist. Nach einem anfänglich verhalteneren Anstieg nimmt der Schlupf nach Überschreiten von ca. 30 % rapide und sehr gleichmäßig zu.

Der ebenfalls rechnerisch bestimmte Traktionsbeiwert ist für den zeitlichen Ausschnitt in Abbildung 23 zu erkennen. Deutlich zeichnen sich die drei Abbremsungen des ausgewählten Zeitraums ab. Die erreichten Maximalwerte liegen zwischen 0,55 und etwas über 0,65. Nach Erreichen des Maximums ist für alle drei Abbremsungen ein Abfall der Traktionsbeiwerte zu erkennen.

So werden die maximalen Zugkräfte der Maschine vor Erreichen des maximalen Schlupfs erzielt, dessen Ansteigen die Datenauswahl innerhalb des Auswahlzeitraums mitbestimmt hat. Daraus folgt, dass es für die Abhängigkeit zwischen dem Schlupf und dem Traktionsbeiwert ein Maximum geben muss, nach dessen Überschreiten ein weiterer Anstieg des Schlupfs keinen positiven Einfluss mehr auf die Fahrzeugzugkraft mehr hat.

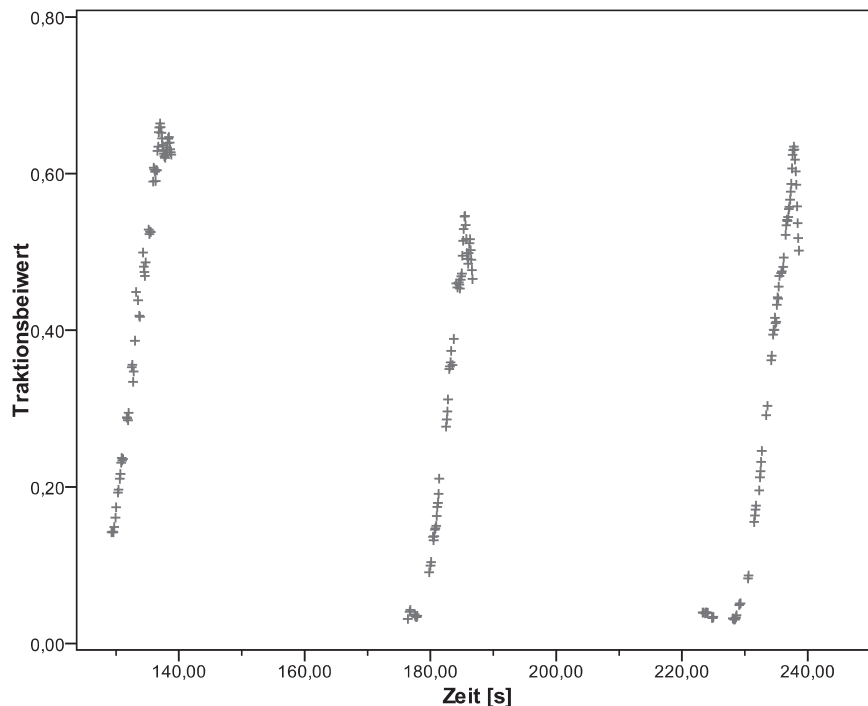


Abbildung 23: Verlauf der Traktionsbeiwerte für einen exemplarischen Zeitausschnitt von 125 s

Die gezeigten Kurvenverläufe machen deutlich, dass sich die sehr feinen Schritte der Steuerung anhand der Messwerte nicht wiedererkennen lassen. Dies gilt sowohl für die beiden Geschwindigkeiten als auch für den Schlupf und die Entwicklung des Traktionsbeiwertes über der Zeit. Selbst eine Beschränkung auf eine einzelne Abbremsung zeigt für die Variablen einen gleichmäßigen Anstieg oder Abfall der Werte. Es ist daher davon auszugehen, dass die gefundenen Einstellungen der Steuerung eine homogene Abbremsung der Versuchsmaschine und damit eine Zugkraft-erhöhung liefern, die trotz einzelner Stufen als fließend betrachtet werden kann.

4.5.2 Traktions-Schlupf-Kurven

Die in Kap. 2.5 beschriebene Herleitung von Grenzneigungen für den Forstmaschineneinsatz basiert auf der Auswertung des Traktionsbeiwertes in Abhängigkeit des Schlupfs für die unterschiedlichen Varianten des Versuchs. Wie bereits bei JACKE ET AL. (2004) für den Zusammenhang der Zugkraft und des Schlupfs gezeigt, ist in Abbildung 24 die Beziehung zwischen dem Traktionsbeiwert und dem Schlupf dargestellt. Die ebenfalls auf den zeitlichen Ausschnitt beschränkte Darstellung zeigt einen deutlichen Anstieg des Traktionsbeiwertes mit steigendem Schlupf. Insbesondere bis zu einem Schlupfwert von ca. 25 % ist ein steiler Anstieg des Traktionsbeiwertes zu verzeich-

nen, der oberhalb in einen flacheren Verlauf wechselt. Die maximalen Traktionsbeiwerte der eindeutig zu erkennenden drei Einzelabbremssungen bewegen sich zwischen 0,5 und etwas über 0,6. Allen Kurven gemein ist ein lokales Maximum im Bereich zwischen 50 % und 70 % Radschlupf. Ein weiterer Anstieg des Schlupfs an den Rädern der Versuchsmaschine führt zu einem Abfall der umsetzbaren Zugkräfte.

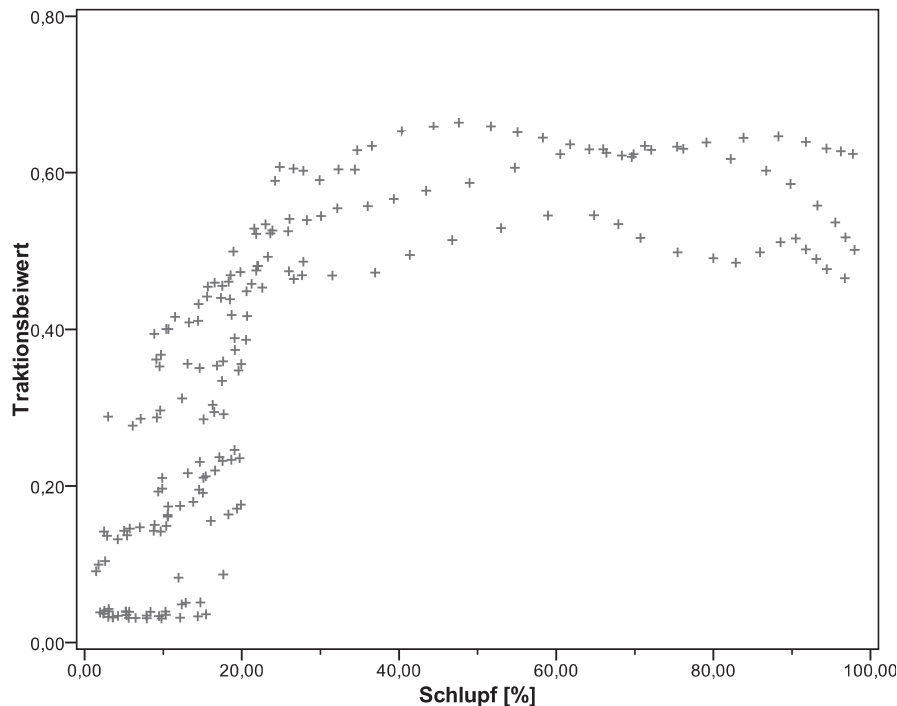


Abbildung 24: Punktwolke aus Traktionsbeiwerten und Schlupf für einen exemplarischen Zeitausschnitt von 125 s

4.6 Ausgleichsfunktion

Der Verlauf der Punktwolke aus Schlupf und Traktionsbeiwert ist für alle untersuchten Konfigurationen dem in Abbildung 24 dargestellten ähnlich. Zum Vergleich zwischen den Konfigurationen sowie zur Bestimmung der Grenzneigungen, werden die Daten mit Ausgleichskurven versehen. Bei HITTENBECK (2004) und JACKE ET AL. (2004) bestehen gute Erfahrungen mit dem quadratischen Ausgleich der Zugkraft-Schlupf-Beziehungen. Für die vorliegenden Daten wird der quadratische Ausgleich jedoch um das kubische Glied erweitert und folgt damit der allgemeinen Formel:

$$Y = a + b * X + c * X^2 + d * X^3 \quad [12]$$

Dabei wird die abhängige Variable (Y) *Traktionsbeiwert* aus der unabhängigen Variable (X) *Schlupf* geschätzt. Die weiteren Koeffizienten a, b, c und d werden bei der Anpassung der Kurve

bestimmt. Der Koeffizient a beschreibt den y -Achsenabschnitt, während b , c und d die Steigung und Krümmung der Ausgleichskurve vorgeben.

Während die mit Traktionshilfsmitteln durchgeführten Versuche vorwiegend einen Anstieg der umsetzbaren Kräfte bis zum Erreichen der oberen Schlupfstufe aufweisen, zeigt sich bei den mit Rädern ausgestatteten Varianten oftmals ein Maximum. Dieses wird jedoch nicht immer durch den kubischen Ausgleich abgebildet. Da sich die Anwendung eines quadratischen Ausgleichs auch auf die Anpassung der Kurve bei geringem Schlupf auswirkt, wird darauf verzichtet, für Versuchsvarianten mit klarem Maximum einen quadratischen Ausgleich anzuwenden. Beim Vergleich der Ausgleichsmodelle ergeben sich für den quadratischen Ausgleich höhere Konstantenwerte, und im Bereich geringen Schlupfs ist die Tendenz zu einem flacheren Verlauf der Kurven erkennbar. Für die resultierenden Prognosewerte wäre daher vielfach mit geringeren Neigungsangaben in Folge des quadratischen Ausgleichs zu rechnen. Um diese Beeinflussung durch das Anpassungsmodell zu eliminieren, wird für alle Versuchsserien eine kubische Ausgleichsfunktion an die Daten angepasst.

Die beschriebenen Unterschiede zwischen den Ausgleichsmodellen zeigt die grundsätzliche Problematik der Darstellung von Zugkraft-Schlupf-Beziehungen in der Literatur. So sind die Unterschiede zwischen den Verläufen verschiedener Untersuchungen zum Verhalten des Traktionsbeiwertes über dem Schlupf oftmals auf die Verwendung unterschiedlicher Ausgleichsmodelle zurückzuführen. Je nach verwendetem Regressionsmodell ergeben sich beispielsweise deutliche Maximalwerte oder asymptotische Entwicklungen der Traktionskurven. Die Modellauswahl wird dabei häufig durch den Fokus auf den unteren Schlupfbereich beeinflusst, der für Fragestellungen des Wirkungsgrades von besonderer Bedeutung ist. Da die Werte in diesem Abschnitt der Kurven den typischen starken Anstieg aufweisen, besteht oftmals nicht der Bedarf, ein Maximum beschreiben zu können.

5 Ergebnisse

5.1 Datengrundlage

5.1.1 Einführung

Durch die Traktionsmessungen und die Vergleichsfahrten in Hanglagen sind insgesamt 978.913 Datensätze mit der MGCsplit-Messtechnik erfasst worden. Angesichts der Messrate von 10 Hz entspricht dies ca. 27,2 Stunden reiner Datenaufnahme. Dabei werden jedoch auch, wie in Kapitel 4 beschrieben, Datensätze erhoben, die nicht für die Auswertung gebraucht werden können. Durch die erforderliche Datenreduktion verringert sich der Umfang der Messdaten auf 153.877 Datensätze. Die Eliminierung der Datensätze während des Maschinenstillstandes sowie weiterer unplausibler Daten (Artefakte) verbessert die Ergebnisqualität erheblich. Die verbliebenen Datensätze beschreiben immerhin eine effektive Messzeit von 4 Stunden und 16 Minuten. Etwa ein Drittel entfällt auf die Validierungsfahrten in Hanglagen, zwei Drittel beziehen sich auf die Traktionsmessungen.

Die Verteilung der Varianten auf unterschiedlichen Ausgangsbedingungen und damit die Bedeutung der verschiedenen Untergrundzustände, Maschinenparameter und der Bestandesbedingungen kann der Vorstellung der möglichen Einflussfaktoren auf das Traktionsverhalten des Rückzugs in Kap. 5.2 entnommen werden.

5.1.2 Traktionsmessungen

Die 92.886 Datensätze aus den Traktionsmessungen verteilen sich wie in Tabelle 1 dargestellt auf die zwölf Versuchskonfigurationen. Am häufigsten vertreten ist die Standardvariante mit gebrauchten Rädern und einem Reifeninnendruck von 2,7 bar. Der geringste Datenumfang ist für die beladene Versuchsmaschine mit gebrauchten Reifen (Konfiguration 10) festzustellen. Die Anzahl der Datensätze einer Variante ist abhängig von den Variationen des Untergrunds, die untersucht wurden. Jede Variation umfasst dabei zumindest eine Veränderung des Wassergehalts im Oberboden, der Korngrößenverteilung, der Humusform oder der Reisigauflage in der Versuchsgasse. Das Spektrum der Variationen reicht von lediglich einer Versuchsserie mit Ketten (Konfiguration 3) bis zu neun Varianten mit bekanntem Bodenwassergehalt, ergänzt durch die nicht vollständig kategorisierten Vorversuche in Wiegersen für die Standardvariante. Wie der Datenumfang für die unterschiedlichen Konfigurationen zeigt, stehen für die meisten Varianten mehrere Versuchsserien zur Auswertung bereit, sodass sich auch der Einfluss einzelner Bodenfaktoren auf das Zugkraftverhalten analysieren lässt. Deutlich wird jedoch auch, dass nicht alle Variationen für jede Maschinenkonfiguration realisiert werden konnten. Für die Auswertung gilt es daher, die einzelnen bedeutsamen Faktoren zu identifizieren und deren Auswirkungen auf das Traktionsverhalten bestmöglich auf die Gesamtdaten zu übertragen.

Tabelle 1: Verteilung der Traktionsmessungen auf die verschiedenen Maschinenkonfigurationen

Maschinenkonfiguration	Häufigkeit <i>absolut</i>	Häufigkeit <i>relativ (%)</i>
Konfiguration 0 <i>(gebrauchte Reifen mit 2,7 bar)</i>	25.194	27,1
Konfiguration 1 <i>(Ketten und Bänder; 2,7 bar)</i>	8.249	8,9
Konfiguration 2 <i>(Neureifen; 2,7 bar)</i>	10.948	11,8
Konfiguration 3 <i>(Ketten; 2,7 bar)</i>	1.728	1,9
Konfiguration 4 <i>(Bändern; 2,7 bar)</i>	10.503	11,3
Konfiguration 5 <i>(gebrauchte Reifen; 1,5 bar)</i>	13.408	14,4
Konfiguration 6 <i>(Neureifen; 1,5 bar)</i>	7.526	8,1
Konfiguration 10 <i>(gebrauchte Reifen mit Beladung; 2,7 bar)</i>	1.559	1,7
Konfiguration 12 <i>(Neureifen mit Beladung; 2,7 bar)</i>	3.395	3,7
Konfiguration 15 <i>(gebrauchte Reifen mit Beladung; 1,5 bar)</i>	5.300	5,7
Konfiguration 16 <i>(Neureifen mit Beladung; 1,5 bar)</i>	5.076	5,5
Gesamt	92.886	100,0

5.1.3 Hangmessungen

Während der Vergleichsfahrten in Hanglagen sind insgesamt 60.991 Datensätze für die Auswertung entstanden. Diese verteilen sich wie in Tabelle 2 dargestellt auf elf Konfigurationen der Versuchsmaschine. Für die Variante mit Ketten (Konfiguration 3) gibt es im Gegensatz zu den Versuchen unter ebenen Bedingungen keine Vergleichsdaten. Der größte Datenumfang ist wiederum für die Standardvariante zu verzeichnen, die insgesamt bei sieben verschiedenen Wassergehalten des Oberbodens untersucht wurde. Insbesondere die Konfigurationen der Maschine in beladenem Zustand (10 bis 16) zeigen geringere Datenumfänge. Hier wurde jeweils nur eine Untergrundvariante untersucht, während die unbeladenen Konfigurationen mit Ausnahme der Variante „Neureifen“ in Verbindung mit geringem Reifeninnendruck (Konfiguration 6) bei wechselnden Bodenverhältnissen geprüft werden konnten. Trotz der, verglichen mit den Traktionsmessungen, geringen Datenumfänge stehen für jede Variante mindestens 2,5 Minuten effektive Messzeit zur Auswertung bereit. Angesichts gleichmäßiger Steigungen und Untergrundbedingungen sowie einer Fahrt mit nahezu konstanter Radumfangsgeschwindigkeit können die resultierenden Ergebnisse daher als repräsentativ für die Versuchsbedingungen gelten.

Tabelle 2: Verteilung der Validierungsmessungen in Hanglagen auf die verschiedenen Maschinenkonfigurationen

Maschinenkonfiguration	Häufigkeit <i>absolut</i>	Häufigkeit <i>relativ (%)</i>
Konfiguration 0 <i>(gebrauchte Reifen mit 2,7 bar)</i>	13.666	22,4
Konfiguration 1 <i>(Ketten und Bänder; 2,7 bar)</i>	9.218	15,1
Konfiguration 2 <i>(Neureifen; 2,7 bar)</i>	6.975	11,4
Konfiguration 4 <i>(Bänder; 2,7 bar)</i>	6.649	10,9
Konfiguration 5 <i>(gebrauchte Reifen; 1,5 bar)</i>	7.625	12,5
Konfiguration 6 <i>(Neureifen; 1,5 bar)</i>	3.185	5,2
Konfiguration 10 <i>(gebrauchte Reifen mit Beladung; 2,7 bar)</i>	2.024	3,3
Konfiguration 11 <i>(Ketten und Bänder mit Beladung; 2,7 bar)</i>	3.697	6,1
Konfiguration 12 <i>(Neureifen mit Beladung; 2,7 bar)</i>	1.117	1,8
Konfiguration 15 <i>(gebrauchte Reifen mit Beladung; 1,5 bar)</i>	1.687	2,8
Konfiguration 16 <i>(Neureifen mit Beladung; 1,5 bar)</i>	5.148	8,4
Gesamt	60.991	100,0

5.2 Einflussfaktoren

5.2.1 Einordnung der Einflussfaktoren

Für die einzelnen Testvarianten stehen eine Vielzahl von Informationen über die Bedingungen während der Messungen zur Verfügung. Die jeweiligen äußeren Versuchsbedingungen sind in 27 Variablen angegeben und codiert. Ein besserer Überblick ergibt sich durch die Zuordnung der Variablen zu drei verschiedenen Einflussbereichen, die hinsichtlich der Maschinenparameter, der Bestandesparameter und der Bodenparameter bestehen. Anhand dieser drei Bereiche werden die Ausprägungen der einzelnen Variablen zum einen für die Versuchsserien (N = 88) und zum anderen, sofern sinnvoll, für die Versuchsgassen (N = 60) dargestellt. Der Umfang dieser Betrachtungsweisen unterscheidet sich aufgrund der teilweise erfolgten Mehrfachnutzung einer Gasse. Insbesondere für die Vergleichsfahrten in Hanglagen erfolgte häufig eine wiederholte Nutzung einzelner Abschnitte, da die Anforderungen hinsichtlich der Fahrdistanz für die Versuche sehr hoch waren und somit nur von wenigen Gassen erfüllt wurden. Die Auswertung auf Basis der

Gassen zeigt daher die grundsätzliche Verteilung der Bestandes- und Bodenparameter, während die Betrachtung nach Versuchsserien die Bedeutung für die Versuchsergebnisse widerspiegelt.

5.2.2 Maschinenparameter

5.2.2.1 Konfiguration

Über die Variable *Konfig* sind die untersuchten Maschinenkonfigurationen direkt codiert. Je nach eingetragener Zahl folgt daraus die Ausrüstung der Endabtriebskomponenten. Tabelle V, 1 (siehe Anhang) zeigt die zwölf verschiedenen Konfigurationen und die zugehörige Anzahl der Versuchsserien. Diese sind zusätzlich noch getrennt nach Traktionsmessungen und Vergleichsfahrten in Hanglagen dargestellt. Insgesamt wurden 88 Versuchsserien durchgeführt. 57 dieser Testbedingungen beschreiben Versuche während der Zugkraftmessungen unter ebenen Bedingungen. Demgegenüber stehen 31 Schlupfmessungen in Hanglagen. Die meisten Testfahrten konnten mit der Standardvariante (gebrauchte Reifen, Reifeninnendruck 2,7 bar) aufgezeichnet werden. Sehr häufig (14 Versuche) sind auch Messungen mit Neureifen bei einem Reifeninnendruck von ebenfalls 2,7 bar. Lediglich ein Versuch ist für die Variante mit Ketten sowie für die Messungen mit beladenem Rückezug und montierten Traktionshilfsmitteln (Ketten und Bänder) zu verzeichnen. Ursachen für die jeweils geringen Messumfänge sind zum einen die Schwierigkeiten, Traktionsmessungen für den beladenen Forwarder mit Ketten und Bändern durchzuführen, zum anderen der lediglich exemplarische Versuch, die Traktionsvorteile durch die Gleitschutzketten zu analysieren. Der Hauptfokus der Untersuchungen liegt auf dem Vergleich der unterschiedlichen Reifen und Reifeninnendrucke mit dem Einsatz der Traktionshilfsmittelkombination aus Ketten und Bändern. Versuche, die ausschließlich mit Bändern oder Ketten absolviert wurden, bilden somit nur Zusatzinformationen.

Reduziert auf die Zugkraft-Schlupfmessungen mit der Bremswinde, hat die Standardvariante (Konfiguration 0) wieder die höchste Bedeutung. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass zwei dieser Testserien während der Vorversuche in Wiegersen erfolgten und daher nicht alle erforderlichen Informationen für diese Fahrten zur Verfügung stehen. Für die unbeladenen Versuchsvarianten (Konfiguration kleiner 10) stehen mindestens fünf verschiedene Versuchsserien pro Konfiguration zur Verfügung, sodass für jede Versuchsvariante ein relativ großes Spektrum an Untergrundbedingungen untersucht wurde. Die Anzahl der beladenen Fahrten ist deutlich geringer, da der Einfluss der zusätzlichen Masse nur in der grundsätzlichen Wirkung untersucht werden sollte. Für diese Versuche ist das Spektrum deutlich reduziert, sodass die Auswirkungen der einzelnen Einflussfaktoren hier nur begrenzt erfasst werden können. Wie die Zuladung das Traktionsverhalten beeinflusst, kann durch die insgesamt zehn Versuchsserien mit unterschiedlicher Beladung jedoch geklärt werden.

Das Spektrum der Schlupfmessungen in Hanglagen ist gegenüber den Traktionsmessungen leicht reduziert. Als Ursache sind die hohen Anforderungen an die befahrenen Versuchsgassen zu nennen. Für eine brauchbare Messung ist eine möglichst einheitliche Geländesteigung über eine weite Strecke erforderlich. In den zur Verfügung gestellten Versuchsarealen gab es jedoch nur wenige Gassen, die diesen Ansprüchen genügten. Neben ungleichmäßigen Steigungen wa-

ren oftmals der raue Untergrund durch Wurzelstöcke und die Geländestruktur ein Ausschlussgrund. Insgesamt stehen jedoch 31 Messungen zur Verfügung, die wiederum vorwiegend mit der Standardbereifung und den Neureifen bei einem Reifeninnendruck von 2,7 bar durchgeführt wurden. Für die beladenen Versuchsvarianten sind acht Serien zu verzeichnen, sodass auch hier die Auswirkungen der zusätzlichen Beladung berücksichtigt werden können.

5.2.2.2 Reifen

Bei der Variablen *Reifen* handelt es sich um eine Dummy-Variable, die eine Trennung zwischen den gebrauchten Reifen („0“) und den Neureifen („1“) ermöglicht. Tabelle V, 2 zeigt die Anzahl der Versuche mit den zwei Reifensätzen. Insgesamt wurden 55 Testserien mit den gebrauchten Reifen und 33 Messungen mit den neuen Reifen durchgeführt. Die häufigere Nutzung des gebrauchten Rädersatzes ist dabei sowohl für die Traktionsmessungen als auch für die Hangmessungen zu verzeichnen. Durch die verzögerte Auslieferung der Neureifen durch den Hersteller Ende des Jahres 2007 konnten während der ersten Versuchseinsätze in Reinhausen und im Solling noch keine Messungen mit diesen Reifen erfolgen. Zudem sind die Versuchsvarianten mit Traktionshilfsmittel ausschließlich mit dem gebrauchten Rädersatz durchgeführt worden, sodass sich bereits hieraus eine höhere Bedeutung für die Versuche ergibt.

5.2.2.3 Druck

Der Reifeninnendruck in den acht Rädern der Versuchsmaschine wird über die Variable *Druck* im Datensatz berücksichtigt. Diese erhält den Eintrag 2,7 für die Kombination aus 2,5 bar Fülldruck in den Reifen des vorderen (Motorwagen-) Bogies und 3,0 bar unter dem Rungenkorb. Der reduzierte Reifeninnendruck von 1,5 bar wird demgegenüber einheitlich in allen acht Rädern des Rückezugs eingestellt. Wie Tabelle V, 3 zeigt, wurden die meisten Versuche mit dem regulären Fülldruck (2,7 bar) und nur 29 Versuchsserien mit reduziertem Innendruck von 1,5 bar durchgeführt. Die Verteilung der Druckvarianten auf die Traktions- und Schlupfmessungen stellt sich sehr gleichmäßig dar, sodass jeweils etwa ein Drittel der Messungen mit dem reduzierten Fülldruck erfolgten. Die höhere Häufigkeit des regulären Reifeninnendrucks ist dabei wiederum auf die Messungen mit Traktionshilfsmitteln zurückzuführen, da für diese vom Hersteller ein höherer Druck gefordert wird.

5.2.2.4 Ketten

Die Montage von Gleitschutzketten auf dem mittलगelenkseitigem Reifenpaar des vorderen Bogies ist durch die Dummy-Variable *Ketten* codiert. Sind die Gleitschutzketten montiert, erhält die Variable den Eintrag „1“. In Tabelle V, 4 (siehe Anhang) ist die Anzahl der Versuchsserien mit montierten Ketten dargestellt. Es wird deutlich, dass lediglich zehn der 88 Versuche mit diesem Traktionshilfsmittel durchgeführt wurden. Mit Ausnahme eines Versuchs, bei dem ausschließlich Gleitschutzketten zum Einsatz kamen, sind dies die Testfahrten mit der Kombination aus beiden Traktionshilfsmitteln.

5.2.2.5 Baender

Bei der Variable *Baender* handelt es sich um eine weitere Dummy-Variable, die zur Identifikation der Versuche mit montierten Bändern (Eintrag „1“) dient. Wie bereits für die Ketten gezeigt, wurde nur ein geringer Teil der Versuche unter Einsatz dieses Traktionshilfsmittels absolviert (siehe Tabelle V, 5 im Anhang). Lediglich 17 Versuchsserien erhalten den Eintrag „1“ in der Variable *Baender*. Insbesondere für die Validierungsmessungen in Hanglagen ergeben sich nur fünf Versuchsserien. Vier dieser Versuche wurden dabei in der Kombination mit Gleitschutzketten durchgeführt. Nur für eine Testserie erfolgte die ausschließliche Montage der Bänder. Die geringe Anzahl ist begründet durch den eigentlichen Fokus der Versuche auf die Kombination der Traktionshilfsmittel.

5.2.2.6 Beladung

Ein Teil der Versuchsserien widmete sich dem Einfluss der zusätzlichen Masse durch die Beladung des Rückezugs. Diese ist, in kg angegeben, den Daten durch die Variable *Beladung* vorangestellt. Von den insgesamt 88 Versuchsserien wurden 70 Messungen ohne Beladung durchgeführt, während für 18 Versuchsserien zusätzliche Lasten zwischen 1.350 kg und 8.100 kg zu verzeichnen waren (siehe Tabelle V, 6 im Anhang). Die Beladung der Maschine wurde dabei vorwiegend durch bereits gelagertes Holz gebildet, sodass trotz nahezu vollständig ausgefülltem Rungekorb nur zwei Versuche mit deutlich über 6.000 kg Zuladung erfolgten. Neben der reduzierten Holzfeuchte spielen jedoch auch die vorgefundenen Sortimente eine Rolle, da vielfach nur 3 m langes Holz geladen werden konnte. Vergleicht man die Zuladungen während der Versuche mit den Zuladungsangaben des Herstellers (vgl. Kap. 3.3), so wird deutlich, dass mit längeren Sortimenten und frischem Holz deutlich höhere Zuladungen möglich sind.

5.2.3 Bestandesparameter

5.2.3.1 Bestand

Durch die Variable *Bestand* sind die einzelnen Versuchsgassen der Versuchsserien erkennbar. Die insgesamt achtstellige Zahl setzt sich aus der Nummerierung der Forstämter, Revierförstereien, Abteilungen (vierstellig), Hilfsflächen und Gassennummer zusammen. Während der Hauptversuche wurden die drei niedersächsischen Forstämter Reinhausen (1), Münden (2) und Lauterberg (3) aufgesucht. Lediglich im Forstamt Münden erfolgten die Versuche in zwei verschiedenen Revierförstereien: (Goseplack (1) und Bursfelde (2)). Ansonsten erhielten die Flächen die Ziffer „1“. Die nächsten vier Zahlen geben die Abteilungsnummern, die darauffolgende Ziffer deren Hilfsflächen an. Da in den einzelnen Flächen teilweise mehrere Gassen genutzt werden konnten, gilt die letzte Zahl der Gassennummerierung. Für die 88 Versuchsserien stehen insgesamt 60 verschiedene Versuchsgassen zur Verfügung, wobei vier dieser Rückegassen im Rahmen der Vorversuche in Wiegersen befahren wurden. Der Unterschied zwischen der Anzahl der Versuchsserien und der Versuchsgassen verdeutlicht, dass einige Flächen mehrfach für die Untersuchung in Anspruch genommen wurden. Die häufigste Nutzung erfolgte auf einer geneigten Gasse im Forstamt Reinhausen, die insgesamt vier Versuchsserien durchlief. Immerhin acht Gassen konnten

dreimal und neun Rückegassen zweimal für die Versuchsvarianten verwendet werden. Die übrigen Gassen wurden lediglich für eine Versuchsserie genutzt.

5.2.3.2 Steigung

Ein wichtiger Parameter der Versuchsbestände ist die befahrene Geländeneigung (*Variable Steigung*), da diese sich erheblich auf die Mobilität des Rückezugs auswirkt. Tabelle V, 7 (siehe Anhang) zeigt die Häufigkeit der unterschiedlichen Neigungsbereiche anhand der Anzahl der Versuchsserien. Letztere werden über die *Variable Steigung* in drei Bereiche für die Traktionsmessungen und in Zehnerschritten für die Validierungsfahrten in Hanglagen eingeteilt. Während der Untersuchungen reichte das Spektrum der befahrenen Geländeneigungen von $-6,0\%$ bis zu 40% . Gut die Hälfte der Traktionsmessungen wurde bei negativen Steigungen durchgeführt, während 20 Versuchsserien ($35,1\%$) bei positiven Geländeneigungen erfolgten. Lediglich achtmal konnte der Untergrund als faktisch eben angesprochen werden. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass unter diesen acht Flächen ohne Geländeneigung auch vier Flächen aus den Vorversuchen in Wiegersen sind. Daraus wird deutlich, dass entsprechend ebene Bereiche im Südniedersächsischen Bergland nur schwer zu finden sind. Der weit überwiegende Teil der Traktionsmessungen in ebenen Lagen musste daher bei Geländeneigungen bis zu $8,0\%$ durchgeführt werden.

Für die Vergleichsfahrten in Hanglagen sind je nach Bodenbedingungen deutlich größere Steigungen erforderlich, um die Versuchsmaschine in den Bereich höheren Schlupfs zu bekommen. Neben den Anforderungen des Versuchs spielen allerdings auch die vorgefundenen Rückegassen eine entscheidende Rolle. Das Gros der Schlupfmessungen ($51,6\%$) wurde daher bei Neigungen zwischen 20% und 29% durchgeführt, während jeweils sieben Messungen ($22,6\%$) bei geringeren Neigungen sowie im Bereich bis 39% Steigung erfolgten. Der höchste gemessene Steigungswert beträgt für lediglich eine Versuchsserie 40% .

5.2.3.3 Querneigung

Ein Teil der Versuchsgassen weist eine auffällige Neigung quer zur Fahrtrichtung auf. Um den möglichen Einfluss dieser Bedingungen in die weitere Auswertung einbeziehen zu können, enthält der Datensatz die *Variable Querneigung*. Diese nimmt als Dummy für deutliche Querneigung den Wert „1“ an, während die verbleibenden Flächen den Eintrag „0“ erhalten. Nur für elf Traktionsmessungen ($19,3\%$) wurden Rückegassen mit entsprechender Geländeausprägung berücksichtigt. Bei den übrigen 46 Versuchsserien unter ebenen Bedingungen sowie bei 31 Validierungsfahrten wurde keine *Querneigung* des befahrenen Untergrunds verzeichnet (s. Anhang Tabelle V, 8).

5.2.3.4 Baumart

Während der Versuche wurde für jede Gasse die Bestockung notiert und den Messdaten durch die *Variable Baumart* vorangestellt. Insgesamt wird deutlich, dass die Versuchsflächen durch Buchen- und Fichtenbestockung dominiert werden (s. Tabelle V, 9 im Anhang). Lediglich eine geringe Häufigkeit haben Freiflächen sowie Eichen- oder Lärchenbestände. Bezogen auf die Trakti-

onsmessungen sind über die Hälfte der Versuchsgassenbestände mit Fichte als Hauptbaumart bestockt, während deren Anzahl bei den Schlupfmessungen deutlich geringer ist. Die meisten Messungen (58,1 %) in Hanglagen erfolgten bei vorwiegender Buchenbestockung.

Wird die Betrachtung auf die untersuchten Gassen reduziert, ohne dabei Mehrfachbefahrungen zu berücksichtigen, verändert sich die Verteilung deutlich. In der letzten Spalte der Tabelle V, 9 (siehe Anhang) sind die Angaben zur Häufigkeit der Baumarten, bezogen auf die Versuchsgassen, angegeben, sodass Mehrfachbefahrungen das Ergebnis nicht beeinträchtigen. Dabei wird sichtbar, dass über die Hälfte der befahrenen Flächen mit Fichten bestockt sind und lediglich etwas über ein Drittel der Versuchsgassen Buchen als Hauptbaumart aufweisen. Hier zeigt sich, dass die wiederholte Nutzung einzelner Gassen insbesondere in den buchendominierten Bereichen des Forstamtes Reinhausen erfolgte.

5.2.3.5 Gasse

Die Versuchsgassen unterscheiden sich teilweise deutlich hinsichtlich des Gassenzustandes. Dieser wird durch die Variable *Gasse* als Information zur Verfügung gestellt. Den Eintrag „0“ erhalten alle Versuchsflächen, die keine Reisigauflage und auch keine deutliche Humusauflage erkennen lassen. Insgesamt fallen neun Versuchsserien (10,2 %) in diese Kategorie, die für sieben Versuchsgassen notiert wurde (s. Anhang Tabelle V, 10). Deutlich als Standard zu erkennen ist die Ausprägung mit „normaler“ Reisig- und Humusauflage (Ziffer „1“), die je nach Datengrundlage 75 % (Versuchsgassen) bzw. über 80 % der Versuchsserien umfasst. Lediglich ein Versuch erhält den Eintrag „2“, der auf einen besonderen Bewuchs der Rückegasse hindeutet. Es handelt sich dabei um einen Bestand des Forstamtes Reinhausen mit auffälligen Gras- und Gestrüppbewuchs des Untergrunds. Demgegenüber etwas häufiger vertreten ist das Vorkommen einer stärkeren Altreisigauflage mit kräftigeren Ästen.

5.2.3.6 Besondere Versuchsbedingungen (*Auswahl*)

Die letzte Variable (*Auswahl*) des Bereichs Bestandesparameter codiert Besonderheiten der Versuchsgassen oder der jeweiligen Bedingungen. In Tabelle V, 11 (im Anhang) sind die Bedeutungen der verschiedenen Ausprägungen für die Variable *Auswahl* dargestellt. Zwei Drittel der Versuchsserien weisen dabei keine Besonderheiten auf, die über diese Variable codiert wurden. Bei den meisten Ausprägungen handelt es sich zudem um Informationen, die für die Auswertung nicht entscheidend sind, sondern lediglich zur Identifizierung dienen. Nur für jeweils eine Versuchsserie stehen die Einträge für auffällig viele Schlaglöcher, die einmalige Verwendung einer sich dehnenen Angelschnur, gehäuftes Vorkommen von Pfützen mit stehendem Wasser sowie die Einschätzung, der Skelettgehalt sei während der Standortkartierung zu niedrig angesprochen worden. Sechs Messungen weisen die absolvierten Versuche als grenzwertig bezüglich der Befahrbarkeit aus. Dies kann für Versuchsserien gelten, bei denen die Maschine festgefahren wurde oder aber die Steigung nur mit erheblichem Schlupf bewältigt werden konnte. Ebenfalls sechs Datensätze sind mit dem Zusatz „wechselnde Wassergehaltswerte während eines Messtages“ versehen. Ursache hierfür ist die deutliche Verbesserung der Traktion durch die Befahrungen, die zu einer erneuten Messung des Bodenwassergehaltes führte. Bei den zwei Versuchsgassen, für die dies zutrifft, wurde mit zunehmender Anzahl an Überfahrten eine Reduktion der Feuchte fest-

gestellt. Eine weitere Besonderheit betrifft Traktions- und Schlupfmessungen auf geschobenen Rückewegen im Forstamt Lauterberg. Neben einer Traktionsmessung unter nahezu ebenen Bedingungen wurden drei Schlupfmessungen in Hanglagen auf eigens für die Waldbewirtschaftung erstellten Rückewegen durchgeführt. Diese Wege entstehen durch das teilweise Abschieben des Auflagehumus und des Mineralbodens, um die höhere Festigkeit der tieferliegenden, vom hohem Skelettgehalt geprägten Bodenschichten zu nutzen. Zum Ende der Untersuchungen musste für die Vorführung der Traktionsmessungen mit der Bremswinde im Rahmen der KWF-Tagung 2008 ein Kunststoffseil auf Basis von Dyneema-Fasern verwendet werden. Der Wechsellaufwand zurück zum Stahlseil wäre danach sehr hoch gewesen, sodass insgesamt fünf Versuchsserien mit dem DynaForce®-Seil durchgeführt wurden. Dieses weist jedoch nach der erfolgten Erstdehnung ein mit dem Stahlseil vergleichbares Versuchsverhalten auf, weshalb auf eine getrennte Auswertung verzichtet werden kann.

5.2.4 Bodenparameter

5.2.4.1 Volumetrischer Bodenwassergehalt

Im Anschluss an die Fahrversuche wurde für jede Testserie der volumetrische Bodenwassergehalt mit Hilfe einer TDR-Sonde bestimmt. Die Messungen erfolgten dabei zufällig verteilt im Bereich der befahrenen Spuren, sodass sich der angegebene Wassergehaltswert für jede Versuchsserie aus durchschnittlich acht bis zehn Einzelmesswerten berechnet. Der resultierende Mittelwert wird durch die metrische Variable *Feuchte* im Datensatz abgebildet. Nur wenige Wassergehaltswerte sind doppelt vertreten, sodass über 60 verschiedene Werte vorkommen. Für den Überblick über die Daten genügt jedoch eine Grobeinteilung in Gruppen (der genaue Informationsgehalt der einzelnen Werte ist nicht entscheidend). Tabelle V, 12 im Anhang zeigt die Einteilung der Bodenfeuchten in 10 % Schritten und deren Verteilung auf die Versuchsserien und die zwei verschiedenen Versuchsteile. Der überwiegende Teil der Versuche wurde bei Wassergehalten zwischen 20 % und 50 % durchgeführt. Werte darüber und darunter sind jeweils nur einmal im Datensatz vertreten. Für einige Messfahrten war die Bestimmung der Feuchte nicht möglich, sodass sechs Versuchsserien ohne diese Angaben als fehlende Werte eingehen. Hierzu zählen insbesondere die Messdaten der Vorversuche, da zu diesem Zeitpunkt die erforderliche Messtechnik noch nicht zur Verfügung stand.

Über die Hälfte der Bodenwassergehaltswerte entfallen auf den Bereich zwischen 30 und 40 %. Die hohe Bedeutung dieses Feuchtebereichs zeigt sich sowohl für die Traktions- als auch für die Schlupfmessungen in Hanglagen. Letztere wurden zu über 70 % in diesem Wassergehaltsbereich durchgeführt. Mögliche Ursache für die geringe Anzahl an Hangversuchen bei höherer Bodenfeuchte ist die subjektive Vorauswahl vor dem Hintergrund des deutlich schlechteren Traktionsverhaltens und somit der Gefahr des Festfahrens. Für die Traktionsmessungen spielt dieser Aspekt eine geringere Rolle, sodass mehr Versuche auch bei höherem Bodenwassergehalt absolviert wurden.

5.2.4.2 Bodenart

In der Variablen *Bodenart* ist die Bodenartenuntergruppe der oberen 20 cm des Mineralbodens codiert. Die Zuordnung der Zahlen zu der jeweiligen *Bodenart* erfolgt von hohem Sandanteil hin zu höheren Schluff- und Tongehalten des Bodens. Bei der Variablen handelt es sich jedoch um eine nominalskalierte Größe, da anhand der Zahlen keine Rangfolge bestimmt oder Berechnungen durchgeführt werden können.

Insgesamt kommen zwölf verschiedenen Bodenartenuntergruppen vor (vgl. Tabelle V, 13 im Anhang). Dabei muss beachtet werden, dass die zwei Bodenvarianten der Vorversuche nicht eindeutig angesprochen wurden, sondern eher einer groben Zuordnung entsprechen. Die übrigen zehn Ausprägungen sind hingegen während der Hauptversuche befahren worden. Das Spektrum der Bodenarten reicht von schwach lehmigem Sand bis zu stark tonigem Schluff und weist für alle Varianten eine Bedeutung lehmiger und schluffiger Bestandteile aus. Die mit Abstand am häufigsten vertretene *Bodenart* ist ein lehmiger Sand, der für 28 Versuchsserien (31,8 %) als Untergrund diente. Bezogen auf die Versuchsgassen - die doppelte Nutzung nicht mit betrachtet - sind dies immerhin noch 18 von insgesamt 60 befahrenen Rückegassen. Die nächst häufigste Untergruppe ist der schwach sandige Lehm, der für immerhin 14 Versuchsserien (15,9 %) den Untergrund bildete. Werden die *Bodenarten* in Gruppen zusammengefasst, so zeigt sich mit 43 der 88 Versuchsserien eine deutliche Dominanz der Sande, gefolgt von nahezu gleich häufig vorkommenden Lehmen (22 Versuchsserien) und Schluffen (21). Reduziert auf die Schlupfmessungen in Hanglagen wird deutlich, dass keine der befahrenen Gassen den Schluffen zugeordnet ist, während die übrigen Bodenarten hier keine größeren Besonderheiten in der Verteilung aufweisen. Der Vergleich zwischen der Verteilung bezogen auf die Versuchsserien und die Versuchsgassen zeigt auch nur geringe Differenzen, sodass die Versuche das Spektrum der vorgefundenen Bodenarten recht gleichmäßig abdecken.

5.2.4.3 Skelettanteil

Bereits während der laufenden Versuche offenbarten sich deutliche Unterschiede im Skelettgehalt der befahrenen Oberböden. Im Rahmen der nachträglichen Standortaufnahme wurde der *Skelettanteil* der verschiedenen Bodenschichten bestimmt und in der gleichlautenden Variablen abgebildet, die den Skelettgehalt der oberen 20 cm des Mineralbodens beschreibt. Ähnlich dem Wassergehalt des Oberbodens wird diese Variable nicht für die einzelnen Werte dargestellt, sondern in 5 %-Schritten klassifiziert. In Tabelle V, 14 (siehe Anhang) sind die Häufigkeiten der sechs verschiedenen Skelettgehaltsklassen für die Versuchsserien und die Versuchsgassen dargestellt. Dabei wird deutlich, dass je nach Betrachtungsgrundlage ca. die Hälfte der Versuche auf skelettfreiem Untergrund erfolgten. Auffällig hohe Skelettanteile über 20 % sind hingegen selten, sowohl bezogen auf Testserien selbst, als auch auf die vorgefundenen Versuchsgassen. Bei den Untergründen mit sehr hohen Skelettanteilen handelt es sich um geschobene Rückewege im Forstamt Lauterberg, sodass diese Werte nur eine geringe Bedeutung für die Analyse gewachsener Bodenstrukturen haben. Die skeletthaltigen Untergründe aus natürlicher Entstehung weisen demgegenüber vorwiegend (27,2 %) Skelettbeimischungen bis 10 % auf. Bezogen auf die Unterschiede zwischen den Bodenbedingungen während der Traktionsmessungen und der Vergleichsfahrten in Hanglagen sind nur geringe Differenzen zu erkennen. So wurden auffällig wenige Schlupfmes-

sungen bei Skelettanteilen zwischen 5 % und 10 % durchgeführt, wohingegen die etwas höhere Skelettanteilsklasse stärker besetzt ist als für die Traktionsmessungen.

5.2.4.4 Humusvorkommen

Für einen Teil der Versuchsgassen wurden auffällig geringe Humusaufgaben oder das komplette Fehlen einer Streuauflage festgestellt. Um mögliche Auswirkungen in die Analyse einbeziehen zu können, sind die unterschiedlichen Humusvorkommen in der gleichnamigen ordinalskalierten Variablen *Humusvork* codiert. Dabei sind drei verschiedene Ausprägungen der Variablen möglich (siehe Tabelle V, 15 im Anhang). Lediglich sechs Versuchsserien (6,8 %) erfolgten demnach auf Böden ohne erkennbare Humusaufgabe und weitere 4 Serien bei geringer Bedeckung des Mineralbodens. Bei den entsprechenden Versuchsgassen handelt es sich zum Teil um die geschobenen Rückewege im Forstamt Lauterberg bzw. um Flächen mit einer sehr guten Streuzersetzung. Der weit überwiegende Teil der Versuche (84,1 %) jedoch ist durch eine deutliche Humusaufgabe gekennzeichnet.

5.2.4.5 Humusform

Ein weiterer Faktor zur Beschreibung der Bodenvoraussetzungen während der Versuche ist die *Humusform*, welche ebenfalls bei der nachträglichen Standortaufnahme bestimmt wurde. Da für einige Versuchsgassen keine Humusaufgabe zu verzeichnen war, erfolgte die Bestimmung der *Humusform* für diese Bereiche in unmittelbarer Nähe zu den befahrenen Rückegassen. Die Häufigkeiten der unterschiedlichen Humusformen (siehe Tabelle V, 16 im Anhang) zeigen eine besondere Bedeutung des typischen Moders für die befahrenen Bereiche. So sind die Hälfte der Versuchsserien sowie der Versuchsgassen durch die Humusform Moder geprägt. Erweitert um die etwas bessere Form des mullartigen Moders und die schlechteren moderbasierten Formen, werden über zwei Drittel der Versuchsflächen abgedeckt. Eine ebenfalls größere Bedeutung hat der F-Mull, der insgesamt knapp ein Viertel der Versuche ausmacht. Hierbei handelt es sich vorwiegend um Bestände mit Buchenbestockung und einem etwas geringeren Bestockungsgrad, der durch die höhere Sonneneinstrahlung eine beschleunigte Humusumsetzung ermöglicht. Die übrigen Humusformen werden durch den Rohhumus gebildet, der jedoch auf lediglich vier Versuchsgassen vorgefunden wurde. Die zugehörigen Bestände sind dabei mit Fichten bestockt beziehungsweise liegen auf einem staunassen Plateau, sodass der Mineralisierungsgrad hier deutlich reduziert ist.

5.2.4.6 Scherfestigkeit

Die Festigkeit des Oberbodens ist entscheidend für die Rollreibung und die übertragbaren Zugkräfte des Rückezugs. Eine Möglichkeit, die Festigkeit des Bodens zu bestimmen, sind Messungen der Scherfestigkeit. Im Rahmen einzelner (insgesamt sieben) Versuche sowie während der nachträglichen Standortaufnahme wurde die Scherfestigkeit innerhalb der Fahrspuren erfasst. Die Ergebnisse der nachträglichen Aufnahme aller Versuchsgassen sind in der Variable *SF_allg* angegeben. Die Werte der Variablen *SF_spez* geben die Messwerte zum Zeitpunkt der Traktionsmessungen an. Angesichts der Vielzahl an Werten erfolgt die Darstellung der Scherfestigkeitsmessungen anhand von 50 kPa breiten Klassen. Die Ergebnisse der nachträglichen Messungen

(*SF_allg*) sind in Tabelle V, 17 (siehe Anhang) für die sechs Gruppen bis 300 kPa dargestellt. Dabei sind die Klassen unter 50 kPa und über 200 kPa nur sehr gering besetzt, während fast drei Viertel der Messwerte zwischen 50 kPa und 150 kPa liegen. Scherfestigkeitsmessungen über 200 kPa kommen nur auf den Flächen der Traktionsmessungen vor. Für die Schlupfmessungen in Hanglagen ergibt sich demgegenüber eine leichte Tendenz zu niedrigeren Scherfestigkeiten des Oberbodens. Eine mögliche Ursache für diese Verschiebung ist in der geringeren Befahrungshäufigkeit der Hanglagen zu sehen.

Ebenfalls vergleichsweise geringe Messwerte sind bei den Messungen während der Traktionsmessungen zu verzeichnen. Das Spektrum der Scherfestigkeitsmesswerte reicht dabei von 36,3 kPa bis zu 88,4 kPa. Da die entsprechende Messapparatur erst zu Ende der Versuche beschafft wurde, konnte diese jedoch nur für sieben Versuchsserien eingesetzt werden. Zum Zeitpunkt der Versuche herrschte feuchtes Wetter mit entsprechend hohen Wassergehalten im Oberboden, was eine verringerte Scherfestigkeit bewirkt. Bei den trockeneren Bedingungen während der standörtlichen Aufnahme der Versuchsgassen sind die Messwerte dieser Bestände hingegen oftmals doppelt so hoch.

5.2.4.7 Probenummer

Für einen Teil der Versuchsgassen wurden während der Versuche Stechzylinderproben für eine Analyse der Korngrößenverteilung und der Wasserspannungskurve entnommen. Um die Ergebnisse dieser Untersuchungen für die Auswertung nach entscheidenden Einflussfaktoren nutzen zu können, erfolgt für jede Gasse die Angabe der Variable *Probenr.* Mit Hilfe der Stichprobennummer lässt sich durch die Umcodierung in neue Variablen der Ton-, Schluff- und Sandgehalt der befahrenen Versuchsgassen angeben. Für jede beprobte Gasse sind die Daten daher mit der resultierenden Korngrößenverteilung verschnitten. Insgesamt wurden 40 Stechzylinderproben entnommen. Durch die Doppelbeprobung von drei Versuchsgassen reduziert sich der Umfang der untersuchten Gassen jedoch auf 37. Die in den Versuchsdaten enthaltene Variable *Probenr* hat keinen erklärenden Charakter für das Traktionsverhalten, sondern dient lediglich der Datenaufbereitung.

5.2.4.8 Korngrößenverteilung

Die Angabe der Korngrößenverteilung aus der Stechzylinderanalyse erfolgt durch die drei an die Fraktionen angelehnten Variablen *Sand*, *Schluff* und *Ton*. Es handelt sich dabei jeweils um gravimetrisch bestimmte Prozentwerte. In Tabelle V, 18 im Anhang sind die Mittelwerte sowie deren Standardabweichung der drei Fraktionen angegeben, zusätzlich gibt die Tabelle Auskunft über die Verteilung der Anteile in 10 %-Schritten. Anhand der Mittelwerte wird deutlich, dass der Schluff die höchste Bedeutung für die befahrenen Rückegassen hat. So entfällt im Durchschnitt 54,5 % des Bodengewichts auf diese Fraktion. Auf den *Sand* kommen immerhin noch 29,3 %, und der für den *Ton* berechnete Mittelwert aus den 36 Beobachtungen beträgt 16,2 %. Die geringste Streuung weisen dabei die Tonanteile auf, während die höchste Standardabweichung für den *Sand* zu verzeichnen ist. Bezogen auf den Mittelwert beträgt der Variationskoeffizient für die Korngrößenfraktion *Sand* knapp 65 %, für *Schluff* lediglich 29 % und für *Ton* 48 %.

Die geringe Streuung der *Tonanteile* zeigt sich anhand der Verteilung auf die 10 % Anteilsschritte. Dabei sind die untersten drei Schritte bis 30 % jeweils sehr gleichmäßig besetzt, während lediglich für drei Gassen höhere Werte ermittelt wurden. Für die *Schlufffraktion* ändert sich das Bild deutlich, da die unteren Anteilsschritte (0 % - 30 %) gar nicht oder nur sehr vereinzelt vorkommen. Deutlich fallen zwei Messungen mit *Schluffanteilen* unter 20 % aus den übrigen Messwerten heraus. Verglichen mit den umliegenden Gassen der gleichen Bestände wird deutlich, dass es sich um sehr kleinräumige Unterschiede oder Ausreißer handeln muss, da diese deutlich höhere Schluffanteile von über 30 % aufweisen. Insgesamt zeigen 58 % der Versuchsgassen *Schluffgehalte* über 50 % und sogar ein Drittel weist Werte zwischen 60 % und 70 % auf. Der Schluff ist damit dominierend auf nahezu allen Versuchsgassen. Für den *Sandanteil* stellt sich das Bild weniger einheitlich dar. So sind über 60 % der Versuchsgassen mit *Sandgehalten* unter 30 % ausgestattet, aber für einige Flächen ergeben sich vereinzelt Werte bis zu 73 %.

5.2.4.9 Lagerungsdichte

Im Rahmen der Versuche wurde in der Fahrspur, zwischen den Fahrspuren sowie im ungestörten Bestand der Versuchsgassen eine Bodenprobe mit Hilfe eines Stechzylinders entnommen. Aufgrund des Stechzylindervolumens von 250 cm³ lässt sich anhand des darrtrockenen Gewichts die Lagerungsdichte bestimmen. Die resultierenden Daten der einzelnen Entnahmestellen werden den Messdaten durch die Variablen *Id_spur*, *Id_mitte* und *Id_bestand* vorangestellt. Für insgesamt 44 Versuchsgassen stehen die Informationen zur Trockendichte dieser Proben zur Verfügung. Üblicherweise werden die Trockendichten in drei Klassen eingeteilt (FINNERN, 1994). Da diese Einteilung jedoch eher auf landwirtschaftliche Flächen mit höheren Lagerungsdichten ausgerichtet ist, werden die Ergebnisse (vgl. Tabelle V, 19 im Anhang) in Anlehnung an die fünfstufige Aufteilung von TEPPE ET AL. (2003) gegliedert. Dabei erfolgt eine weitere Unterteilung der unteren Lagerungsdichteklasse, um den Eigenheiten der forstlichen Standorte gerecht zu werden.

Die Lagerungsdichten der drei Entnahmepositionen unterscheiden sich deutlich. Die höchste mittlere Trockendichte von 1,3 g/cm³ ergibt sich dabei für die Fahrspur, gefolgt vom Bereich zwischen den Fahrspuren (1,1 g/cm³), während die geringsten Werte für den nahezu ungestörten Boden des Bestandes festgestellt wurden. Die Unterschiede werden durch die Verteilung auf die fünf Lagerungsdichteklassen nach TEPPE ET AL. (2003) bestätigt. Insbesondere für den Bestand werden beinahe die Hälfte der Versuchsgassen der unteren Klasse zugeordnet. Die Mitte der Rückegasse zeigt ähnliche Tendenzen mit einer hohen Besetzung der unteren Klassen. Demgegenüber sind für den Bereich der Fahrspur die mittleren Lagerungsdichteklassen am häufigsten vertreten. Hier ist der Einfluss der Befahrung auf die Trockendichte zu erkennen. Durch die hohen Auflasten kommt es zu einer Verdichtung, in deren Folge das Bodenvolumen reduziert wird.

5.3 Traktionsmessungen

5.3.1 Traktions-Schlupfkurven

5.3.1.1 Einführung

Nach der Datenbehandlung (s. Kap 4) lassen sich anhand der Messdaten die Traktionsbeiwerte über dem Schlupf darstellen. Die resultierenden Punktwolken für die verschiedenen Maschinenkonfigurationen und Bodenwassergehalte ähneln dem grundsätzlichen Verlauf, wie er bereits bei der Datenbehandlung dargestellt wurde. Die Unterschiede zwischen den Konfigurationen bzw. zwischen den einzelnen Versuchen und somit Bodenfeuchten lassen sich graphisch anhand der Traktions-Schlupf-Kurven darstellen. Angesichts der 57 Versuchsserien werden die Ergebnisse im Folgenden exemplarisch für jede Konfiguration an einem Beispiel dargestellt und die Besonderheiten der anderen Feuchte- bzw. Untergrundvarianten beschrieben (die übrigen Punktwolken finden sich im Anhang Abb. V,1-57). Die Berechnung der Ausgleichsfunktionen sowie die Darstellung erfolgt dabei nicht mit der Angabe des Schlupfs in Prozent, sondern als Verhältniszahl zwischen 0 und 1 (entspricht 100 % Schlupf). Dadurch wird die zahlenmäßige Darstellung der Regressionskoeffizienten in den nachfolgenden Tabellen verbessert. Für die weitere Berechnungen von Grenzneigungen kommen jedoch nicht die hier berechneten Ausgleichsmodelle zum Einsatz, sondern entsprechende Modelle auf Basis der reduzierten Ebenendaten (vgl. Kap. 4.4.3). Die im Folgenden dargestellten Punktwolken

5.3.1.2 Konfiguration 0

Für die Konfiguration 0, also Versuche mit gebrauchten Reifen bei einem Reifeninnendruck von 2,7 bar, bestehen insgesamt die meisten Variationen des Bodenwassergehalts und der Untergrundbedingungen. Das Spektrum der Wassergehalte reicht von 25,0 % bis zu 47,8 %. Für neun Versuchsserien ist dabei die Bodenfeuchte bekannt, während für die Messungen im Rahmen der Vorversuche in Wiegersen keine Wassergehalte ermittelt und diese daher nicht in die weitere Auswertung einbezogen werden konnten. Die Skelettgehalte in den oberen 20 cm des befahrenen Oberbodens variieren lediglich zwischen 0 % und 8 %.

Abbildung 25 zeigt die gemessenen Kombinationen aus Traktionsbeiwert und Schlupf bei 34,8 % Wassergehalt im Oberboden und einem Skelettgehalt von 4,6 %. Deutlich zu erkennen ist der anfangs steile Anstieg der Traktionsbeiwerte mit zunehmendem Schlupf der Antriebsräder, der ab Schlupfwerten von 20 % in einen flacheren Anstieg übergeht. Zwischen 60 % und 80 % Schlupf zeichnet sich ein Maximum der Traktionsbeiwerte ab, nach dessen Überschreitung teilweise fallende Werte erreicht werden. Insbesondere bei geringen Schlupfwerten streuen die Traktionsbeiwerte erheblich. So sind bei ca. 10 % Schlupf vereinzelt Traktionsbeiwerte bis zu 0,45 zu erkennen, während eine Vielzahl der Datenpunkte bei gleichem Schlupf Traktionsbeiwerte von Null und lediglich knapp darüber aufweist. Bei Schlupfwerten über 60 % erhöht sich die Streuung der Trak-

tionsbeiwerte durch einzelne Abbremsungen mit höheren Werten über 0,6. Im Vergleich zu den übrigen Varianten der Konfiguration zeigt Abbildung 25 jedoch ein engeres Streuungsbild.

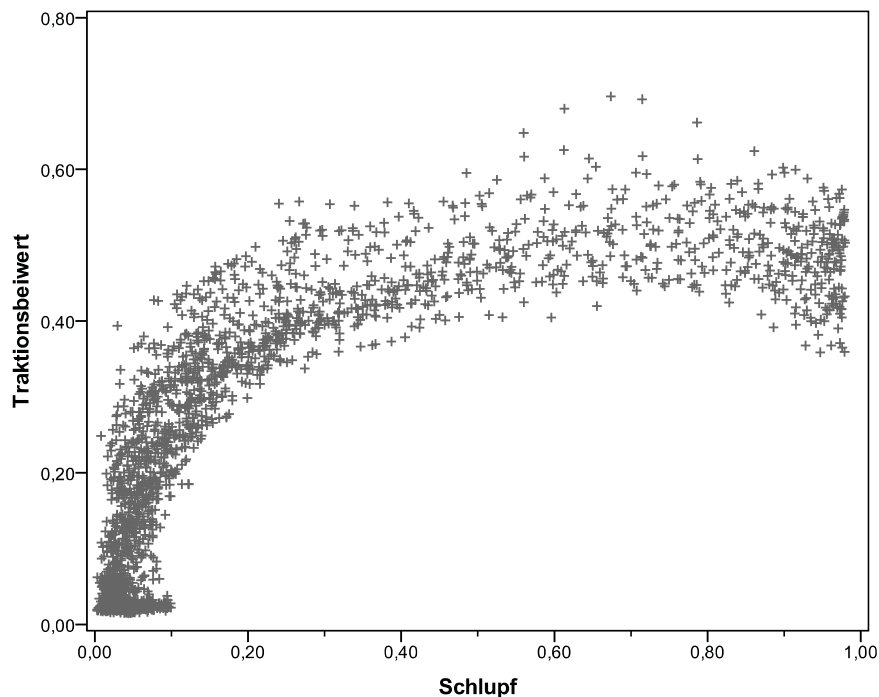


Abbildung 25: Punktwolke aus Sklupf und Traktionsbeiwert für die Konfiguration 0 bei 34,8 % Bodenwassergehalt

Ebenfalls eine deutlich reduzierte Streuung der Traktionsbeiwerte über dem Sklupf zeigt sich für die Variante mit einem Bodenwassergehalt von 43,5 % und einem Skelettanteil von 8 %. Demgegenüber weisen die Varianten bei über 39,5 % Wassergehalt sowie die Daten der Vorversuche in Wiegersen eine größere Variation der Messwerte auf. Für die Versuche in Wiegersen ist dies auf die nur teilweise mögliche Differenzierung zurückzuführen, während für die übrigen Varianten mit hoher Streuung diese in den höheren Bodenwassergehalten begründet liegen. Zudem zeigen sich deutliche Abweichungen der maximal erreichten Traktionsbeiwerte zwischen den einzelnen Varianten, die nicht ausschließlich durch die gemessenen Wassergehalte erklärt werden können. So weist bereits die Punktwolke für eine Bodenfeuchte von 27 % lediglich einige maximale Traktionsbeiwertmessungen über 0,5 auf, während bei höheren Wassergehalten teilweise Werte bis zu 0,6 erreicht werden. Insgesamt ergeben sich jedoch bei höheren Bodenfeuchten niedrigere Traktionsbeiwerte, sodass die Ergebnisse bei 27 % Wassergehalt eine Ausnahme darstellen und die Ursache für die vergleichsweise geringen Traktionsbeiwerte gefunden werden muss.

Weitere Auffälligkeiten sind für die Versuche bei 43,6 % und 46,5 % Bodenwassergehalt festzustellen. Die Punktwolken (Abb. V, 7+8 im Anhang) weisen entgegen den übrigen Varianten einen abweichenden Verlauf auf. So beginnen die Datenkombinationen bei auffällig höherem Sklupf und zeigen einen flacheren Anstieg der Traktionsbeiwerte über dem Sklupf. Daraus entsteht insbesondere für 46,5 % Wassergehalt der Eindruck eines nahezu linearen Anstiegs ohne deutliches Maximum.

Da ein Vergleich der verschiedenen Untergrundbedingungen und deren Auswirkungen auf das Traktionsverhalten nur schwer anhand der Punktwolken durchzuführen ist, erfolgt der lineare Ausgleich der Traktionsbeiwerte über dem Schlupf mit einem kubischen Modell. Neben einer Konstanten, die den Schnittpunkt der Ausgleichskurve mit der Ordinate beschreibt, dienen das lineare, quadratische und das kubische Glied der Anpassung des Kurvenverlaufs an die Entwicklung des Traktionsbeiwertes über dem Schlupf. Die quadrierten Schlupfwerte ermöglichen dabei die Beschreibung eines Maximums, wie es die meisten Punktwolken der Konfiguration 0 erkennen lassen. In Abbildung 26 sind die Punktwolke und die Ausgleichskurve für die bereits in Abbildung 25 gezeigten Daten dargestellt. Die Ausgleichskurve beschreibt den Verlauf der Punktwolke insgesamt recht gut, was auch anhand des Bestimmtheitsmaßes von 0,846 deutlich wird.

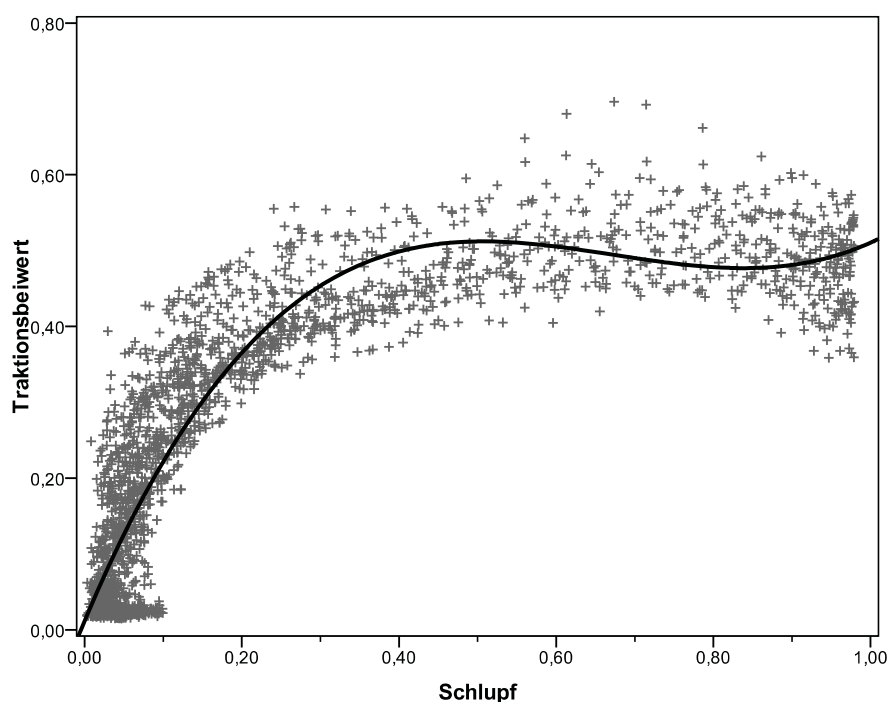


Abbildung 26: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei 34,8 % Bodenwassergehalt

Tabelle 3 zeigt die berechneten Koeffizienten des Ausgleichsmodells für alle Varianten der Konfiguration 0 sowie den resultierenden Prognosewert (Umrechnung des Traktionsbeiwertes in die Steigung vgl. Kap. 2.5) für eine mit 25 % Schlupf noch befahrbare Hangneigung. Die ermittelten Koeffizienten ähneln sich in Größe und Vorzeichen mit Ausnahme der Versuche bei einem Bodenwassergehalt von 46,5 % (grau hinterlegt). So fällt der Koeffizient b_1 vergleichsweise niedrig aus, während für die Werte b_2 und b_3 ein Wechsel des Vorzeichens im Vergleich zu den übrigen Varianten festzustellen ist. Zudem nimmt die Konstante (k) mit $-0,07$ einen überdurchschnittlich geringen Wert an.

Insgesamt zeigen die Bestimmtheitsmaße (R-Quadrat) der Ausgleichsfunktionen mit Werten zwischen 0,674 und 0,890 eine gute Übereinstimmung zwischen den Punktwolken und den berechneten Ausgleichen. Im Mittel beträgt das Bestimmtheitsmaß 0,769, sodass der 77 % der Gesamtvarianz des Traktionsbeiwertes durch die Variation des Schlupfes erklärt werden können. Ziel der

Ausgleichsmodelle ist neben der Beschreibung der Traktions-Schlupf-Beziehung die Prognose von befahrbaren Geländeneigungen bei noch akzeptablem Antriebsschlupf. Die letzte Spalte der Tabelle 3 gibt die resultierenden Prognosewerte aus den Modellen für einen Schlupf von 25 % an. Dabei zeigt sich eine breite Streuung der Vorhersagen zwischen 12 % und 43 % Hangneigung. Die höheren Werte werden vorwiegend bei geringeren Bodenfeuchten ermittelt, während bei höheren Wassergehalten im Oberboden eine Reduktion der noch befahrbaren Geländeneigungen erfolgt. Deutlich ist jedoch auch zu erkennen, dass die Punktwolken und damit die Ausgleichsmodelle keine eindeutige qualitative Abfolge erlauben, da der Einfluss des Wassergehalts im Oberboden teilweise durch andere Faktoren überlagert wird. Für das endgültige Prognosemodell müssen daher die unterschiedlichen Einflussfaktoren isoliert und deren Auswirkungen auf das Traktionsverhalten analysiert werden (s. Kap. 5.4.2).

Tabelle 3: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit der Konfiguration 0 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf ≤ 25 %

Bodenwasser- gehalt (%)	Skelettanteil (%)	Anzahl (N)	Regressionskoeffizienten				R ²	kalkulatorische Grenzneigung (%)
			k	b1	b2	b3		
25,0	3,5	2.015	0,023	2,152	-2,497	0,830	0,715	41,8
27,0	0	3.451	0,032	1,405	-1,843	0,787	0,763	28,0
32,2	7,5	252	0,059	2,139	-2,889	1,157	0,780	43,1
34,8	4,6	2.208	0,012	2,473	-3,915	1,941	0,846	41,6
39,5	0	1.935	0,018	1,795	-2,678	1,309	0,722	31,9
43,5	8,0	2.385	-0,036	1,891	-2,231	0,832	0,890	31,0
43,6	0	3.343	-0,022	1,273	-1,173	0,351	0,863	22,8
46,5	0	2.132	-0,066	0,780	-0,042	-0,273	0,754	12,3
47,8	0	2.497	0,019	1,040	-0,937	0,255	0,674	22,5
999	999	1.555	0,036	1,278	-1,291	0,363	0,775	28,0
999	999	255	0,091	1,117	-1,563	0,764	0,726	28,4
999	999	1.681	-0,008	1,359	-1,188	0,175	0,720	26,0
999	999	1.485	-0,024	1,491	-1,155	0,053	0,769	27,8

5.3.1.3 Konfiguration 1

Konfiguration 1 bezeichnet jene Versuche, die mit Ketten und Bändern auf den gebrauchten Rädern durchgeführt wurden. Der Reifeninnendruck bei diesen Versuchen entspricht mit 2,7 bar der Standardvariante (Konfiguration 0). Insgesamt stehen fünf Wassergehaltsvarianten für die Auswertung zur Verfügung. Das Spektrum der Werte reicht von 20,5 % bis zu 51,4 %, wobei der Datenumfang bei der höchsten Bodenfeuchte mit lediglich 274 Datensätzen sehr gering ausfällt. Für die Versuche bei 20,5 % und 27,8 % Bodenwassergehalt kommen keine Skelettanteile im Oberboden vor, während die übrigen Varianten 1,5 % (46,7 % Wassergehalt) oder 4 % bzw. 4,25 % (32,1 % Wassergehalt) Skelettanteil aufweisen.

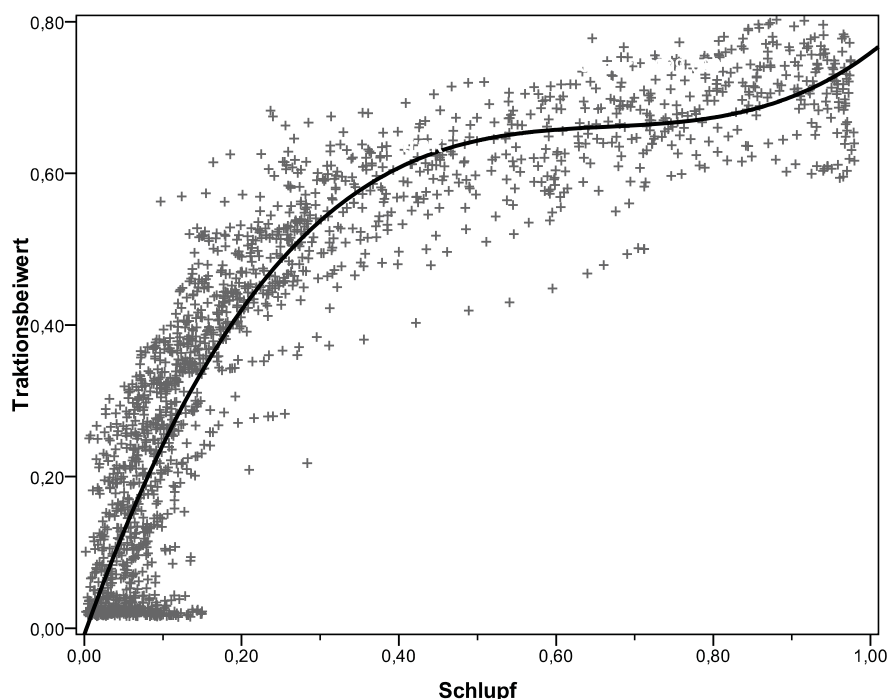


Abbildung 27: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 1 bei 32,1 % Bodenwassergehalt

Stellvertretend für die Punktwolken aus Traktionsbeiwert und Schlupf für die Konfiguration 1 sind in Abbildung 27 die Ergebnisse sowie die berechnete Ausgleichsfunktion der Messungen bei einem Bodenwassergehalt von 32,1 % und einem Skelettanteil von 4,25 % dargestellt. Die Traktionsbeiwerte steigen bei geringem Schlupf stark an, um ab ca. 30 % Schlupf in einen flacheren, aber stetigen Anstieg überzugehen. Dabei zeigen die Daten kein deutliches Maximum der Traktionsbeiwerte über dem Schlupf, sondern lassen allenfalls einen leichten Abfall der Werte kurz vor der Durchdrehgrenze erkennen. Auch die Punktwolken der übrigen Wassergehaltsvarianten folgen dem dargestellten Verlauf mit einem anfangs steilen bei zunehmendem Schlupf flacheren Anstieg der Traktionsbeiwerte über dem Schlupf. Deutliche Maxima der Werte zeichnen sich dabei im Gegensatz zur Standardvariante nicht ab. Neben dem Verlauf ist auch die geringe Streuung der Punktwolken charakteristisch für die Konfiguration 1.

Tabelle 4: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit der Konfiguration 1 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf $\leq 25\%$

Bodenwasser- gehalt (%)	Skelettanteil (%)	Anzahl (N)	Regressionskoeffizienten				R ²	kalkulatorische Grenzneigung (%)
			k	b1	b2	b3		
20,5	0	2.505	0,039	2,493	-3,271	1,541	0,864	48,2
27,8	0	1.859	0,045	2,526	-3,577	1,694	0,827	47,9
32,1	4,25	1.795	-0,008	2,914	-4,299	2,152	0,865	48,5
48,1	4	1.816	-0,034	2,267	-3,145	1,536	0,841	36,0
51,4	4	274	-0,044	2,061	-2,620	1,202	0,851	32,7

In Tabelle 4 sind die Varianten und deren Ausgleichsfunktionen dargestellt, sowie eine Prognose für die befahrbare Hangneigung bei 25 % Schlupf. Die Koeffizienten der kubischen Ausgleichsmodelle sind zwischen den Varianten sehr ähnlich. So sind die Koeffizienten b1 und b3 immer positiv, während der Koeffizient b2 mit negativen Werten zwischen $-2,62$ und $-4,30$ die bereits aus der Standardvariante bekannte umgekehrte Parabelform mit einem Maximum einbringt. Ein Blick auf die Ausgleichsmodelle (auch in Abb. 27) zeigt, dass der Effekt jedoch vielfach durch das kubische Glied überlagert und so insgesamt ein steigender Verlauf mit einem eventuellen Sattelpunkt beschrieben wird. Die ermittelten Konstanten der Ausgleichsmodelle sind mit Werten zwischen $-0,04$ und $0,05$ vergleichsweise niedrig. Die Tendenz zur Abnahme der y-Achsenabschnitte mit zunehmendem Wassergehalt des Oberbodens wird dabei nur durch sehr ähnliche Konstantenwerte der unteren beiden Bodenfeuchten unterbrochen. Gegenüber den übrigen Konfigurationen sind insgesamt deutlich geringere Streuungen der Traktionsbeiwerte über dem Schlupf zu verzeichnen, so dass sich vergleichsweise höhere Bestimmtheitsmaße zwischen $0,827$ und $0,865$ ergeben.

Anhand der Ausgleichsfunktion wird der in der letzten Spalte der Tabelle 4 angegebene Prognosewert berechnet. Bei 25 % akzeptiertem Schlupf folgen daraus bodenökologisch vertretbare Neigungen zwischen $32,7\%$ und $48,5\%$. Mit zunehmendem Wassergehalt des Oberbodens zeigt sich die erwartete Reduktion des Prognosewertes.

5.3.1.4 Konfiguration 2

Die Ausstattung des Rückezugs mit neuen Reifen und dem Standardreifeninnendruck von $2,7$ bar entspricht der Konfiguration 2. Da diese alternative Bereifung erst zum Ende des Jahres 2007 durch den Hersteller geliefert werden konnte, ist die Anzahl der Bodenwassergehaltsvarianten im Vergleich zur Standardvariante geringer, und zudem konnte aufgrund der herrschenden Witterungsverhältnisse nur eine Varianten bei sehr trockenem Boden bemessen werden. Das Spektrum der acht verschiedenen Oberbodenwassergehalte reicht von $23,7\%$ bis $42,1\%$. Lediglich zwei der Versuchsserien sind bei skeletthaltigem Untergrund durchgeführt worden, wobei Skelettgehalte von 7% und $7,5\%$ festgestellt wurden.

Für diese beiden Varianten sowie für die Messungen bei $23,7\%$ Wassergehalt im Oberboden ergibt sich ein ähnlicher Kurvenverlauf wie für die bestehende Altbereifung der Versuchsmaschine. Die Traktionsbeiwerte steigen anfangs mit zunehmendem Schlupf deutlich, um bei höherem

Schlupf in einen flacheren Anstieg mit undeutlichem Maximum überzugehen. Demgegenüber zeigen die Punktwolken der übrigen Varianten der Konfiguration 2 auf skelettfreiem Untergrund einen ähnlichen Verlauf, wie in Abbildung 28 für einen Wassergehalt von 37,6 % dargestellt. Damit unterscheiden sich die Punktwolken deutlich von bisher erzielten Ergebnissen der Konfigurationen 0 und 1. Der Anstieg der Traktionsbeiwerte über dem Schlupf erfolgt sichtlich flacher und nimmt bis zum „Durchdrehen“ der Antriebsräder zu. Für Schlupfwerte bis ca. 20 % stellt sich der Anstieg etwas steiler dar, erreicht jedoch nur Traktionsbeiwerte von etwas über 0,25. Die meisten Punktwolken mit diesem Verlauf zeigen zudem eine deutliche Streuung der Messwerte, sodass für einen Schlupfwert ein weiter Bereich von Traktionsbeiwerten gemessen wurde.

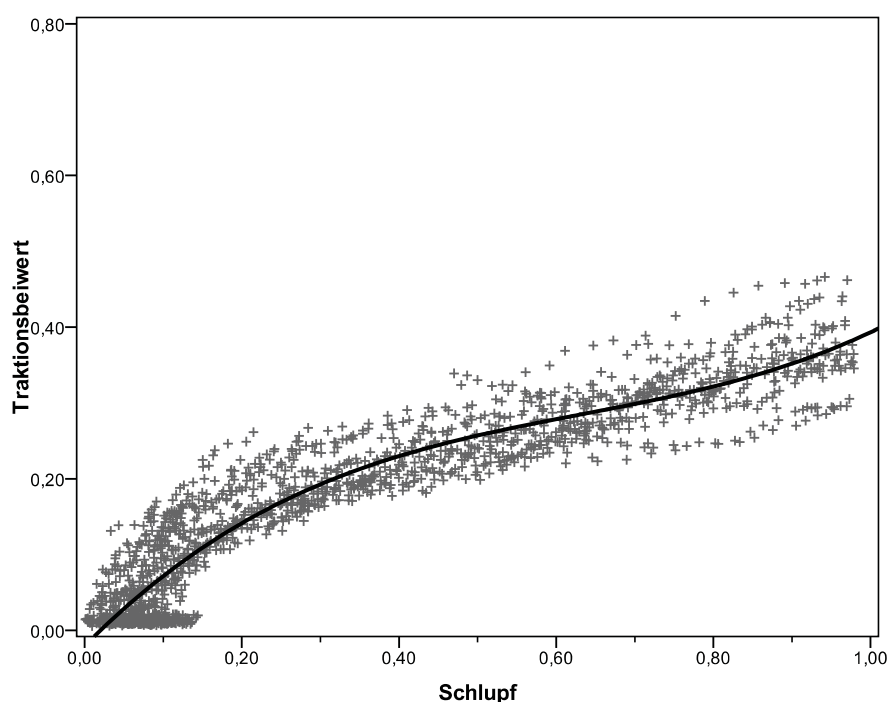


Abbildung 28: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 2 bei 37,6 % Bodenwassergehalt

Der Eindruck eines gleichmäßigen Anstiegs für die Versuchsserien mit einem der Abbildung 28 ähnlichen Verlauf der Punktwolke wird durch die Regressionsergebnisse in Tabelle 5 gestützt. Die Varianten verfügen über vergleichsweise geringe Koeffizientenwerte b_1 bis b_3 , wodurch der Einfluss des quadratischen sowie des kubischen Ausgleichsgliedes reduziert und die Bedeutung des Koeffizienten b_1 , der den linearen Anstieg bewirkt, erhöht wird. Für alle Varianten ohne Skelettanteile im Oberboden, mit Ausnahme des Versuchs bei 23,7 % Wassergehalt, ergeben sich geringe bzw. negative Konstantenwerte. Letztere bewirken, dass bereits für geringste Fahrwiderstände in der Ebene Schlupf der Antriebsräder erforderlich scheint. Der sichtliche Unterschied zwischen den grau hinterlegten Varianten und den übrigen fünf Versuchsserien führten zu deutlichen Unterschieden der resultierenden Ausgleichsmodelle. Neben dem steileren Anstieg durch die höheren Koeffizienten b_1 weisen die grau hinterlegten Messungen einen höheren Betrag für b_2 auf. Durch die entsprechende Zusammensetzung der Koeffizienten ergibt sich daher ein steilerer Anstieg des Ausgleichs sowie die Beschreibung eines lokalen Maximums innerhalb des Schlupfbereichs

zwischen 0 % und 100 %. Trotz der zwei unterschiedlichen Ausgleichsformen führen die Regressionskurven zu guten Beschreibungen der Punktwolken. Die ermittelten Bestimmtheitsmaße liegen im Rahmen der Ergebnisse für die Standardkonfiguration mit alten Reifen beim Standardreifeninnendruck.

Tabelle 5: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit der Konfiguration 2 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf ≤ 25 %

Bodenwasser- gehalt (%)	Skelettanteil (%)	Anzahl (N)	Regressionskoeffizienten				R ²	kalkulatorische Grenzneigung (%)
			k	b1	b2	b3		
23,7	0	1.724	0,051	2,512	-3,913	1,945	0,765	46,5
33,4	0	452	-0,016	0,919	-1,007	0,622	0,670	16,0
36,9	7,5	1.909	0,044	2,058	-2,837	1,249	0,771	40,1
37,0	0	515	-0,018	0,690	-0,201	-0,039	0,838	14,2
37,6	0	1.751	-0,021	1,052	-1,348	0,710	0,899	16,9
38,8	7,5	2.041	0,064	1,902	-2,617	1,197	0,786	39,5
41,0	0	435	0,028	0,924	-1,276	0,765	0,756	19,2
42,1	0	2.121	0,017	0,920	-0,783	0,304	0,841	20,3

Das uneinheitliche Bild der Messungen mit neuen Reifen bei dem Standardreifeninnendruck wird durch die Prognosewerte bestätigt. Für die Versuchsserien mit flachem und konstantem Anstieg der Traktionsbeiwerte ergeben sich Neigungsangaben zwischen 14,2 % und 20,3 %, während die übrigen drei Varianten (grau hinterlegt) Neigungen von bis zu 46,5 % als befahrbar erscheinen lassen. Der Unterschied im Datenkollektiv zwischen den fünf Varianten mit geringen Prognosewerten und jenen mit höheren Angaben setzt sich bei der nachvollziehbaren Wirkung steigender Bodenwassergehalte fort. Während die drei in Tabelle 5 grau hinterlegten Messreihen den erwarteten negativen Einfluss des Wassergehalts auf das Befahren von Steigungen zeigen, ist für die übrigen Versuche kein Einfluss bzw. sogar ein umgekehrter Effekt zu erkennen.

5.3.1.5 Konfiguration 3

Lediglich eine Versuchsserie bei 25,1 % Bodenwassergehalt steht für die Konfiguration 3 zur Verfügung. Während der Versuche war der Rückezug mit den alten Reifen bei regulärem Reifeninnendruck ausgestattet und es befanden sich Gleitschutzketten auf den mittलगelenkseitigen Rädern des vorderen Bogies. Da die Versuchsserie im Forstamt Reinhausen durchgeführt wurde, erfolgten die Fahrten auf Flächen ohne messbare Skelettanteile in den oberen Bodenschichten.

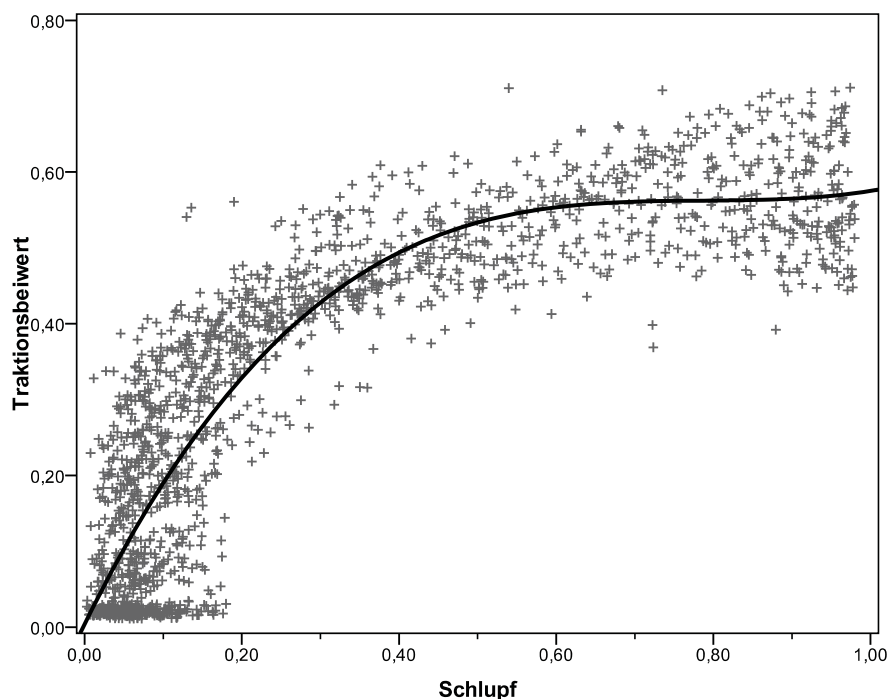


Abbildung 29: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 2 bei 37,6 % Bodenwassergehalt

Abbildung 29 zeigt die Punktwolke und die Ausgleichskurve für die Zugkraftmessungen mit Ketten. Der Kurvenverlauf beginnt mit einem steilen Anstieg der Traktionsbeiwerte bis zu einem Schlupf von ca. 20 % und wechselt darüber in einen flachen Verlauf ohne erkennbares Maximum. Dabei werden die Schwierigkeiten eines Ausgleichs der Messwerte deutlich, da die Ausgleichskurve den steilen Anstieg flacher wiedergibt und insbesondere zwischen knapp 20 % und 40 % Schlupf eine Unterschätzung der Traktionsbeiwerte bewirkt. Daraus resultiert ein Prognosewert von 38 % Hangneigung bei 25 % Schlupf. Trotz der Schwierigkeit den steilen Anstieg abzubilden, ergibt sich mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,809 eine gute Anpassung an die Messdaten.

Tabelle 6: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit der Konfiguration 3 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf ≤ 25 %

Bodenwassergehalt (%)	Skelettanteil (%)	Anzahl (N)	Regressionskoeffizienten				R ²	kalkulatorische Grenzneigung (%)
			k	b1	b2	b3		
25,1	0	1.728	0,004	2,114	-2,678	1,135	0,809	38,3

5.3.1.6 Konfiguration 4

Mit Bändern auf dem hinteren Bogie des Ruckezuges wurden Traktionsmessungen bei sieben verschiedenen Bodenwassergehalten durchgeführt. Der maximale Wassergehalt im Oberboden während der Versuchsfahrten betrug dabei 35 % und der geringste lediglich 18,7 %. Für eine der Versuchsserien steht keine Information zum volumetrischen Bodenwassergehalt (Tabelleneintrag „999“) zur Verfügung. Mit Ausnahme der Messungen bei 32,2 % Bodenfeuchte und einem Skelettgehalt von 7,5 % war der Untergrund skelettfrei. Die befahrenen Untergründe teilen sich gleichmäßig auf die Humusformen F-Mull und Moder auf. Während vier der Böden durch hohe Sandgehalte geprägt sind, werden die verbleibenden zwei eher den tonigen Substraten zugeordnet.

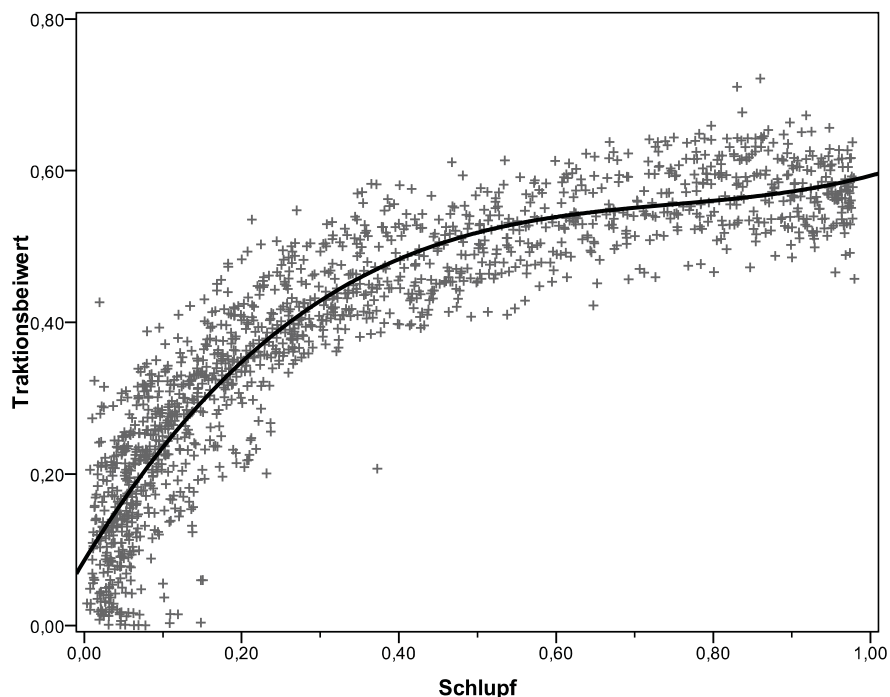


Abbildung 30: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 4 bei 27,6 % Bodenwassergehalt

In Abbildung 30 sind die Kombinationen aus Schlupf und Traktionsbeiwert für einen Bodenwassergehalt von 27,6 % dargestellt. Die Punktwolke steigt mit zunehmendem Schlupf anfangs steil an, um ab knapp 20 % Schlupf flacher zu werden. Selbst bei sehr hohen Schlupfwerten zeigt sich kein Maximum der Traktionsbeiwerte. Lediglich für die Messwerte bei 28,1 % Bodenwassergehalt lässt sich ein Abfall der Traktion bei höherem Schlupf erkennen, während die übrigen Punktwolken der beispielhaften Abbildung 30 folgen. Die dargestellten Daten weisen einen vergleichsweise dichten Zusammenhalt der Punktwolke auf, wie er für nahezu alle Varianten mit Traktionshilfsmitteln typisch ist. Eine Ausnahme hierzu bilden die Messwerte bei einem Wassergehalt von 35 %, die angesichts einer geringen Datenmenge und hoher Traktionsbeiwerte bis zu 0,83 eine geringfügig größere Streuung aufweisen. Die insgesamt geringen Variationen innerhalb der Datensätze werden durch die für alle Wassergehaltsvarianten hohen Bestimmtheitsmaße der kubischen Ausgleichsmodelle bestätigt. Wie auch in Abbildung 30 zu erkennen ist, zeigen einige Ausgleichsmodelle

delle bereits im Bereich bis 100 % Schlupf einen deutlich kubischen Verlauf mit einem lokalen Maximum sowie einem lokalen Minimum gefolgt von einem erneuten Anstieg des Ausgleichs.

Tabelle 7: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit der Konfiguration 4 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf ≤ 25 %

Bodenwasser- gehalt (%)	Skelettanteil (%)	Anzahl (N)	Regressionskoeffizienten				R ²	kalkulatorische Grenzneigung (%)
			k	b1	b2	b3		
18,7	0	346	0,099	1,800	-2,585	1,300	0,799	40,8
27,6	0	1.516	0,086	1,699	-2,145	0,954	0,860	39,1
28,1	0	3.180	0,069	1,674	-1,886	0,712	0,806	38,1
29,9	0	2.345	0,025	1,931	-2,299	0,916	0,858	37,9
32,2	7,5	1.707	0,039	2,788	-4,435	2,266	0,811	49,5
35,0	0	856	0,063	1,842	-2,144	0,826	0,790	40,2
999	0	553	0,099	2,200	-2,654	1,073	0,753	50,0

Tabelle 7 zeigt die sieben Versuchsvarianten und die Koeffizienten der berechneten Ausgleichsfunktionen. Die Vorzeichen der Koeffizienten sind dabei für alle Varianten gleich, während sich betragsmäßig Unterschiede erkennen lassen. Am deutlichsten fallen die für alle Koeffizienten geringsten Werte bei 28,1 % Bodenwassergehalt auf. Die Auswirkungen auf den Prognosewert sind jedoch gering. Für die ersten vier Versuchsserien der Tabelle 7 zeigen sich nur geringen Unterschiede durch die Wassergehalte, die allerdings die Tendenz fallender Neigungen für zunehmende Bodenfeuchte bestätigen. Angesichts der geringen Datengrundlage für 35 % Wassergehalt kann davon ausgegangen werden, dass sich diese ebenso in die Reihenfolge der skelettfreien Untergründe einordnet. Demgegenüber ergeben sich für die Variante mit Skelettbeimischung im Oberboden und die Serie ohne Angabe des Wassergehalts deutlich höhere Neigungsangaben. Als Ursache ist zum einen der Skelettgehalt zu betrachten und zum anderen der geringe Datenumfang.

5.3.1.7 Konfiguration 5

Konfiguration 5 bezeichnet die Ausrüstung der Versuchsmaschine mit gebrauchten Reifen und einem reduzierten Reifeninnendruck von 1,5 bar. Ursprung dieser Versuchsvariante sind die Erfahrungen von HITTENBECK (2004), die einen Anstieg der Zugkräfte und damit der befahrbaren Neigungen bei reduziertem Reifenfülldruck erwarten lassen. Insgesamt wurden sieben Versuchsserien bei unterschiedlichen Wasser- und Skelettgehalten des Oberbodens durchgeführt. Die vorgefundenen Bedingungen reichten von 23 % bis zu 45,8 % Bodenwassergehalt. Neben zwei skelettfreien Standorten wurde das Traktionsverhalten auf fünf Oberböden mit Skelettgehalten bis zu 8,25 % untersucht.

Exemplarisch für die Messergebnisse bei reduziertem Reifeninnendruck ist in Abbildung 31 die Punktwolke für einen Wassergehalt von 45,8 % dargestellt. Mit Ausnahme der Versuche bei 32,1 %, 36,5 % und 43,9 % Bodenwassergehalt (jeweils grau hinterlegt) ähneln die Punktwolken dem abgebildeten Datenverlauf mit einem anfangs steilen Anstieg der Traktionsbeiwerte, der ab ca. 20 % Schlupf flacher wird und im Bereich um 80 % Antriebsschlupf ein Maximum aufweist.

Für die Varianten bei 23,0 % und 35,7 % Bodenwassergehalt sind etwas höhere Traktionsbeiwerte zu verzeichnen, während bei 32,1 % und 36,5 % auffällig geringe Traktionsbeiwerte gemessen wurden. Letztere gehören zu den drei Versuchsserien mit auffällig veränderter Punktwolke. Diese ähneln dem in Abbildung 31 für die Konfiguration 2 gezeigten Verlauf der Punktwolke aus Traktionsbeiwerten und Schlupf mit einem flachen Anstieg und einer Verschiebung der Daten zu höheren Schlupfwerten bereits bei geringen Traktionsbeiwerten.

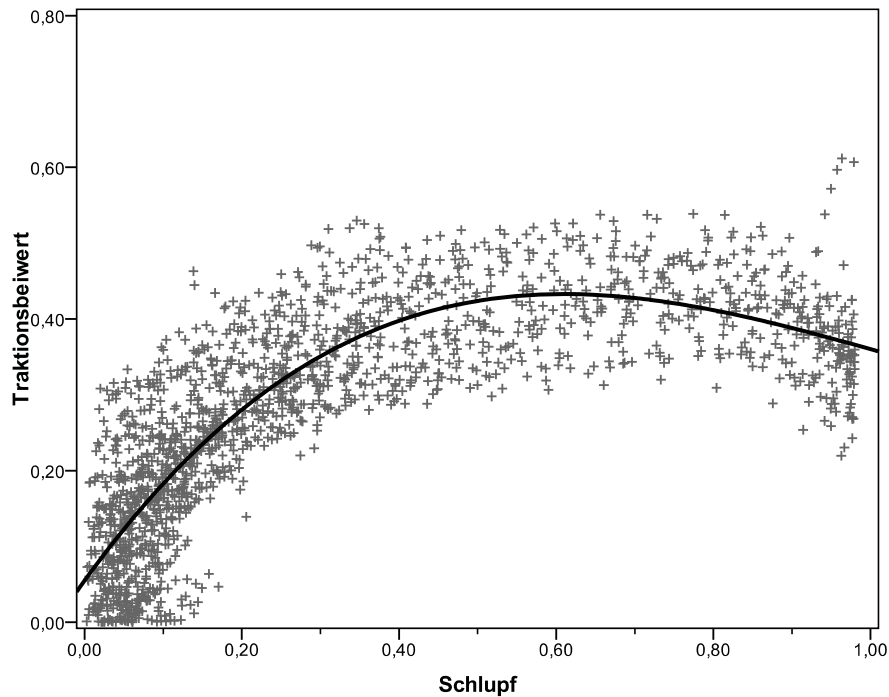


Abbildung 31: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 5 bei 45,8 % Bodenwassergehalt

Die Auffälligkeiten der Punktwolken zeigen sich auch anhand der in Tabelle 8 veränderten Koeffizienten für den kubischen Ausgleich der betroffenen Varianten. Alle drei grau hinterlegten Varianten verfügen über sehr geringe Koeffizientenwerte für b_2 und b_3 , sodass der Ausgleich vorwiegend durch den linearen Anstieg der Traktionsbeiwerte über dem Schlupf bestimmt wird. Die übrigen Varianten zeigen demgegenüber negative Werte für den Koeffizienten b_2 zwischen $-1,82$ und $-2,95$, während der Koeffizient b_3 deutlich höhere Werte annimmt. Anhand des Ausgleichs ergibt sich eine große Variabilität der Prognosewerte für eine noch bodenverträglich befahrbare Geländeneigung. Diese reicht von 15,2 % für einem Bodenwassergehalt von 43,9 % bis zu 50,4 % bei sehr trockenem Oberboden. Unter Ausschluss der auffälligen Varianten (grau) zeigt sich eine deutliche Abnahme der Hangneigungen bei zunehmender Bodenfeuchte für die skeletthaltigen Böden.

Tabelle 8: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit der Konfiguration 5 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf $\leq 25\%$

Bodenwassergehalt (%)	Skelettanteil (%)	Anzahl (N)	Regressionskoeffizienten				R ²	kalkulatorische Grenzneigung (%)
			k	b1	b2	b3		
23,0	7,5	1.572	0,075	2,544	-3,740	1,728	0,773	50,4
25,9	0	388	0,086	1,510	-2,337	1,257	0,814	33,7
32,1	0	2.132	0,011	0,889	-0,852	0,296	0,858	18,5
35,7	8,25	2.776	0,017	2,158	-3,079	1,365	0,798	38,6
36,5	3	2.350	0,097	0,894	-0,739	0,147	0,789	27,7
43,9	4,6	2.392	-0,096	1,186	-0,832	0,243	0,813	15,2
45,8	7,5	1.798	0,055	1,440	-1,674	0,539	0,725	31,9

5.3.1.8 Konfiguration 6

Der Einfluss des Reifeninnendruckes wird auch bei der alternative Neubereifung berücksichtigt, und so stellt Konfiguration 6 die Versuche mit neuen Reifen und dem reduzierten Fülldruck von 1,5 bar dar. Das Spektrum der sechs untersuchten Bodenwassergehalte fällt dabei vergleichsweise gering aus. Durch die feuchten Witterungsbedingungen des Jahreswechsels 2007/2008 und das ebenfalls feuchte darauffolgende Frühjahr beträgt der minimale Wassergehalt 29,8 %. Die vorgefundenen Skelettanteile umfassen 7 % und 10,5 % sowie für vier Versuchsserien den skelettfreien Untergrund im Forstamt Reinhausen.

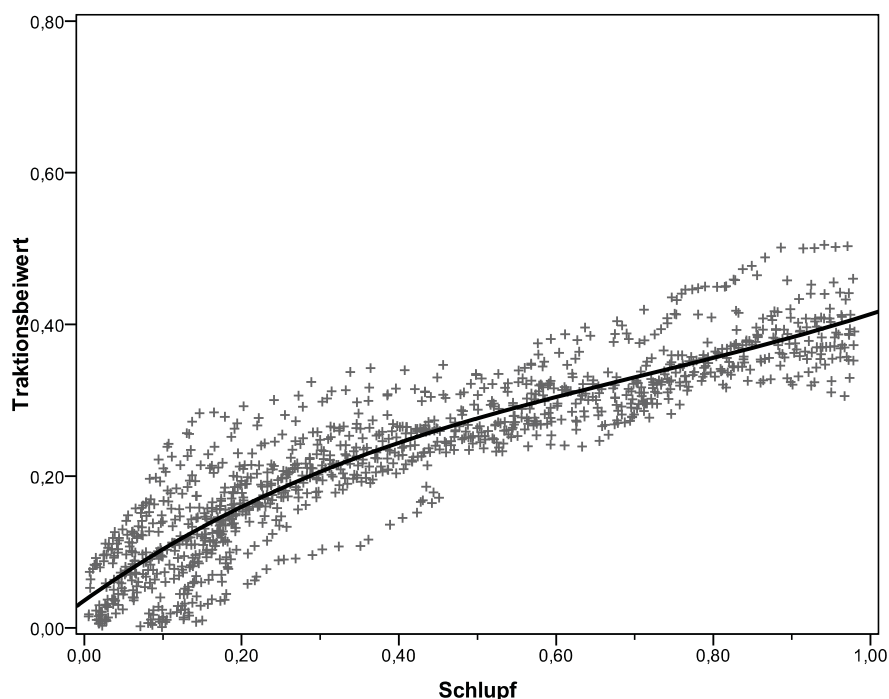


Abbildung 32: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 6 bei 43,9 % Bodenwassergehalt

Die Hälfte der insgesamt sechs Punktwolken zeigt einen Verlauf, wie er in Abbildung 32 für einen Bodenwassergehalt von 43,9 % dargestellt ist. Für diese Varianten (in Tabelle 9 grau hinterlegt) ist kein Skelettgehalt im Oberboden festzustellen. Die drei übrigen Messungen auf skeletthaltigen bzw. bei trockenen Untergrundbedingungen bilden demgegenüber den gewohnten Kurvenverlauf mit anfangs steilem und danach abflachendem Anstieg der Traktionsbeiwerte. Abbildung 32 zeigt deutlich den vergleichsweise flacheren Anstieg der Traktion bis zu einem Schlupf von ca. 30 %. Darüber nimmt die Punktwolke einen weiterhin deutlich zunehmenden Verlauf ein, der kein lokales Maximum bildet. Durch diese Entwicklung der Traktionsbeiwerte über dem Schlupf verändert sich auch die Form der Ausgleichskurve, die einen geschwungenen, nahezu linearen Anstieg beschreibt. Für die anderen Varianten mit dem gewohnten Kurvenverlauf zeigen sich dagegen offensichtliche Unterschiede in der Steigung der Ausgleichskurve. Insbesondere bei 31,9 % Bodenwassergehalt (Abb. V, 43 im Anhang) ergibt sich zudem ein lokales Maximum.

Tabelle 9: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit der Konfiguration 6 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf ≤ 25 %

Bodenwassergehalt (%)	Skelettanteil (%)	Anzahl (N)	Regressionskoeffizienten				R ²	kalkulatorische Grenzneigung (%)
			k	b1	b2	b3		
29,8	0	1.623	0,038	2,196	-3,215	1,551	0,775	41,0
31,9	7	1.737	0,072	2,501	-3,691	1,718	0,754	49,3
38,2	0	817	-0,028	1,351	-1,774	0,929	0,909	21,3
39,9	0	509	0,002	0,734	-0,414	0,131	0,877	16,1
41,8	10,5	1.688	0,012	1,675	-2,169	1,038	0,895	31,1
43,9	0,0	1.152	0,036	0,741	-0,680	0,316	0,835	18,4

Die Unterschiede zwischen den Varianten werden auch durch die Koeffizienten und Prognosewerte in Tabelle 9 deutlich. Während die Versuche auf skeletthaltigem Untergrund zu hohen b1-Werten und ebensolchen für b3 führen, weisen die Koeffizienten b2 die höchsten negativen Werte auf. Demgegenüber sind die Ausgleichsmodelle der grau hinterlegten Versuchsvarianten zu kleineren Koeffizienten verschoben. So reduziert sich der Einfluss des quadratischen und des kubischen Gliedes insbesondere bei geringem Schlupf. Dadurch steigen die Traktionsbeiwerte der Funktionen anfangs nahezu linear mit dem Schlupf, da die Koeffizienten für b1 ca. 1 betragen. Erst bei höheren Schlupfwerten nimmt der Einfluss der anderen Koeffizienten zu und reduziert im Falle des quadratischen Gliedes b2 die Traktionsbeiwerte, die einen geringen Zuschlag aus den kubischen Koeffizienten b3 erhalten. Der flache Anstieg der Traktionsbeiwerte für die grau dargestellten Oberböden wirkt sich entsprechend auf den Prognosewert für eine bodenökologisch befahrbare Geländeneigung aus. Mit Werten zwischen 16,1 % und 21,3 % fallen diese deutlich hinter die Werte für die anderen vorwiegend skeletthaltigen Varianten zurück.

5.3.1.9 Konfiguration 10 bis 16

Für einen Teil der Maschinenkonfigurationen wurde der Einfluss der Beladung untersucht. Die entsprechende Konfigurationsbezeichnung wird für diese Versuche mit zehn addiert. Insgesamt stehen 10 Versuchsserien mit unterschiedlicher Ausstattung der Maschine und ebensolchen Beladungszuständen zur Verfügung. Die Zuladungsmasse reicht von lediglich 1.350 kg sehr trockenen Holzes bis zu 8.100 kg Frischholz. Für die Bodenwassergehalte ergibt sich ein Spektrum zwischen 36 % und 42 % im Oberboden. Für den Skelettanteil ist eine deutliche Tendenz zu skelettfreien Untergründen festzustellen. So sind lediglich drei Versuche auf Untergründen mit einer deutlichen Beimischung von kleineren Steinen im Oberboden erfolgt, darunter auch eine Messserie auf einem geschobenen Rückeweg mit einem Skelettgehalt von 23,75 %.

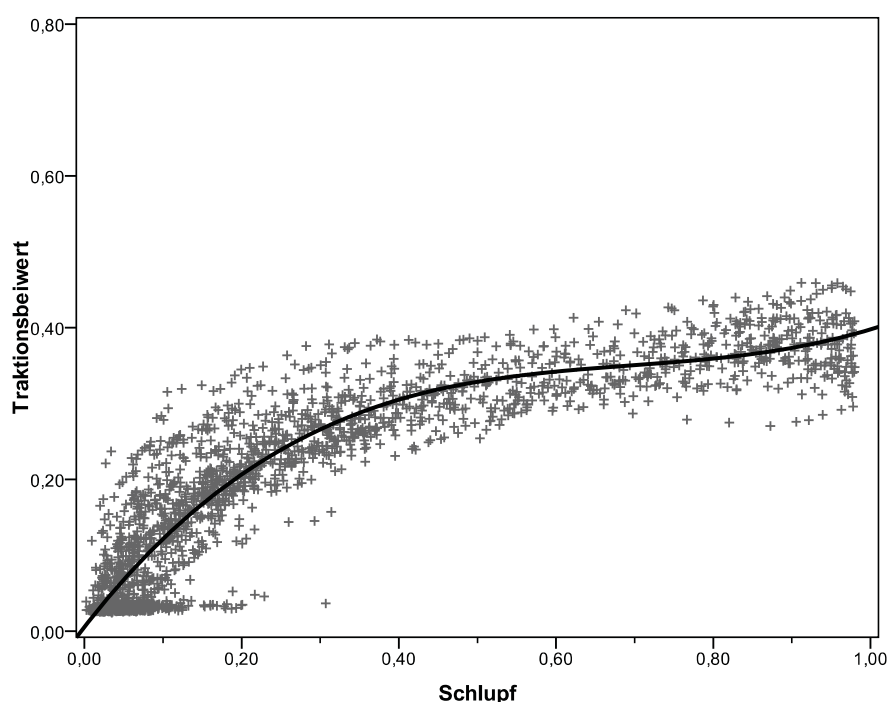


Abbildung 33: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 15 bei 40,4 % Bodenwassergehalt und einer Zuladung von 4.000 kg

Aufgrund der verschiedenen Varianten hinsichtlich Maschinenkonfiguration, Bodenwassergehalt und Untergrund sowie wechselnder Beladung ergeben sich unterschiedliche Ausprägungen der Punktwolken, die nicht durch eine einzelne Abbildung umfassend beschrieben werden können. Abbildung 33 zeigt die Punktwolke der Variante 15 (also mit gebrauchten Reifen und reduziertem Reifeninnendruck) mit einer Beladung von 4.000 kg bei einem Oberbodenwassergehalt von 40,4 %. Die abgebildete Punktwolke stellt dabei eine Zwischenvariante der resultierenden Versuchsergebnisse dar. Dabei werden nur vereinzelt Traktionsbeiwerte über 0,4 erreicht, was verglichen mit den übrigen Varianten (siehe Anhang) mit Beladung einem geringeren Maximalwert entspricht. Insgesamt zeigen sich jedoch für alle beladenen Versuchsvarianten vergleichsweise geringe Traktionsbeiwerte, deren Maxima zwischen 0,38 und 0,65 liegen. Deshalb lässt sich vermu-

ten, dass die zusätzliche Ballastierung der Maschine zwar die Zugkraft erhöht, bezogen auf die Eigenmasse jedoch eine leichte Verringerung der Traktionsbeiwerte bewirkt. Die Auswirkungen auf den Verlauf der Punktwolke sind dabei unterschiedlich. Während einige der Versuche mit gebrauchten Rädern und einer Zuladung von 4.000 kg (Konfiguration 10) zu einem Verlauf ähnlich der unbeladenen Versuchsvarianten führen, ergeben die meisten beladenen Versuche jedoch einen vergleichsweise flachen Anstieg der Traktionsbeiwerte bei geringem Schlupf, der sich zudem in den meisten Fällen ohne erkennbares Maximum bis zum Durchdrehen der Antriebsräder fortsetzt.

Tabelle 10: Regressionskoeffizienten der kubischen Ausgleichsfunktionen für die Traktionsmessungen mit den Konfigurationen 10 - 16 und auf dieser Basis berechnete Grenzneigung für eine Befahrung bei Schlupf $\leq 25\%$

Maschinenkonfiguration	Bodenwassergehalt (%)	Skelettanteil (%)	Anzahl (N)	Regressionskoeffizienten				R ²	kalkulatorische Grenzneigung (%)
				k	b1	b2	b3		
10	40,5	0	1.559	0,025	1,694	-2,479	1,273	0,850	31,4
12	37,5	0	1.073	0,017	0,930	-1,315	0,723	0,823	17,8
12	39,8	13,8	2.322	0,046	1,099	-1,300	0,622	0,856	24,9
15	40,1	6,3	3.159	0,036	1,188	-0,556	-0,179	0,895	29,6
15	40,4	0	2.141	0,006	1,330	-1,799	0,861	0,861	23,9
16	36,0	0	514	-0,027	1,375	-1,812	0,901	0,865	21,7
16	36,5	0	1.762	0,064	1,736	-2,555	1,241	0,769	35,8
16	39,0	0	577	-0,011	0,685	-0,257	-0,043	0,896	14,3
16	39,9	23,75	1.803	0,026	1,178	-1,436	0,754	0,874	24,2
16	42,0	0	420	0,002	0,806	-1,000	0,570	0,886	15,0

Dieser veränderte Verlauf der Punktwolken zeigt sich auch bei den bestimmten Ausgleichsmodellen (s. Tabelle 10). Die Varianten (grau hinterlegt) mit einem entsprechend flacheren Verlauf führen zu vergleichsweise geringen Werten der Koeffizienten b2 und b3. Insbesondere wenn diese nahe Null sind, ergibt sich ein nahezu linearer Anstieg des Ausgleichs. Vereinzelt ist b3 zudem leicht negativ bei ebenfalls nur geringen Beträgen der b2-Werte. Durch den flacheren Anstieg und den resultierenden Ausgleich verringern sich die prognostizierten Hangneigungen für 25 % Schlupf deutlich, sodass bei einigen Varianten bereits Steigungen von 14,3 % nicht mehr bodenökologisch vertretbar zu befahren scheinen. Neben der Beladung sind die hohen Bodenwassergehalte während der Versuchsfahrten als eine weitere Ursache für die geringen Prognosewerte zu sehen.

5.3.2 Alternative Ausgleichsdatensätze

5.3.2.1 Hintergrund

Anhand der Punktwolken wird die teilweise erhebliche Streuung der Traktionsbeiwerte über dem Schlupf deutlich. Bereits frühere Anwendungen der Messtechnik bei BLOCK (2008) und HITTENBECK (2007b) haben teilweise Schwierigkeiten beim Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung ge-

zeigt. Diese basieren zum Teil auf der ungleichmäßigen Verteilung der Datensätze über dem Antriebsschlupf. Die ungleichmäßige Verteilung wirkt sich insbesondere bei geringem Schlupf auf den Ausgleich der Messwerte aus, da dieser Bereich im Datensatz überrepräsentiert ist. Um eine gleichrangige Bedeutung aller Schlupfbereiche zu gewährleisten, wurden zwei weitere Datensätze, die auf der Zuordnung der Messdaten zu einer von zehn Schlupfstufen basieren, erzeugt (vgl. Kap. 4.4.3).

Tabelle 11: Mittelwerte und Standardabweichungen für den Schlupf und die Traktionsbeiwerte der zehn Schlupfstufen

Schlupfstufe		Schlupf	Traktionsbeiwert
5	Mittelwert	5,5413	,1187
	N	26.889	26.889
	Standardabweichung	2,52339	,09792
15	Mittelwert	14,3496	,2211
	N	17.810	17.810
	Standardabweichung	2,84812	,12959
25	Mittelwert	24,6658	,3136
	N	9.865	9.865
	Standardabweichung	2,88407	,12531
35	Mittelwert	34,8220	,3600
	N	7.163	7.163
	Standardabweichung	2,88075	,11983
45	Mittelwert	44,8059	,3922
	N	5.772	5.772
	Standardabweichung	2,85871	,11850
55	Mittelwert	54,8694	,4178
	N	4.865	4.865
	Standardabweichung	2,87136	,11982
65	Mittelwert	64,9299	,4386
	N	4.499	4.499
	Standardabweichung	2,91823	,12135
75	Mittelwert	75,0159	,4629
	N	4.437	4.437
	Standardabweichung	2,88111	,11950
85	Mittelwert	85,1989	,4809
	N	5.074	5.074
	Standardabweichung	2,91071	,11232
95	Mittelwert	94,5517	,4716
	N	6.512	6.512
	Standardabweichung	2,32750	,10799
Insgesamt	Mittelwert	33,3298	,2868
	N	92.886	92.886
	Standardabweichung	29,69638	,17728

Tabelle 11 zeigt die Mittelwerte für Schlupf und Traktionsbeiwert der zehn verschiedenen Stufen sowie die Anzahl der Daten in jeder Stufe und deren Standardabweichung. Ein erster Blick auf die Anzahl der Datensätze innerhalb der einzelnen Stufen verdeutlicht die Ungleichverteilung. So sind 26.889 Datensätze und damit 29 % aller Messwerte der unteren Schlupfstufe zugeordnet, während lediglich 4.437 Datensätze (ca. 5 %) für die Schlupfstufe „75“ zur Verfügung stehen. Für die Anpassung einer Ausgleichsfunktion an die gesamten Datensätze ergibt sich somit eine besonders hohe Bedeutung für den Bereich geringen Schlupfs. Um die Abweichungsquadrate zu mini-

mieren, wird der Ausgleich daher verstärkt an diesen Bereich angepasst; entsprechende Abstriche werden dabei für höhere Schlupfwerte akzeptiert.

Um diese Schwierigkeiten des Ausgleichs für Berechnungen auszuschließen, werden daher die resultierenden Grenzneigungsangaben der einzelnen Versuchsserien auf Basis des reduzierten Ebenendatensatzes (vgl. Kap. 4.4.3) mit gleichbesetzten Schlupfstufen berechnet. Die Unterschiede zu den Ausgleichen auf Basis der bereits vorgestellten vollständigen Punktwolken sind oftmals sehr gering. Für einzelne Versuchsserien ergeben sich jedoch deutliche Einflüsse der stärker besetzten unteren Schlupfstufen des vollständigen Datensatzes, sodass die Berechnung von belastbaren Einsatzgrenzen auf den reduzierten Daten basiert.

5.3.2.2 Reduzierter Datensatz

Die Auswirkungen der Datenreduktion auf den reduzierten Datensatz zeigen die Abbildungen 34 und 35. Abbildung 35 macht dabei die verringerte Datenbasis der reduzierten Daten deutlich. Insbesondere im unteren Schlupfbereich entsteht durch die geringere Werteanzahl der Eindruck einer höheren Streuung, da sich die Punktwolke hier weniger geschlossen darstellt. Ein genauer Blick auf die Grafik der Ausgangsdaten (Abb. 34) zeigt, dass die Streuung der Datensätze vergleichbar ist.

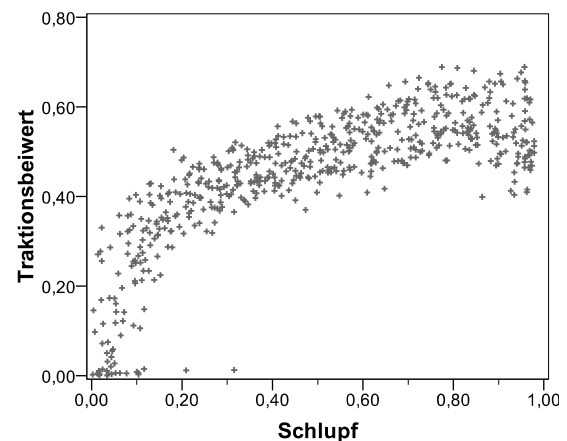
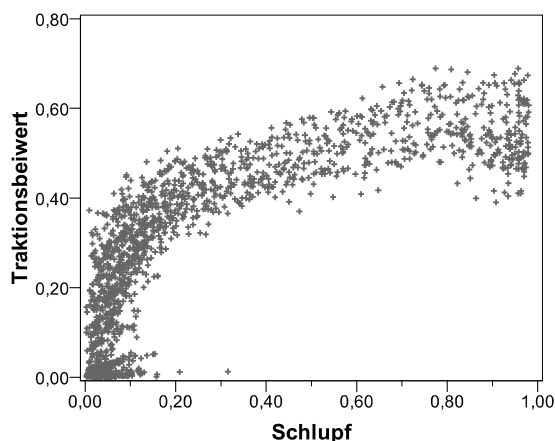


Abbildung 34: Exemplarische Punktwolke aus Schlupf und Traktionsbeiwerten vor der Reduktion auf gleichbesetzte Schlupfstufen

Abbildung 35: Exemplarische Punktwolke aus Schlupf und Traktionsbeiwerten nach der Reduktion auf gleichbesetzte Schlupfstufen

Anhand des reduzierten Datensatzes werden für jede Versuchsserie Ausgleichsmodelle entwickelt, die zur Berechnung von Grenzneigungen in Kap. 5.4.3 eingesetzt werden. Dabei stellt die resultierende Neigungsangabe für 25 % Schlupf die Zielvariable einer linearen Regression mit den als wesentlich identifizierten Einflussfaktoren dar.

5.3.2.3 Stufenmittelwerte

Durch Reduktion auf die Stufenmittelwerte ergibt sich ein erheblich geringerer Datenumfang mit insgesamt 570 Datensätzen aus 57 Versuchsserien. Abbildung 36 zeigt das Ergebnis eines Aus-

gleichs auf Basis der Stufenmittelwerte für eine Versuchsserie mit Bändern auf dem hinteren Bogie (Konfiguration 4). Die zehn einzelnen Stufenmittelwerte sind deutlich zu erkennen und zeigen den gewohnten Verlauf der Punktwolken auf Basis der kompletten Datensätze. Durch die geringe Anzahl an Datenpunkten wird die sehr gute Anpassung an die Werte sichtbar. Lediglich das sich schwach abzeichnende Maximum bei ca. 80 % Schlupf wird nicht exakt nachgebildet. In Verbindung mit den gesamten Ausgangsdaten ergibt sich das in Abbildung 37 dargestellte Bild. Die Punktwolke beginnt mit einem gewohnt steilen Anstieg der Traktionsbeiwerte über dem Schlupf bis ca. 20 %. Darüber flacht der Anstieg ab und nimmt über 80 % Schlupf sogar leicht fallende Tendenzen ein. Der Ausgleich anhand der Stufenmittelwerte zeigt bei geringem Schlupf deutliche Abweichungen zur Punktwolke, die jedoch oberhalb von 25 % Schlupf in eine augenscheinlich gute Anpassung an die Ausgangsdaten münden.

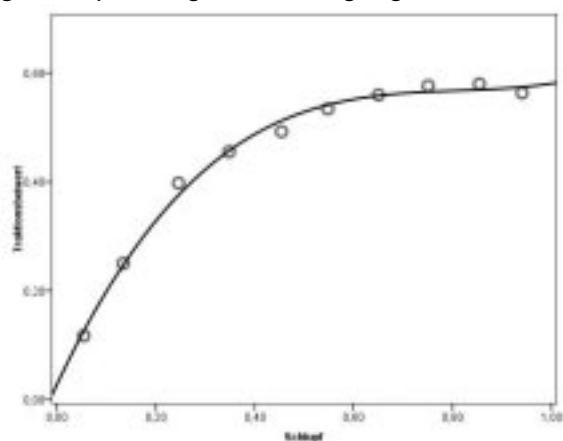


Abbildung 36: Stufenmittelwerte und deren Ausgleich für die Konfiguration 4 bei einem Bodenwassergehalt von 29,9 %

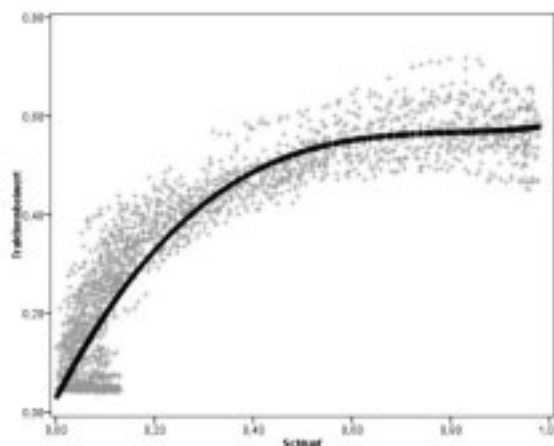


Abbildung 37: Punktwolke für die Konfiguration 4 bei einem Bodenwassergehalt von 29,9 % mit Ausgleichskurve basierend auf den Stufenmittelwerten

Die zehn Stufenmittelwerte jeder Versuchsserie werden im Rahmen einer linearen Regression zur Identifikation möglicher Einflussfaktoren auf das Traktionsverhalten verwendet (siehe Kap. 5.4.2). Sie beschreiben die Punktwolke auf Basis der vollständigen Daten mit wenigen Werten, ohne diese gerichtet zu beeinflussen.

5.4 Hangneigungsprognose

5.4.1 Einführung

Ziel der Traktionsmessungen unter ebenen Bedingungen ist es, ein Grenzneigungsmodell für den Einsatz von Forwardern zu entwickeln. Im Weiteren werden die Einflussfaktoren auf das Trakti-

onsverhalten und damit auf die befahrbaren Hangneigungen anhand der Stufenmittelwerte untersucht. Diese haben den Vorteil, dass alle Varianten aus Konfiguration und Bodenwassergehalt mit gleichem Gewicht in das zu entwickelnde Modell eingehen. Zur Identifikation der Einflussfaktoren wird eine lineare Regression mit der Zielvariable *Trak* (Traktionsbeiwert) durchgeführt. Neben dem Einschluss des Schlupfs in linearer, quadratischer und kubischer Ausprägung können weitere Variablen zur Erklärung des Traktionsverhaltens herangezogen werden. Diese wirken sich jedoch vorrangig auf den Y-Achsenabschnitt und damit auf die Konstante der Ausgleichsfunktion aus, sodass die Anpassung durch die kubische Form geprägt ist. Da Informationen über die genaue Zusammensetzung des Oberbodens, die Lagerungsdichte sowie die Scherfestigkeit teilweise nicht zur Verfügung stehen, werden mehrere lineare Regressionen durchgeführt, um die entscheidenden Faktoren zu identifizieren. So muss für eine Rechnung mit allen Varianten auf die erklärenden Bestandteile der Korngrößenzusammensetzung, der Lagerungsdichte und der Scherfestigkeit verzichtet werden.

Nach der Identifikation der wichtigsten Einflussfaktoren werden diese in einem zweiten Schritt zur linearen Regression der Befahrungsgrenze verwendet. Als Befahrungsgrenze dient dabei der Prognosewert für einen Schlupf von 25 % der einzelnen Varianten, der auf Basis des reduzierten Datensatzes ermittelt wurde. Dieser beinhaltet die Variation der Messwerte und berücksichtigt zudem alle Bereiche der Traktionskurven in gleicher Weise. Die einbezogenen Faktoren verändern einen Grundneigungswert für eine mit Rädern ausgestattete Maschine, sodass sich anhand weniger kategorisierter Informationen eine Neigungsangabe ergibt.

5.4.2 Einflussfaktoren

5.4.2.1 Modellvoraussetzungen

Vor und nach den Traktionsmessungen wurde eine Vielzahl von Informationen über den Bestand und vor allem den befahrenen Untergrund erhoben. Wie in Kap. 5.2 beschrieben, stehen die vielfach mit Zahlen codierten Informationen auch im Datensatz der Stufenmittelwerte zur Verfügung. Dadurch wird eine schrittweise lineare Regression mit allen Einflussfaktoren möglich. Der Schlupf geht dabei in der ersten bis dritten Potenz in die Regression ein und ermöglicht den typischen quadratischen bis kubischen Verlauf des resultierenden Ausgleichsmodells. Die übrigen für alle Varianten verfügbaren Einflussfaktoren werden in einem zweiten Schritt durch eine multiple lineare Mehrfachregression mit dem schrittweisen Vergleichsmodus (STEPWISE) berücksichtigt. Die eingesetzte Statistiksoftware SPSS 16.0 berechnet dabei für jede Variable den F-Wert des partiellen Korrelationskoeffizienten zwischen der erklärenden Variablen und dem Traktionsbeiwert. Die Variable mit dem höchsten F-Wert wird dabei als erstes in das Regressionsmodell aufgenommen. Über die Aufnahme oder auch den Ausschluss entscheidet die Implementierungsgrenze der F-Verteilungswahrscheinlichkeit. Eine Aufnahme resultiert für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 0,05 während der Ausschluss einer bereits aufgenommenen Variablen bei Überschreitung einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,10 erfolgt. Schrittweise werden so weitere Variablen in das Modell aufgenommen beziehungsweise können auch wieder ausgeschlossen werden. Dieser Prozess setzt sich solange fort, bis keine weiteren Erklärungsvariablen die Signifikanzschwelle

des Modells überschreiten. Die Berechnungen erfolgen obwohl einzelne Variablen nicht den Anforderungen der Modellbildung genügen. Hierzu zählen insbesondere nicht metrisch skalierte Variablen. Ziel der Berechnungen ist es zudem nicht ein exaktes Schätzmodell, sondern vielmehr die Identifikation wichtiger Einflussfaktoren.

Im Weiteren orientiert sich die Bewertung daher an der Aufnahmereihenfolge der Einflussvariablen und der Veränderung des Bestimmtheitsmaßes durch die einzelnen Faktoren. Anhand der für jede Variable berechneten Regressionskoeffizienten lässt sich neben der Wirkrichtung einzelner Faktoren auch eine ungefähre Abschätzung der Auswirkungen auf die Zielgröße des Traktionsbeiwertes bestimmen.

5.4.2.2 Stufenmittelwerte mit reduzierten Einflussfaktoren

Von den insgesamt 18 erhobenen möglichen Einflussfaktoren stehen nur 13 für alle Versuchsvarianten zur Verfügung. Bei der Betrachtung des gesamten Datenbestandes muss daher auf die Lagerungsdichte innerhalb der Fahrspur, die Zusammensetzung des Oberbodens aus den drei Fraktionen Sand, Schluff und Ton sowie die Scherfestigkeit während der nachträglichen Standortaufnahme verzichtet werden.

Tabelle 12 zeigt das Ergebnis der linearen Regression mit 52 Versuchsserien und 13 möglichen Einflussfaktoren. Durch die schrittweise Aufnahme sind zusätzlich zum zwangsweise eingeschlossenen Schlupf (in den drei Potenzen) neun weitere Variablen mit erklärendem Charakter aufgenommen worden. Insgesamt ergibt sich daraus ein sehr gutes Bestimmtheitsmaß von 0,864. In Tabelle 12 ist die Aufnahmereihenfolge der Variablen in das Regressionsmodell und die Veränderung des Bestimmtheitsmaßes durch die zusätzlichen Erklärungsvariable angegeben. Durch den Schlupf in den drei Potenzen lassen sich bereits 56 % der Gesamtvariabilität des Traktionsbeiwertes erklären. Wird das Regressionsmodell um die Dummy-Variable der Bändermontage erweitert, verbessert sich das Bestimmtheitsmaß um 0,134 auf 0,697. Die Bänder haben somit den größten Einfluss auf das Traktionsverhalten des Rückezugs.

In den nächsten beiden Regressionsschritten werden die Bodenparameter Wasser- (*Feuchte*) und Skelettgehalt (*Skelettanteil*) zur Verbesserung herangezogen. Der Wassergehalt bewirkt dabei eine Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes um 0,073 und der Skelettgehalt um 0,043, sodass insgesamt 81 % der Gesamtvariabilität durch die vier Faktoren (Schlupf, Bänder, Wasser- und Skelettgehalt) erklärt werden können. Als weitere Faktoren gehen die Fahrzeugparameter Zuladung (*beladung_t*) und Kettenmontage in die Regression ein und erhöhen das Erklärungspotential des Modells um weitere 0,033. Die Aufnahme der Beladung erfolgt in Form der konstruierten Variable *beladung_t*, die der Zuladungsmasse in Tonnen (1.000 kg) entspricht.

Tabelle 12: Regressionsschritte der linearen, schrittweisen Regression mit 13 möglichen Einflussfaktoren ($N = 52$ Versuchsserien)

Regressionsschritt	Variable	Bestimmtheitsmaß (R^2)	Veränderung des Bestimmtheitsmaßes (ΔR^2)
1	Schlupf; Schlupf ² ; Schlupf ³	0,563	0,563
2	Bänder (Dummy: 1 = montiert)	0,697	0,134
3	Bodenwassergehalt [%]	0,770	0,073
4	Skelettanteil [%]	0,813	0,043
5	Zuladung [t]	0,834	0,021
6	Ketten (Dummy: 1 = montiert)	0,846	0,012
7	Steigung [%]	0,855	0,009
8	Humusvorkommen (0; 1; 2)	0,860	0,005
9	Baumart (Dummy: 1 = Laubbaum)	0,862	0,002
10	Bodenart (12 ordinalskalierte Stufen)	0,864	0,002
-	Reifen (Dummy: 1 = Neureifen)		
-	Querneigung (Dummy: 1 = vorhanden)		
-	Humusform (6 ordinalskalierte Stufen)		
-	Reifeninnendruck (Dummy: 1 = 1,5 bar statt 2,7 bar)		

abhängige Variable: *trak* (Traktionsbeiwert)

Die Auswirkungen der weiteren vier Einflussfaktoren auf das Bestimmtheitsmaß des Regressionsmodells sind vergleichsweise gering, obwohl diese signifikant in das Modell einbezogen werden. Kein signifikantes Erklärungspotential wird zudem vier weiteren Faktoren beigemessen. Hierzu zählen auch die Maschinenparameter Reifen und Reifeninnendruck, der sich bei zahlreichen Untersuchungen zum Traktionsverhalten von luftbereiften Fahrzeugen als wichtiger Faktor dargestellt hat. Ohne entscheidende Bedeutung sind auch die Humusform sowie die teilweise vorhandene Querneigung der befahrenen Rückegassen.

Die berechneten Regressionskoeffizienten der Einflussvariablen sind in Tabelle 13 dargestellt. Da sich die Vielzahl der möglichen Einflussfaktoren untereinander beeinträchtigen, kann der Betrag der jeweiligen Regressionskoeffizienten nicht für die Berechnung von Auswirkungen auf die Zielgröße Traktionsbeiwert genutzt werden. Anhand der Vorzeichen lassen sich jedoch die Effekte der einzelnen Variable auf das Traktionsverhalten des Rückezugs abschätzen. Während die Regressionskoeffizienten der drei Schlupfvariablen in den unterschiedlichen Potenzen vorrangig den Verlauf des Traktionsbeiwertes über dem Schlupf bestimmen, wirken die übrigen Variablen vorwiegend additiv auf die Konstante des Modells. Diese Einschätzung kann durch einen Vergleich der berechneten Regressionskoeffizienten (der Schlupfvariablen) mit jenen der vorherigen Anpassungsschritte bestätigt werden.

Eine Verbesserung der Zugkraft lässt sich aus der Montage der Bänder und Ketten auf der Maschine erwarten. Die Regressionskoeffizienten dieser Dummy-Variablen sind deutlich positiv. Ähnliches gilt für den Skelettgehalt des Oberbodens und die Variablen *Steigung* und *Humusvork*.

Während der positive Einfluss des Skelettgehalts den Erwartungen entspricht, dürfte die *Steigung* der befahrenen Gassen keinen Einfluss auf die Traktionsbeiwerte haben. Durch die Korrektur der Zugkraftwerte mit der Hangabtriebskraft sind alle Varianten auf ebene Bedingungen umgerechnet worden. Die Aufnahme des *Humusvorkommens* in das Regressionsmodell ist leicht irreführend, da beinahe 90 % der Versuchsserien der gleichen Gruppe zugeordnet wurden und sich so für nahezu alle Versuchsbedingungen eine identische Veränderung ergibt.

Tabelle 13: Regressionskoeffizienten des linearen Regressionsmodells mit 13 möglichen Einflussfaktoren

Regressionsschritt	Variable	Regressionskoeffizient
	(Konstante)	,094
1	Schlupf	1,514
1	Schlupf ²	-1,848
1	Schlupf ³	,806
2	Bänder (Dummy: 1 = montiert)	,086
3	Bodenwassergehalt [%]	-,005
4	Skelettanteil [%]	,008
5	Zuladung [t]	-,010
6	Ketten (Dummy: 1 = montiert)	,056
7	Steigung [%]	,004
8	Humusvorkommen (0; 1; 2)	,062
9	Baumart (Dummy: 1 = Laubbaum)	-,026
10	Bodenart (12 ordinalskalierte Stufen)	-,003

abhängige Variable: *trak* (Traktionsbeiwert)

Für die übrigen Variablen ergeben sich negative Regressionskoeffizienten, die eine Verschlechterung der Traktion bewirken. Als wichtigster Faktor zeigt sich dabei der Wassergehalt des Oberbodens, dessen Regressionskoeffizient eine Abnahme der Traktion mit zunehmender Feuchte des Bodens ausweist. Ebenfalls eine Verschlechterung resultiert aus der zusätzlichen Beladung der Versuchsmaschine, der Bestockung mit Laubhölzern und die Veränderung der (ordinalskalierten) *Bodenart* hin zu höheren Schluff- und Tongehalten.

Obwohl insgesamt neun Variablen zusätzlich zum Schlupf in den drei Potenzen in das Modell aufgenommen werden, variiert das Erklärungspotential der einzelnen Faktoren erheblich. Insbesondere das *Humusvorkommen* und die Variable *Bodenart* haben nur eine geringe Aussagekraft aufgrund der Verteilung bzw. der Skalierung. Als wichtigste Faktoren ergeben sich die Montage der Traktionshilfsmittel sowie die Bodenparameter Wassergehalt und Skelettgehalt im Oberboden.

5.4.2.3 Stufenmittelwerte mit allen Einflussfaktoren

Die bisherige Betrachtung verzichtet auf die Erklärungspotenziale der Korngrößenzusammensetzung, der Lagerungsdichte in der Fahrspur sowie der Scherfestigkeitsmessungen während der nachträglichen Standortkartierung. Durch die Einbeziehung dieser Faktoren verändert sich das Ausgleichsmodell der linearen Regression zu dem in den Tabellen 12 und 13 dargestellten Modell mit veränderten Einflussfaktoren und deren Koeffizienten. Neben der deutlichen Zunahme der Einflussfaktoren ist zudem eine Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes zu verzeichnen. Unter Einbindung der insgesamt 19 Faktoren wird ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß von 0,892 erreicht. Der Berechnung liegen insgesamt 36 Versuchsserien zugrunde, für die alle Informationen zur Verfügung stehen.

Tabelle 14: Regressionsschritte der linearen, schrittweisen Regression mit 19 möglichen Einflussfaktoren ($N = 36$ Versuchsserien)

Regressionsschritt	Variable	Bestimmtheitsmaß (R^2)	Veränderung des Bestimmtheitsmaßes (ΔR^2)
1	Schlupf; Schlupf ² ; Schlupf ³	0,612	0,612
2	Bänder (<i>Dummy: 1 = montiert</i>)	0,733	0,121
3	Tonanteil [%]	0,790	0,057
4	Bodenwassergehalt [%]	0,820	0,030
5	Steigung [%]	0,835	0,015
6	Zuladung [t]	0,844	0,009
7	Querneigung (<i>Dummy: 1 = vorhanden</i>)	0,851	0,007
8	Lagerungsdichte [g/cm^3]	0,855	0,004
9	Reifen (<i>Dummy: 1 = Neureifen</i>)	0,860	0,005
10 (19)	Reifeninnendruck (<i>Dummy: 1 = 1,5 bar statt 2,7 bar</i>)	0,862 (0,892)	0,002 (0,000)
11	Scherfestigkeit [kPa]	0,870	0,002
12	Bodenart (<i>10 ordinalskalierte Stufen</i>)	0,875	0,005
13	Schluffanteil [%]	0,879	0,004
14	Baumart (<i>Dummy: 1 = Laubbaum</i>)	0,883	0,004
15	Ketten (<i>Dummy: 1 = montiert</i>)	0,887	0,004
16	Skelettanteil [%]	0,889	0,002
17	Humusvorkommen (0; 1; 2)	0,891	0,002
18	Humusform (<i>6 ordinalskalierte Stufen</i>)	0,892	0,001
-	Reifeninnendruck (<i>Dummy: 1 = 1,5 bar statt 2,7 bar</i>)		
-	Sandanteil [%]		

abhängige Variable: *trak* (Traktionsbeiwert)

In Tabelle 14 sind die insgesamt 19 Regressionsschritte des Modells mit den jeweils aufgenommen bzw. ausgeschlossenen Variablen dargestellt. Lediglich zwei Variablen wurden dabei nicht in das endgültige Regressionsergebnis aufgenommen. Dies ist zum einen der Sandanteil (*Sand*),

der sich komplementär zu den bereits einbezogenen Faktoren *Ton*- und *Schluff*gehalt des Oberbodens verhält, sowie zum anderen die Variable *druck_dummy*, die den reduzierten Reifeninnendruck identifiziert. Letztere wurde jedoch erst im letzten Regressionsschritt aus dem Modell genommen, nachdem sie als neunte Variable in dieses aufgenommen wurde. Dies zeigt ebenso wie die teilweise erheblichen Veränderungen der Koeffizientenwerte zwischen den Modellen die gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Faktoren. Im Weiteren kann daher nicht mehr aus der Reihenfolge oder den Koeffizientenwerten auf die Bedeutung der Faktoren geschlossen, sondern lediglich die Wirkrichtung dargestellt werden.

Neben den bereits aus der Berechnung mit reduziertem Einflussfaktorenumfang bekannten neun Variablen wurden sieben weitere in das Modell integriert. Direkt nach der Dummy-Variablen *Baender* wird die „neue“ Variable *Ton* (-gehalt des Oberbodens) in das lineare Ausgleichsmodell aufgenommen. Die Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes ist mit 0,057 bereits deutlich geringer als für die Bändermontage angezeigt. Eine weitere Erhöhung von 0,030 ergibt sich durch die Aufnahme der Feuchte, also des Bodenwassergehalts, in das Regressionsmodell, sodass sich das Bestimmtheitsmaß bereits auf 0,820 erhöht. Wie bereits für den Ausgleich auf der Basis der 52 Versuchsserien wird der Einfluss der Geländeneigung (Variable: *Steigung*) auf das Traktionsverhalten bestätigt. Ähnliches gilt für die Zuladung des Rückezugs, deren Einbezug in den Ausgleich das Bestimmtheitsmaß jedoch nur um 0,009 erhöht. Die weiteren Variablen können keine erhebliche Verbesserung des Regressionsmodells bewirken, obwohl die Aufnahme in den Ausgleich jeweils hochsignifikant ist.

Anhand der Regressionskoeffizienten der aufgenommenen Variablen (s. Tab. 15) wird deren Einfluss auf den Traktionsbeiwert als Zielgröße des Ausgleichs deutlich. Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung der Faktoren lassen sich die Zahlenwerte jedoch nicht für Berechnungen des Effekts verwenden. Ein Beispiel hierfür ist die Variation des Regressionskoeffizienten für die Montage der neuen *Reifen*, der zwischen den einzelnen Modellschritten Werte im Bereich von 0,023 bis zu den in Tabelle 15 gezeigten 0,076 annimmt. Für zwei der aufgeführten Variablen ist zudem ein Wechsel des Vorzeichens im Vergleich zum Regressionsmodell des vorherigen Kapitels (5.4.2.2) zu verzeichnen. Dies betrifft die Variablen *Bodenart* und *baumart_dummy*, die jedoch bereits zu den Variablen mit vergleichsweise geringer Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes zählen.

Die bereits sehr früh in das Modell aufgenommene neue Variable *Ton* erhält einen positiven Regressionskoeffizienten. Für höhere Tongehalte des Oberbodens ist daher mit einer Verbesserung der Traktion zu rechnen. Ebenfalls positive Wirkung auf die Mobilität des Rückezugs wird der Lagerungsdichte in der Fahrspur (*Id_spur*), der Scherfestigkeit des Bodens während der nachträglichen Standortaufnahme (*SF_allg*) sowie der Montage der Neureifen (*Reifen* =1) zugeschrieben. Während sich die positiven Koeffizienten dieser drei Variablen durch gesteigerte Festigkeit des Oberbodens (*Id_spur*; *SF_allg*) bzw. die verbesserte Verzahnung mit dem Untergrund erklären lassen, ist der positiv gerichtete Einfluss der Querneigung auf den Versuchsgassen überraschend. Angesichts des relativ hohen Koeffizienten ist mit einer deutlichen Auswirkung auf das Traktionsverhalten zu rechnen. Als Ursache ist eine zusätzliche Kraftkomponente durch die Hangabtriebskraft in die nicht angestrebte Richtung quer zur Fahrtrichtung zu sehen. Diese entsteht insbesondere bei höherem Schlupf durch seitliches Rutschen der Maschine. Da sich die Neigungen der Versuchsgassen in dieser Richtung nicht ausreichend genau bestimmen ließen, muss mit

dieser Dummy-Variable gerechnet werden. Für die eigentliche Fragestellung der Hanglagenbefahrung hat die Querneigung jedoch keinen Einfluss, bzw. dieser kann sich nur verringern auf die befahrbare Neigung auswirken.

Tabelle 15: Regressionskoeffizienten des linearen Regressionsmodells mit 13 möglichen Einflussfaktoren

Regressionsschritt	Variable	Regressionskoeffizient
	(Konstante)	-,103
1	Schlupf	1,380
1	Schlupf ²	-1,610
1	Schlupf ³	,682
2	Bänder (Dummy: 1 = montiert)	,078
3	Tonanteil [%]	,013
4	Bodenwassergehalt [%]	-,006
5	Steigung [%]	,012
6	Zuladung [t]	-,008
7	Querneigung (Dummy: 1 = vorhanden)	,084
8	Lagerungsdichte [g/cm ³]	,053
9	Reifen (Dummy: 1 = Neureifen)	,076
10	Scherfestigkeit [kPa]	,000
11	Bodenart (10 ordinalskalierte Stufen)	,039
12	Schluffanteil [%]	-,005
13	Baumart (Dummy: 1 = Laubbaum)	,068
14	Ketten (Dummy: 1 = montiert)	,096
15	Skelettanteil [%]	,008
16	Humusvorkommen (0; 1; 2)	,085
17	Humusform (6 ordinalskalierte Stufen)	-,010

abhängige Variable: *trak* (Traktionsbeiwert)

Eine verringere Wirkung auf den Traktionsbeiwert wird den neu aufgenommen Variablen Schluff (-gehalt) und *Humusform* beigemessen. Der Schluffgehalt ist dabei zusammen mit dem Sandgehalt das Komplementär des Tongehaltes, sodass die entsprechend entgegengesetzte Wirkungsweise zu erwarten war. Die Variable *Humusform* enthält eine ordinalskalierte Bezifferung der Mineralisierungsraten im Auflagehumus. Je höher die Ziffer zwischen „1“ und „6“ desto schneller die Stoffumsetzung der vorgefundenen Humusform. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass insgesamt über die Hälfte der Versuchsflächen der Ziffer „3“ zugeordnet ist. Die resultierenden möglichen Unterschiede durch die Humusform sind daher als gering anzusehen. Hinzu kommt, dass die Skalierung der Variablen bereits eine rechnerische Verwendung ausschließt.

Weitere Einschränkungen des Versuchskollektivs, beispielsweise auf Versuche ohne Traktionshilfsmittel, bringen keine neuen Erkenntnisse, sodass eine entsprechende Darstellung an dieser Stelle unterbleibt. Insgesamt zeigt sich, dass eine Vielzahl von Faktoren das Traktionsverhalten

des Rückezugs beeinflussen. Die stark variierenden Koeffizienten zwischen den einzelnen Modellen machen jedoch auch deutlich, dass der tatsächliche Einfluss eines einzelnen Faktors nur schwer zu bestimmen ist. Einige der Variablen haben zudem nur sehr wenige Ausprägungen oder eine der Ausprägungen überwiegt in der Bedeutung mit deutlich über 50 % der Versuchsflächen.

5.4.2.4 Einflussfaktoren für die weitere Betrachtung

Anhand der dargestellten linearen Regressionen mit den möglichen Einflussfaktoren wird deutlich, dass sehr viele Faktoren eine Auswirkung auf das Traktionsverhalten des Forwarders aufweisen. Für viele dieser Variablen wird allerdings auch klar, dass deren Koeffizientenwerte zwischen den einzelnen Regressionsschritten sichtlich variieren. Zudem zeigen sich anhand der Korrelationen zwischen den einzelnen Einflussfaktoren Zusammenhänge, die sich untereinander beeinflussen (vgl. Kap. 6.3.3.5). Zusätzlich weisen einige Variablen nur wenige Merkmalsausprägungen auf, oder einzelne bestimmen den überwiegenden Teil der Daten.

Damit das zu entwickelnde Grenzneigungsmodell greifbar bleibt, muss eine Auswahl auf die wichtigsten Einflussfaktoren mit dem höchsten Erklärungswert erfolgen. Diese sollten sich zudem leicht bestimmen lassen und nicht auf langwierigen Laboruntersuchungen basieren. Die Identifikation der möglichen Einflussfaktoren erfolgte mit zwei unterschiedlichen Umfänge an möglichen Einflussvariablen. Bei den resultierenden Regressionsmodellen wird jeweils die Dummy-Variable *Bänder* als erstes in das Modell aufgenommen. Ebenfalls in beiden Modellen enthalten und anhand des Regressionskoeffizienten mit deutlichem Einfluss auf das Traktionsverhalten zeichnet sich zudem die Montage der Gleitschutzketten aus. Der Einsatz der Traktionshilfsmittel zeigt somit eine deutliche Verbesserung des Zugkraftverhaltens, sodass diese beiden Faktoren für die Berechnung von Grenzneigungen beim Forstmaschineneinsatz berücksichtigt werden müssen.

Direkt nach der Aufnahme der *Bänder* in das Modell wird für die umfangreichere Datengrundlage auf Basis von 52 Versuchsserien die besondere Bedeutung des Bodenwassergehaltes bestätigt. Für die lineare Regression mit allen Einflussfaktoren erfolgt die Aufnahme der *Feuchte* im dritten Regressionsschritt, sodass der Bodenwassergehalt ebenfalls unverzichtbar für das Grenzneigungsmodell ist. Als letzter entscheidender Einflussfaktor wird der Skelettgehalt des Oberbodens in die Berechnung des endgültigen Neigungsmodells einbezogen. Auf Basis der reduzierten Einflussfaktoren erfolgt die Aufnahme bereits direkt nach dem Bodenwassergehalt (*Feuchte*), während für die Regression mit allen möglichen Einflussvariablen erst andere Faktoren mit in das Modell aufgenommen werden. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass der *Skelettanteil* eine starke Korrelation mit dem Tongehalt, der noch vor dem Bodenwassergehalt in den Ausgleich einbezogen wird, aufweist.

5.4.3 Entwicklung eines Grenzneigungsmodells

5.4.3.1 Einführung

Die Traktionshilfsmittel gehen mit lediglich zwei Ausprägungen der Variablen (Dummy) in das Modell ein, während für den Wassergehalt und den Skelettanteil des Oberbodens eine Vielzahl verschiedener Messwerte vorhanden ist. Dabei werden die Wassergehaltsmesswerte direkt im Modell berücksichtigt und für die Skelettanteile im Oberboden eine Einteilung in drei *Skelettstufen* vorgenommen (s.a. Kap. 4.2.6). Die gleichnamige Variable erhält den Eintrag „0“ für skelettfreie Oberböden, für den Bereich bis 7 % wird die Ziffer „1“ zugewiesen und für nochmals höhere Skelettgehalte folgt der Eintrag „2“. Um die Einordnung der Konstante des Regressionsmodells zu erleichtern, wird zudem eine neue Variable für die Bodenwassergehalte berechnet. Für die Variable *Feuchte30* werden von dem ursprünglich gemessenen Bodenwassergehalt 30 % abgezogen, sodass das Regressionsergebnis auf einem Wassergehalt von 30 % basiert und nicht von unerreichbaren, absolut trockenen Bodenbedingungen ausgeht.

5.4.3.2 Ökologische Einsatzgrenzen für Bergauffahrt

Grundlage einer bodenökologisch motivierten Einsatzgrenze für Rückezüge ist die Begrenzung des auftretenden Antriebsschlupfs auf maximal 25 %. Um dem Rechnung zu tragen, werden anhand der Ausgleichsfunktionen des Traktionsbeiwertes über dem Schlupf die Neigungswerte (als das Hundertfache des Traktionsbeiwertes) für 25 % Schlupf berechnet. Für jede Versuchsserie ergibt sich so eine Angabe des Neigungsprozents, die in einem neuen Datensatz an die Informationen zu den Einflussfaktoren gekoppelt ist. Im nächsten Schritt wird diese Neigungsangabe als Zielgröße einer linearen Regression eingesetzt. Entgegen der schrittweisen Regression, die der Identifikation der Einflussfaktoren dient, erfolgt der Einschluss der vier Regressorvariablen (*Bänder*, *Ketten*, *Feuchte30* und *Skelettstufe*), sodass diese Faktoren sicher in das Modell einbezogen werden.

Tabelle 16: Regressionskoeffizienten des linearen Regressionsmodells zur Bestimmung der bodenökologischen Grenzneigungen

Variable	Regressionskoeffizient	Standardfehler
(Konstante)	29,753	1,416
Bodenwassergehalt (reduziert um 30 %)	-,831	,123
Skelettgehaltsstufe (0; 1; 2)	6,185	1,115
Bänder (Dummy: 1 = montiert)	7,579	2,663
Ketten (Dummy: 1 = montiert)	6,035	3,283

abhängige Variable: *red_25* (befahrbare Neigung bei 25 % Schlupf anhand des reduzierten Datensatzes)

In Tabelle 16 ist das Ergebnis der linearen Regression mit den vier Einflussfaktoren dargestellt. Das resultierende Ausgleichsmodell basiert auf 52 der insgesamt 57 Versuchsserien und zeigt mit einem korrigierten Bestimmtheitsmaß von 0,671 eine gute Anpassung des Modells. Das Bestimmtheitsmaß gibt dabei an, dass über 67 % der Gesamtvariation der berechneten Neigungsangabe auf die vier Einflussfaktoren zurückzuführen sind.

Das Modell beginnt mit einer Konstanten von 29,753, die den Prognosewert für den Rückezug bei 30 % Bodenfeuchte und skelettfreiem Untergrund beschreibt. Der Regressionskoeffizient des Bodenwassergehalts zeigt den bereits aus den vorherigen linearen Ausgleichsmodellen bekannten negativen Einfluss auf das Traktions- und damit Steigvermögen des Rückezugs. Der Anstieg des Bodenwassergehalts um 1 Vol-% reduziert dabei die Modellschätzung einer bodenökologisch noch befahrbaren Geländesteigung um 0,83 Neigungs-%. Alle weiteren Faktoren führen demgegenüber zu einer Ausweitung der Grenzneigungsangabe. Die Veränderung des Skelettgehalts in eine der beiden höheren Stufen resultiert in einer Anhebung der Modellschätzung um jeweils 6,2 %. Die Regressionskoeffizienten der Traktionshilfsmittel addieren sich zu 13,614 und zeigen somit ein ebenfalls deutlich positiven Einfluss auf das Steigvermögen des Forwarders.

Weitere Maße für die Anpassungsqualität der Koeffizienten (vgl. Tab. V, 20 im Anhang) zeigen, dass die Werte für die Traktionshilfsmittel einem größeren Fehler unterliegen als jene der Bodenparameter (Wassergehalt und Skelettstufe). Für letztere berechnen sich vergleichsweise geringe Standardfehler im Verhältnis zu den Regressionskoeffizienten von 15 % (Bodenwassergehalt) und 18 % (Skelettstufe). Die entsprechenden Variationskoeffizienten für die Ketten (54 %) und Bänder (35 %) liegen deutlich darüber. Als Ursache ist die häufige Vermengung der Traktionshilfsmittel zu nennen, da nur wenige Messungen den separaten Einfluss der Ketten oder Bänder untersuchen. Trotz der Schwierigkeiten ist deren Einfluss auf das Traktionsverhalten und damit auch auf die Steigfähigkeit eines Rückezugs jedoch unstrittig.

5.4.3.3 Absolute Grenzneigungen

Neben der *ökologisch* motivierten Grenze für Fahrbewegungen mit dem Forwarder in Hanglagen ist für seilunterstützte Erntesysteme und die Arbeit entlang der Falllinie die *absolute* Einsatzgrenze entscheidend. Diese gewährleistet die Standsicherheit gegen Abrutschen der Maschinen für den Fall technischer Probleme beim Einsatz von Traktionshilfswinden oder den generellen Einsatz bodengebundener Holzerntemaschinen. Um diese Sicherheit für die Technik und insbesondere auch für die Maschinenbediener zu gewährleisten, orientiert sich die Angabe von maximalen Einsatzgrenzen an den verfügbaren Zugkräften während der Messungen. Damit diese auch unter realen Einsatzbedingungen erreicht werden können, erfolgt die Berechnung mit dem höchsten Mittelwert der Traktionsbeiwerte in den zehn Schlupfstufen. Aus den Überlegungen in Kapitel 2.5 müsste es für den Rückezug theoretisch möglich sein, die aus diesem Traktionsbeiwert resultierende Hangneigung gerade noch durch die eigenen Antriebskräfte zu erreichen. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass selbst kleinste Beeinträchtigungen des Traktionsverhaltens, beispielsweise durch einzelne zu überfahrende Wurzeln, das Erreichen dieser Grenze verhindern. Andererseits sind während des Stillstandes der Maschine zusätzliche Haltekräfte durch die Haftreibung und die jederzeit wirkenden Fahrwiderstände zu erwarten. Für eine am maximalen Trakti-

onsbeiwert orientierte Einsatzgrenze ist daher in geringem Umfang mit Sicherheitsreserven durch den Stillstand der Maschine zu rechnen.

Tabelle 17: Regressionskoeffizienten des linearen Regressionsmodells zur Bestimmung der absoluten Grenzneigungen

Variable	Regressionskoeffizient	Standardfehler
(Konstante)	47,530	1,180
Bodenwassergehalt (reduziert um 30 %)	-,583	,103
Skelettgehaltsstufe (0; 1; 2)	4,766	,929
Bänder (Dummy: 1 = montiert)	9,790	2,219
Ketten (Dummy: 1 = montiert)	9,438	2,735

abhängige Variable: *max_trak* (Neigung berechnet anhand des max. Traktionsbeiwertes der Stufenmittelwerte)

Die Bestimmung der maximalen Hangneigungen erfolgt analog zu Berechnungen der ökologisch vertretbaren Grenzneigung. Als Zielgröße der Regression dient jedoch die Variable *MaxNeigung*, die sich aus dem in die Neigung umgerechneten maximalen Traktionsbeiwert des Stufenmittelwerte-Datensatzes für jede Versuchsserie bestimmt. Tabelle 17 zeigt das Ergebnis der linearen Regression mit den bekannten vier Variablen und einer Konstanten auf Basis der 52 Versuchsserien, die über Informationen zum Bodenwassergehalt verfügen. Für das resultierende Modell ergibt sich ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß von 0,730, sodass sich 73 % der Gesamtvariation durch die vier Einflussfaktoren erklären lässt. Neben der höheren Konstante unterscheiden sich auch die vier anderen Regressionskoeffizienten teilweise deutlich von denen der ökologischen Grenzneigungsbestimmung. Die Konstante gibt für einen mit Rädern ausgestatteten Forwarder bei 30 % Wassergehalt und skelettfreiem Untergrund die maximal befahrbare Hangneigung mit 47,5 % an. Durch den Anstieg der Bodenfeuchte reduziert sich die maximale Neigung. Für zusätzliche 10 % volumetrischen Bodenwassergehalt schätzt das Modell eine Abnahme der absoluten Grenzneigung um 5,8 %. Damit sind die Auswirkungen des Bodenwassergehaltes auf die maximale Steigung geringer als auf die ökologisch motivierte Grenzneigung. Gleiches ergibt sich für den Skelettanteil der Versuchsfelder. Durch den Sprung in eine höhere Skelettstufe erhöht sich die geschätzte Grenzneigungsangabe des Modells um 4,8 % (6 % für die schlupfbasierte Neigung). Während die Bodenparameter geringere Einflüsse auf die Zielgröße haben, verändert sich die Bedeutung der Traktionshilfsmittel. Die Regressionskoeffizienten addieren sich zu 19,228 und verstärken somit den gemeinsamen Einfluss auf die absolute Grenzneigung.

Anhand der verschiedenen Qualitätsmaße der Regression (vgl. Tab. V, 21 im Anhang) wird deutlich, dass die Koeffizienten teilweise - verglichen mit denen der schlupfbasierten Regression - verbesserte Werte zeigen. Insbesondere für die Traktionshilfsmittel ergeben sich reduzierte Standardfehler der Regressionskoeffizienten, und dies sowohl absolut als auch prozentual bezogen auf den Koeffizientenwert.

5.4.4 Modelldarstellung

Anhand der Regressionsmodelle lassen sich die Grenzneigungen für verschiedenen Einsatzbedingungen darstellen. Der Tabelle 18 sind die gerundeten Grenzneigungsangaben für verschiedene Untergrundbedingungen und die Ausstattung des Forwarders mit und ohne Traktionshilfsmittel zu entnehmen. Das Spektrum der Bodenwassergehalte umfasst den Bereich von 25 % bis 45 %, während für die Skelettanteile die unterste (skelettfreie) und die oberste Stufe angezeigt werden. Bei sehr guten Witterungsbedingungen mit entsprechend niedrigem Bodenwassergehalt und skelettfreiem Oberboden ergibt sich eine bodenökologisch vertretbare Grenzsteigung für das bergauf Fahren von 34 %, während bei einer Hangneigung von 50 % immerhin noch von einem sicheren Stand des Rückezugs auszugehen ist. Bei dieser Neigung sollten die Reibungskoeffizienten zwischen Reifen und Untergrund ein Abrutschen des gebremsten Forwarders verhindern. Erhöht sich der Wassergehalt des Oberbodens beispielsweise auf 40 %, so reduzieren sich die befahrbaren Geländesteigungen ohne Traktionshilfsmittel auf 21 % (ökologisch) sowie 42 % (absolut). Für den Einsatz der Ketten und Bänder sind erwartungsgemäß deutlich höhere Neigungsangaben zu verzeichnen. Unter trockenen und skelettfreien Untergrundbedingungen ist die Standsicherheit der Maschine bis zu einer Steigung des Geländes von 79 % gegeben, während das Fahren mit maximal 25 % Schlupf bis zu einer Neigung von 48 % möglich scheint. Derart trockene Untergründe kommen jedoch sehr selten vor, wie die Verteilung der Wassergehaltswerte für die Versuchsserien zeigt (siehe Kapitel 5.2.4.2). Durch den Einsatz der Traktionshilfsmittel wird es jedoch möglich, auch unter feuchten Witterungsbedingungen Flächen zu bearbeiten, die ansonsten nur unter besten Voraussetzungen bodenökologisch vertretbar erreicht werden können.

Tabelle 18: Grenzneigungen für den Einsatz eines Rückezuges in Hanglagen in Abhängigkeit der Maschinenausstattung und der Bodenbedingungen

Boden-Wassergehalt (Skelettgehalt) (%)	ohne Traktionshilfsmittel		mit Ketten und Bändern	
	Grenzneigung (ökologisch) (%)	Grenzneigung (absolut) (%)	Grenzneigung (ökologisch) (%)	Grenzneigung (absolut) (%)
25 (0 %)	34	50	48	70
30 (0 %)	30	48	43	67
35 (0 %)	26	45	39	64
40 (0 %)	21	42	35	61
45 (0 %)	17	39	31	58
25 (über 7 %)	46	60	60	79
30 (über 7 %)	42	57	56	76
35 (über 7 %)	38	54	52	73
40 (über 7 %)	34	51	47	71
45 (über 7 %)	30	48	43	68

5.5 Validierungsmessungen in Hanglagen

5.5.1 Einführung

Die Prognosen bodenökologisch motivierter Grenzneigungen für den Forwardereinsatz basieren auf der Annahme, dass bei Schlupfwerten über 25 % die Struktur des Oberbodens nachhaltig geschädigt wird. Das Fahren mit geringerem Schlupf ist zwar auch nicht ohne Schäden machbar, diese können sich jedoch durch den Erhalt der Porenkontinuität schneller regenerieren. Um das Prognosemodell auf Basis der Traktionsmessungen zu überprüfen, werden für die durchgeführten Validierungsfahrten der mittlere und der maximale Schlupf bestimmt. Anhand dieser Werte und des Vergleichs der befahrenen Geländesteigung mit der Angabe der Prognose lässt sich die Eignung des Modells abschätzen. Wie die Traktionsmessungen gezeigt haben, werden bei geringen Schlupfwerten sehr unterschiedliche Traktionsbeiwerte bestimmt. Daher ist eine Überprüfung anhand eines prognostizierten Schlupfs nicht möglich. Vielmehr wird daher für die einzelnen Versuchsserien geprüft, ob diese sowohl nach dem Modell als auch im Versuch mit unter 25 % Schlupf befahren werden können.

An Stelle der Traktionsmessungen mit der Verzögerungstechnik wurden unter stärker geneigten Bedingungen in Hanglagen über 10 % Neigung lediglich Schlupfmessungen durchgeführt. Dabei fuhr der Rückezug eine möglichst einheitliche Steigung mit konstanter Radumfangsgeschwindigkeit hinauf, während der Schlupf erfasst wurde. Anhand der so gewonnenen Informationen über die befahrene Hangneigung, den Untergrund, den Bodenwassergehalt sowie den Schlupf lassen sich die Prognosewerte des vorherigen Kapitels (5.4.3) überprüfen. Ein erster Blick gilt den Messdaten, um die Datenbasis der Validierungsfahrten nachvollziehen zu können. Im zweiten Schritt werden die mittleren Schlupfwerte der Versuchsserien den berechneten Grenzneigungen aus Kapitel 5.4.3 gegenübergestellt.

5.5.2 Exemplarische Datenbeschreibung

Der Fokus der Validierungsfahrten liegt auf dem Antriebsschlupf, der durch die Hangneigung und die Untergrundbedingungen verursacht wird. Die Abbildungen 38 und 39 zeigen den Verlauf des Schlupfes für zwei unterschiedliche Versuchsserien. Im Falle der Abbildung 38 handelt es sich um einen Test nahe der Mobilitätsgrenze, während Abbildung 39 auf der ersten Befahrung unter trockenen und somit traktionsförderlichen Bedingungen beruht.

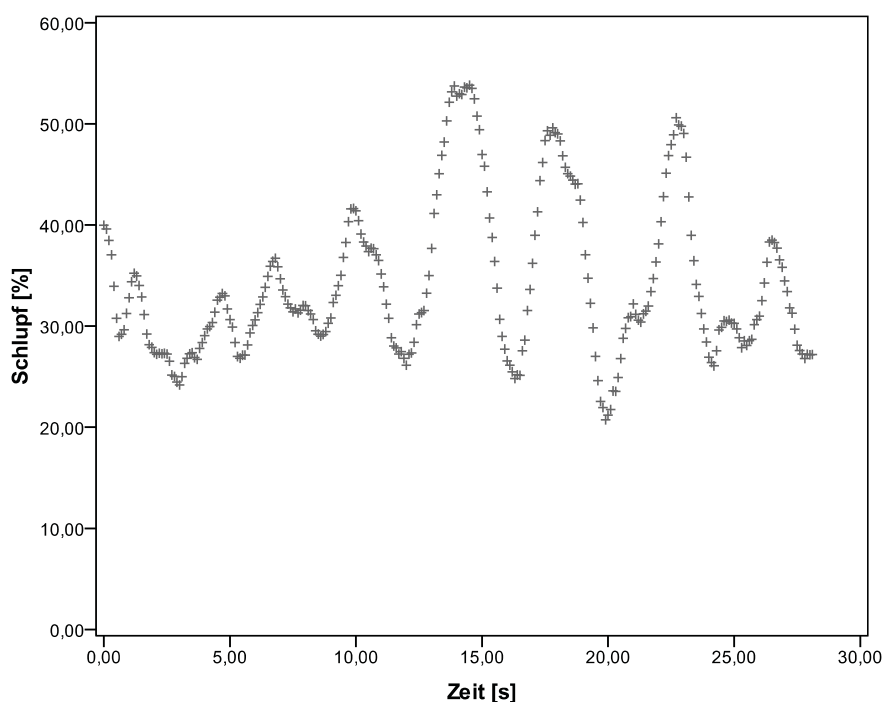


Abbildung 38: Schlupf über der Zeit für eine (Hanglagen-) Erstbefahrung mit neuen Reifen (Konfig. 2) bei einem Bodenwassergehalt von 39,2 % und einer Steigung von 18 %

Abbildung 38 zeigt exemplarisch für die Konfiguration 2 den Verlauf des Schlupfes über der gemessenen Zeit bei einer befahrenen Steigung von 18 % und einem Wassergehalt des Oberbodens von 39,2 %. Die gemessene Zeit ist dabei gleichbedeutend mit der zurückgelegten Strecke, wobei eine Umrechnung auf die befahrene Rückegassenlänge schwierig und der Informationsgewinn nur gering ist. Innerhalb der insgesamt knapp 30-sekündigen Messung zeigen sich deutliche Schwankungen des Schlupfes zwischen ca. 20 % und Werten von etwas unter 55 %. Bei dieser Versuchsserie handelt es sich um eine einzelne Befahrung, da eine wiederholte Nutzung bei den gegebenen Witterungsbedingungen wahrscheinlich zum Festfahren des Rückezugs geführt hätte. Aus den Traktionsmessungen in der Ebene ist bekannt, dass sich je nach Maschinenkonfiguration ein Zugkraftmaximum ergibt, nach dessen Überschreiten zusätzlicher Schlupf zum Abfall des Traktionsbeiwertes und somit zur Verringerung der befahrbaren Neigung führt. Angesichts der hohen Schlupfwerte für die in Abbildung 38 dargestellte Variante handelt es sich um einen Versuch an der Befahrungsgrenze durch den Forwarder. Der stark schwankende Verlauf lässt vermuten, dass sich kurz nach Erreichen der einzelnen Schlupfspitzen verbesserte Traktionsbedingungen

ergeben haben. Diese könnten beispielsweise auf den Eingriff in tiefere Bodenschichten oder gar die Wurzelschicht des Bestandes zurückzuführen sein. Dadurch kommt es kurzfristig zu einer verbesserten Abstützung der Antriebskräfte und somit reduziertem Schlupf.

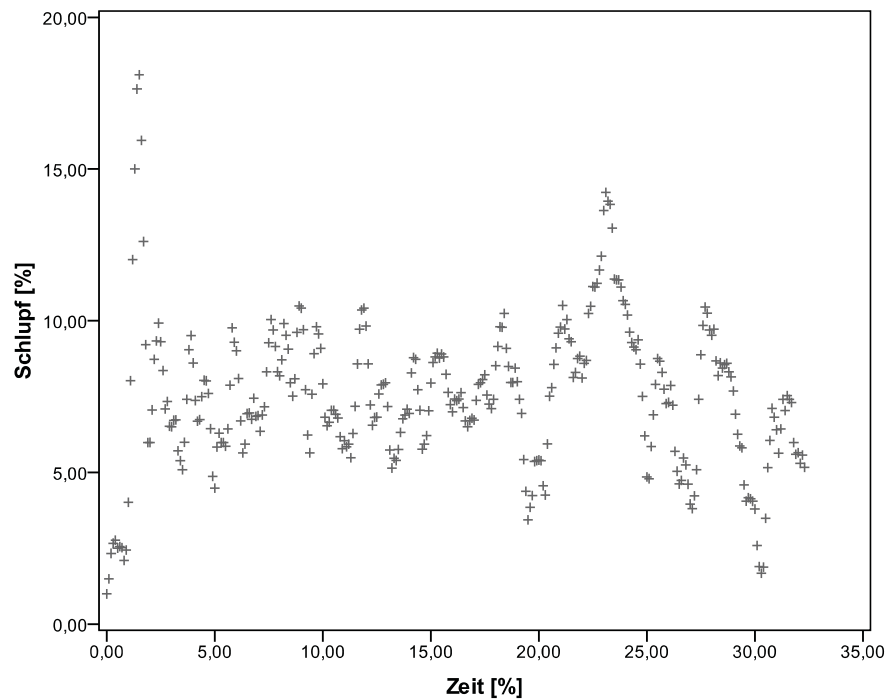


Abbildung 39: Schlupf über der Zeit für eine (Hanglagen-) Erstbefahrung mit gebrauchten Reifen (Konfig. 0) bei einem Bodenwassergehalt von 26,6 % und einer Steigung von 30 %

Ein gänzlich anderes Bild zeigt sich für die erste Befahrung einer 30 % Steigung mit gebrauchten Reifen bei 26,6 % Bodenwassergehalt. Angesichts der geringen Bodenfeuchte kommen deutlich geringere Schlupfwerte vor, die zudem keine deutlichen Anstiege oder Abfälle erkennen lassen. Der Schlupf variiert während der Befahrung zwischen nahezu schlupffreier Fahrt und 18 % Schlupf. Das Gros der Messwerte zeigt sich jedoch im Bereich zwischen 5 % und 10 % Schlupf. Daraus resultiert ein mittlerer Schlupfwert während der ersten Befahrung von 7,5 %. Bezogen auf die übrigen Validierungsfahrten stellen die gezeigten Abbildungen typische Verläufe dar. Bei höheren mittleren Schlupfwerten kommt es zu größeren Variationen der Messdaten, während Befahrungen bei günstigen Traktionsbedingungen zu den in Abbildung 39 dargestellten Punktwolken mit geringer Streuung führen.

5.5.3 Überprüfung der Grenzneigungsprognosen

5.5.3.1 Konfiguration 0

Für die Standardvariante mit gebrauchten Rädern und einem Reifeninnendruck von 2,7 bar stehen insgesamt sieben Versuchsserien in Hanglagen zur Verfügung. Tabelle 19 zeigt neben den wichtigsten Versuchsparametern die mittleren und maximalen Schlupfwerte der Messungen und die Grenzneigungsangabe des Prognosemodells. Messungen, bei denen die befahrene Steigung die prognostizierte Neigungsangabe übersteigt, sind dabei grau hinterlegt. Ein Blick auf den Mittelwert des Schlupfes zeigt, dass für diese Varianten das anvisierte Schlupfmaximum von 25 % überschritten wird. Die Befahrungen bei 24 % und 28 % Steigung weisen zudem sehr hohe maximale Schlupfwerte auf, sodass es sich hier um Versuche nahe der Befahrungsgrenze handelt. Insbesondere die Bewältigung der 24 % Steigung ist mit dem Rückzug nicht gelungen, obwohl hier die geringste Differenz zwischen Prognosewert und tatsächlicher Geländeneigung zu verzeichnen ist.

Die übrigen Versuchsserien mit höheren Prognosewerten zeigen die erwarteten geringeren Schlupfwerte, die im Mittel unter 10 % liegen. Selbst die Schlupfmaxima dieser Messungen unterschreiten die bodenökologische Grenze von 25 %, sodass hier keine erhöhte Erosionsgefahr durch die Befahrung zu erwarten ist. Anhand der Mittelwerte des gemessenen Schlupfs lassen sich die Versuche zudem nach dem Unterschied zwischen befahrener Steigung und berechneten Grenzneigung sortieren. Mit einer Differenz von 12 % zwischen den Neigungsangaben ergibt sich mit durchschnittlich 6 % Schlupf der geringste Wert bei 21 % Neigung. Demgegenüber steht die Befahrung der 24 %-igen Steigung bei einem mittleren Schlupf von 9 % und einer Differenz zwischen befahrener Steigung und der Angabe des Prognosemodells von 7,5 %.

Tabelle 19: Vergleich zwischen realisiertem Schlupf und der Grenzneigungsprognose für die Validierungsfahrten mit der Konfiguration 0

Steigung (%)	Wassergehalt (%)	Skelettanteil (%)	Schlupf (%)			Anzahl (N)	Grenzneigungsprognose (%)
			Mittelwert	Maximum	Standardabw.		
15	34,6	0	8,97	22,52	5,22	1.846	25,9
21	33,3	5	6,46	15,18	2,56	3.124	33,2
24	35,4	23,5	9,34	22,26	4,10	1.501	31,5
24	39,2	0	70,37	99,80	17,13	680	22,1
28	40,9	0	33,36	99,89	18,09	1.205	20,7
30	26,6	2,75	8,84	24,69	3,86	2.780	38,8
33	28,8	0	33,29	56,07	10,49	2.530	30,7

Für die Befahrungen mit der Standardvariante zeigt sich insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen den bodenökologisch befahrbaren Neigungen und den berechneten Grenzneigungen des Prognosemodells. Insbesondere die Versuche mit unkritischen Steigungen bestätigen diesen Eindruck, während die teilweise geringen Überschreitungen der Prognoseneigung bereits zum deutlichen Anstieg des Schlupfs über den Grenzwert von 25 % führen.

5.5.3.2 Versuche mit Traktionshilfsmitteln

Tabelle 20: Vergleich zwischen realisiertem Schlupf und der Grenzneigungsprognose für die Validierungsfahrten mit Traktionshilfsmitteln (Konfiguration 1 und 4)

Maschinen-konfi-gurati-on	Steigung (%)	Wasser-gehalt (%)	Skelett-anteil (%)	Schlupf (%)			Anzahl (N)	Grenzneigungs-prognose (%)
				Mittelwert	Maximum	Standardabw.		
1	28	30,9	0	9,10	25,24	4,68	2.317	42,6
1	33,5	33,9	2,25	8,98	19,57	2,63	3.672	46,3
1	40	28,7	9,4	12,64	42,13	5,29	3.229	50,6
4	23	34,6	0	5,58	30,35	3,37	6.649	33,5

Lediglich vier Versuchsserien in Hanglagen wurden mit Traktionshilfsmitteln absolviert. In Tabelle 20 sind die realisierten Ergebnisse der Schlupfmessungen mit Ketten und Bändern sowie dem alleinigen Einsatz von Bändern dargestellt. Für alle Testserien liegen die Grenzneigungsangaben deutlich über den Neigungen der befahrenen Standorte. Dies wirkt sich auf die mittleren Schlupfwerte aus, die durchweg unterhalb der kritischen 25 %-Marke sind. Lediglich die Maxima weisen in drei Fällen die Überschreitung dieser Grenze aus. Wie umfangreich diese jedoch sind, lässt sich hier nicht erkennen. Für die Fahrten bei 23 % und 28 % Hangneigung sind jeweils zwei Messwerte zu verzeichnen, die 25 % Schlupf überschreiten, während bei 40 % Geländeneigung insgesamt 32 Messwerte diese Grenze übersteigen. Bezogen auf die Gesamtanzahl entspricht dies unter ein Prozent, sodass alle Versuchsserien mit Traktionshilfsmitteln die Schlupfgrenze von 25 % deutlich unterschreiten und so vor dem Hintergrund der verstärkten Bodenerosion als unkritisch zu betrachten sind.

5.5.3.3 Konfiguration 2

Versuche mit den neuen Reifen und einem Reifeninnendruck von 2,7 bar bilden die Konfiguration 2. Wie in Tabelle 21 ersichtlich, wurden sechs Validierungsfahrten bei unterschiedlichen Geländeneigungen und Bodenwassergehalten mit dieser Konfiguration durchgeführt. Für die Hälfte der Versuchsserien ist dabei die berechnete Grenzneigung des Prognosemodells geringer als die befahrene Steigung. Während die Unterschiede bei 26 % und 28 % Geländeneigung recht deutlich sind, bewegt sich die Befahrung der 39 %-igen Steigung nur knapp über dem Prognosewert. Daraus resultiert ein mittleres Schlupfniveau, das mit 23 % nur knapp die Grenze von 25 % Schlupf unterschreitet. Anders sieht es für die Versuchsserie bei 26 % Steigung aus, da hier mit einem deutlich höheren Schlupfniveau zu rechnen wäre. So beträgt der mittlere Schlupf lediglich 8 %, obwohl die Grenzneigungsprognose um zwei Prozent überschritten wurde. Zudem kommen nur sehr wenige Werte über 25 % Schlupf vor, und der Maximalwert ist mit 28 % ebenfalls auffallend gering.

Tabelle 21: Vergleich zwischen realisiertem Schlupf und der Grenzneigungsprognose für die Validierungsfahrten mit der Konfiguration 2

Steigung (%)	Wassergehalt (%)	Skelettanteil (%)	Schlupf (%)			Anzahl (N)	Grenzneigungsprognose (%)
			Mittelwert	Maximum	Standardabw.		
13	38,4	0	16,07	67,15	5,35	2.408	22,8
18	39,2	0	34,23	53,82	7,75	282	22,1
24	29	12	4,21	15,01	2,47	1.600	36,8
26	44,7	1,5	8,40	28,27	5,03	1.353	23,7
28	39,2	0	92,25	99,49	7,14	53	22,1
39	27,7	9,4	23,18	77,14	12,77	1.279	37,8

Demgegenüber stellen sich die Befahrungen scheinbar unkritischer Hangneigungen als teilweise problematisch dar. Insbesondere die Versuchsserie bei 18 % Steigung fällt hier mit deutlich höheren Schlupfwerten auf. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass es sich bei der Befahrung um eine zeitnahe Wiederholungsnutzung bei hohem Bodenwassergehalt handelte. Durch die vorhergehende Befahrung hatte sich eine stark verdichtete Bodenschicht gebildet, deren Auflage infolge der feuchten Witterung zudem sehr rutschig war. Innerhalb des stark verdichteten Horizonts hatte der Wassergehalt deutlich abgenommen, sodass der gemessene Wert von 39,2 % die Situation in der Kontaktfläche nicht exakt widerspiegeln konnte. Ähnliches gilt für die Versuchsserie bei 13 % Neigung, da hier aufgrund der insgesamt feuchten Witterung zum Zeitpunkt der Messungen mehrere Versuchsvarianten auf einer Rückegasse bei vergleichsweise geringer Geländeneigung absolviert wurden. Obwohl die Messungen immer noch die Prognose der gefahrlosen Befahrbarkeit bestätigen, zeigt sich ein vergleichsweise hoher Mittelwert sowie ein ebensolches Maximum von 67 % Schlupf.

Insgesamt werden für die Versuchsserien mit Neureifen einige Probleme der Erhebungen deutlich. Es zeigt sich aber auch, dass alle als befahrbar eingeschätzten Steigungen sowie jene nahe der Prognosewerte eine zuverlässige Befahrung der Neigungen ermöglichen. Probleme sind daher vielmehr auf die Bemessung des Wassergehalts im Oberboden bei zeitnaher wiederholter Befahrung verdichteter Gassen zurückzuführen.

5.5.3.4 Versuche mit reduziertem Reifeninnendruck

Tabelle 22 zeigt die Ergebnisse der Validierungsfahrten mit reduziertem Reifeninnendruck sowohl für den gebrauchten Rädersatz (Konfig. 5), als auch für die Neureifen (Konfig. 6). Die grau hinterlegten Zeilen weisen dabei Versuchsserien aus, deren befahrene Hangneigung über dem ökologischen Grenzwert des Prognosemodells liegt. Mit Ausnahme der 38 % Steigung bewegen sich die befahrenen Neigungen jedoch nur ganz knapp oberhalb der Prognosewerte. Entsprechend zeigt sich für die Messungen bei 32 % Hangneigung eine Unterschreitung der 25 % Schlupfgrenze, während der Mittelwert der 28 % Versuchsserie mit 29 % Schlupf über dem Grenzwert liegt.

Tabelle 22: Vergleich zwischen realisiertem Schlupf und der Grenzneigungsprognose für die Validierungsfahrten mit reduziertem Reifeninnendruck (Konfiguration 5 und 6)

Maschinen-konfiguration	Steigung (%)	Wasser-gehalt (%)	Skelett-anteil (%)	Schlupf (%)			Anzahl (N)	Grenzneigungs-prognose (%)
				Mittelwert	Maximum	Standardabw.		
5	18	38,2	0	6,98	18,78	3,52	1.539	22,9
5	25	37,9	12	6,06	18,63	3,96	2.186	29,4
5	28	32,5	0	29,24	48,03	9,41	2.111	27,7
5	30	36,7	1,8	10,47	32,71	5,33	1.789	30,4
6	32	29	0	8,06	22,64	4,16	1.639	30,6
6	38	38,9	12,75	6,50	18,39	3,10	1.546	28,5

Für die als unkritisch eingestuften Tests ergibt sich durch die Validierungsfahrten eine Bestätigung dieser Einschätzung. Die mittleren Schlupfwerte reichen von 6 % bis knapp über 10 %. Zudem überschreiten, mit Ausnahme der befahrenen 30 % Steigung, die Maximalwerte die 25 % Grenze ebenfalls nicht. Mit lediglich acht Messwerten über der Grenze (25 % Schlupf) lässt die Versuchsserie bei 36,7 % Bodenwassergehalt außerdem auch keine stärkere Schädigung des Oberbodens erwarten.

5.5.3.5 Versuche mit beladenem Rückezug

Für acht Versuchsserien wurde der Einfluss der Zuladung auf die Validierungsfahrten untersucht. In Tabelle 23 sind die Ergebnisse der betreffenden Messungen dargestellt. Die Variante bei 16 % Steigung lässt sich dabei nur begrenzt betrachten, da aufgrund des hohen Skelettgehalts kein Wassergehalt des Oberbodens ermittelt werden konnte. Entsprechend ist die Berechnung einer Grenzneigung für diese Bedingungen nicht möglich. Angesichts des stark skeletthaltigen Untergrunds ist die Befahrung dieses geschobenen Rückewegs ohnehin als unproblematisch zu betrachten, zumal die gemessenen Schlupfwerte diesen Eindruck unterstützen.

Tabelle 23: Vergleich zwischen realisiertem Schlupf und der Grenzneigungsprognose für die Validierungsfahrten mit beladenem Rückezug (Konfigurationen 10 bis 16)

Maschinen-konfiguration	Steigung (%)	Wasser-gehalt (%)	Skelett-anteil (%)	Schlupf (%)			Anzahl (N)	Grenzneigungs-prognose (%)
				Mittelwert	Maximum	Standardabw.		
10	18	39,6	0	14,99	29,28	5,39	1.730	21,8
10	28	38,8	0	34,12	60,15	10,93	294	22,4
11	23	33,8	0	7,42	21,99	3,63	3.697	40,2
12	16	999	40	1,82	16,93	2,01	565	999
12	24	38,2	0	49,17	99,74	22,22	552	22,9
15	11	35,1	0	5,56	22,09	3,60	1.687	25,5
16	25	35,4	23,5	6,16	14,63	2,70	1.768	31,5
16	29	31,3	0	8,31	18,78	3,83	3.380	28,7

Für die übrigen vier Messungen bei geringeren Steigungen, als durch das Prognosemodell für 25 % Schlupf berechnet, zeigen sich mittlere Schlupfwerte deutlich unterhalb der Grenze. Lediglich die Befahrung eines 18-prozentigen Hanges weist vereinzelt Schlupfmesswerte oberhalb von

25 % auf. Angesichts des vergleichsweise geringen Maximalwerts stellen alle nicht grau hinterlegten Versuchsserien eine Bestätigung der Grenzneigungen dar, da deren Unterschreiten die Einhaltung der 25 % Schlupfgrenze sicherstellt.

Von den drei grau hinterlegten Messungen, bei höheren Steigungen als durch das Prognosemodell vorgegeben, weisen zwei eine deutliche Überschreitung der 25 % Schlupf auf. Die Versuchsserie bei 29 % Steigung ist fast identisch mit der Grenzneigungsangabe des Modells, sodass auch hier das Einhalten der Schlupfgrenze möglich ist. Überraschend ist dabei, dass selbst der Maximalwert eine bodenökologisch vertretbare Befahrung durch den beladenen Rückezug ausweist. Demgegenüber ergeben sich für die übrigen zwei grau hinterlegten Versuchsserien deutlich höhere Schlupfwerte, und bei den Messungen mit 24 % Geländeneigung wird sogar die Befahrbarkeitsgrenze erreicht.

5.5.3.6 Zusammenfassung

Von den insgesamt 31 Validierungsfahrten wurden 19 anhand des Prognosemodells für befahrbar mit maximal 25 % Schlupf bestimmt. Lediglich eine dieser Versuchsserien wies einen höheren mittleren Schlupf auf, während die übrigen 18 Tests zu weit überwiegend geringeren Schlupfwerten führten. Für die Befahrung von Steigungen oberhalb der bodenökologisch motivierten Grenzneigungsangabe ergeben sich für sieben von zwölf Messungen deutliche Überschreitungen des Grenzwertes. Eine Versuchsserie weist einen mittleren Schlupf knapp unterhalb der 25 % Grenze auf, wobei der Maximalwert die Grenze deutlich übertrifft. Für vier Versuchsserien zeigt sich ein deutlich besseres Traktionsverhalten als erwartet, sodass trotz größerer Steigungen eine Befahrung mit geringem Schlupf möglich ist.

Die Einhaltung der berechneten Grenzneigungen hätte somit in lediglich einem Fall zu einer bodenökologisch unangemessenen Befahrung mit zu hohem Schlupf geführt. Für vier Varianten wäre eine Befahrung unterblieben, obwohl diese ohne größere Bodenschäden durch Schlupf möglich gewesen wäre. Mit 26 richtig eingeschätzten von insgesamt 31 Validierungsfahrten zeigt sich eine Übereinstimmung zwischen dem Grenzneigungsmodell und den Kontrollversuchen von über 80 %.

6 Diskussion

6.1 Erhebungsmethodik

6.1.1 Traktionsmessungen

6.1.1.1 Zugkraftmessung

Im Gegensatz zu anderen Windenmessverfahren (vgl. u.a. MACMILLIAN 2003a-c) wird die Kraft unmittelbar am Fahrzeug erhoben und nicht, an der Winde durch die Bestimmung von Anpressdrücken in Verbindung mit Reibwerten einer Bremsanlage. Beeinflussungen des Messwertes ergeben sich daher vor allem aus der Funktionsweise der Bremswinde sowie den minimalen Elastizitätseigenschaften des Stahlseils (vgl. Kap. 6.1.1.3).

Eine weitere Fehlerquelle ist die Messunsicherheit des Kraftaufnehmers, die mit maximal 0,1 % des Messbereichsendwertes angegeben wird. Der Aufnehmer verfügt über ein Messspektrum von 200 kN in Druck- und Zugrichtung, woraus sich ein maximal möglicher Fehler von 200 N ergibt. Angesichts der hohen Fahrzeugzugkräfte, die während der Abbremsungen mehrheitlich im Bereich bis 100 kN gemessen wurden, ergeben sich nur geringe mögliche Abweichungen. Für einen Messwert von 40 kN bedeutet die Messunsicherheit von 0,1 % des Messbereichsendwertes einen Fehler von 0,5 %. Angesichts der Messbedingungen, die sich nicht mit Laboranwendungen vergleichen lassen, ist der mögliche Fehler durch das Messgerät zu vernachlässigen.

6.1.1.2 Geschwindigkeiten

Für die Bestimmung des Schlupfes ist die Ermittlung von zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten erforderlich: Fahrzeug- und Radumfangsgeschwindigkeit. Um aus den gelieferten Frequenzen der inkrementalen Messaufnehmer (vgl. Kap. 3.6.4) die zugehörigen Geschwindigkeiten zu bestimmen, muss der Umfang des Messrades bzw. eines Antriebsrades bekannt sein. Der Umfang des verformungsfreien Messrades ist nahezu fehlerfrei über den Durchmesser zu bestimmen. Für die Antriebsräder stellt sich dies jedoch deutlich schwieriger dar. So verformt sich der Reifen durch die Auflast, und der dynamische Halbmesser nimmt im Vergleich zum unbelasteten Rad ab.

In der Literatur sind unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung des dynamischen Halbmessers bekannt (vgl. Kap. 2.2). Diese lassen sich jedoch nicht ohne Fehler auf den Forwarder übertragen. Daher gestaltet sich die Festlegung der Radumfänge für die unterschiedlichen Maschinenkonfigurationen schwierig. Hinzu kommt, dass für die Varianten mit Traktionshilfsmitteln eine Verschiebung zu erwarten ist. Durch die gesperrten Differentiale des Antriebs müssten sich alle Räder gleich schnell drehen. Die Montage der Bänder und Ketten führt hingegen zu einer Verlängerung des Abrollweges, da die Traktionshilfsmittel über die Reifen gespannt werden. Es werden jedoch nicht alle Räder der Maschine mit Ketten oder Bändern ausgestattet, sodass beispielsweise

bei Versuchen mit Bändern das bemessene Rad weiterhin den gleichen Abrollumfang hat wie für die Standardvariante. Das Verhalten der Maschine verändert sich jedoch insgesamt, da durch die Bänder auf den hinteren Bogies der Abrollumfang angewachsen ist. Für das bemessende Vorderrad ergibt sich daraus ein zusätzliches „schiebendes“ Moment, das zu leichtem Bremsschlupf führen müsste.

Die eigentliche Bestimmung der Radumfänge für jede Konfiguration erfolgte daher anhand des Verlaufs der Zugkraftkurven. Den Einfluss unterschiedlicher Radumfangswerte zeigt Abbildung 40 durch einen Vergleich der Streuwolken aus Traktionsbeiwerten über dem Schlupf für drei verschiedene Werte. Neben dem tatsächlich verwendeten Radumfangswert (blau) wird dieser einmal um 5 % erhöht (beige) bzw. verringert (grün), um die jeweiligen Auswirkungen zu zeigen. Insbesondere der Vergleich der grünen und der beige Punktwolke verdeutlicht die Unterschiede. So sind bei reduziertem Radumfang (grün) weniger Datenpunkte vorhanden, und diese fehlen vorwiegend im Bereich geringen Schlupfs. Dadurch ergeben sich in diesem Bereich erheblich höhere Traktionsbeiwerte als für die beiden anderen Radumfangsvarianten. Der beige Variante fehlen demgegenüber Datenpunkte bei geringem Schlupf. Die Punktwolken zeigen somit erhebliche Unterschiede, die sich vorwiegend auf den Bereich geringen Schlupfes konzentrieren.

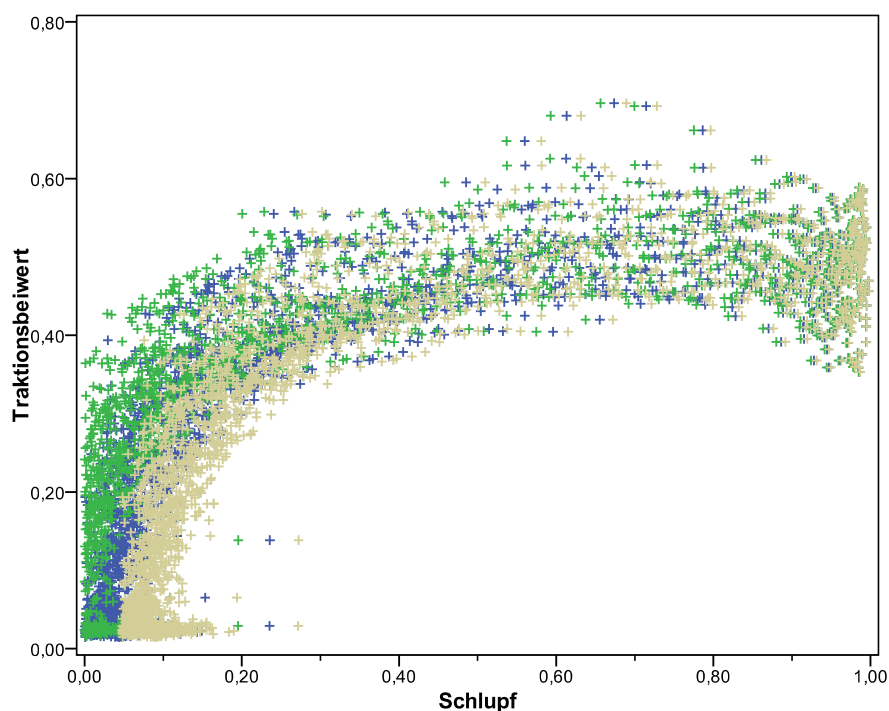


Abbildung 40: Streuwolke aus Traktionsbeiwerten und Schlupf für drei unterschiedliche Radumfänge (grün: um 5 % reduzierter Radumfang; blau: „richtiger“ Radumfang; beige: um 5 % erhöhter Radumfang)

Dies wird bestätigt, wenn anhand der Daten kubische Ausgleichskurven bestimmt und die Prognosen für die ökologisch noch befahrbare Hangneigung bei 25 % Schlupf berechnet werden. Auf Basis des im Hauptdatensatz verwendeten Radumfangs ergibt sich eine Neigung von 41 %, während sich bei reduziertem Abrollumfang eine 2 % höhere Neigung bestimmt. Umgekehrt verringert sich die prognostizierte Neigung um 5 % bei gestiegenem Radumfang, da bei gleicher Fahrsituation ein höherer Schlupf zugrunde liegt. Angesichts der mit 5 % Umfangsveränderung

deutlichen Verschiebung des dynamischen Halbmessers ergeben sich nur vergleichsweise moderate Unterschiede in der Prognose für eine ökologische Grenzneigung. Die Auswirkungen der verschiedenen Radien auf die maximal befahrbare Hangneigung ist zu vernachlässigen, da die höheren Traktionsbeiwerte erhalten bleiben und sich lediglich die Verteilung in den Schlupfstufen verschiebt. Dass insbesondere der Bereich geringen Schlupfes sensibel für die Veränderungen ist, zeigen die befahrbaren Geländeneigungen bei 20 % Schlupf. Die Unterschiede sind jedoch auch hier mit 4 % bzw. 6 % noch vertretbar, sodass Unsicherheiten beim Radumfang und damit beim Antriebsschlupf die Prognosen nur geringfügig beeinflussen, zumal sich zwischen den einzelnen Versuchsserien einer Konfiguration bereits deutliche Unterschiede zeigen, die nicht immer anhand der vorhandenen Versuchsinformationen erklärt werden können.

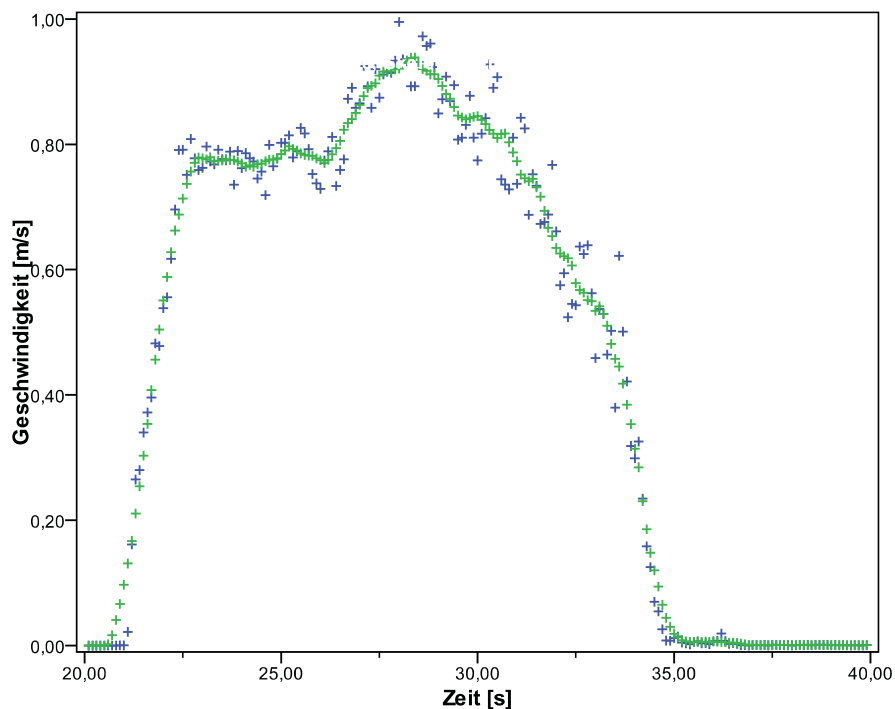


Abbildung 41: Vergleich zwischen originären Messdaten (blau) für die tatsächliche Geschwindigkeit und den gleitenden Mittelwerten (grün)

Obwohl der Umfang des Messrades für die Geschwindigkeit über Grund eindeutig und mit einem sehr geringen Fehler zu bestimmen ist, sind auch hier einige Anmerkungen erforderlich. Der Faden zum Antrieb des Messrades wird auf einer „Angelrolle“ gespeichert, über deren Bremse die erforderliche Spannung für den Reibschluss mit der Messradoberfläche hergestellt wird. Durch die Funktionsweise der Bremse kommt es zu hochfrequenten Schwankungen der gemessenen Geschwindigkeit. Diese werden durch die Bildung eines gleitenden Mittelwertes aus zehn Messwerten (vgl. Kap. 4.2.2) erfolgreich eliminiert, ohne die tatsächliche Geschwindigkeit übermäßig zu beeinflussen. Abbildung 41 zeigt die originären Messdaten (blau) sowie den Verlauf der gleitenden Mittelwerte (grün). Deutlich zu erkennen sind die Schwankungen der ursprünglichen Daten und der gute Ausgleich durch die behandelten Messdaten. Letztere weisen einen plausibleren Verlauf der Geschwindigkeit über Grund aus und werden daher für die Berechnung des Schlupfs eingesetzt.

Für den Antrieb des Messrades kommt eine geflochtene Angelsehne zum Einsatz, die nahezu dehnungsfrei ist. Die minimal vorhandene Dehnung von unter 1 % hat keinen erkennbaren Einfluss auf die Messergebnisse. Federnde Elemente in der Aufhängung der Spill-Konstruktion wirken sich dagegen nur zu Beginn des Fahrspiels und bei den sehr geringen Geschwindigkeiten vor Erreichen der Durchdrehgrenze an den Antriebsrädern aus. Die anfänglich erhobenen Werte werden jedoch nicht in die Auswertung einbezogen, da die Fahrgeschwindigkeit der Antriebsräder zu diesem Zeitpunkt unter 0,2 m/s liegt. Im Bereich hohen Schlupfs haben die möglichen Fehlerquellen der Fadengeschwindigkeit nur geringen Einfluss, da der Unterschied zwischen Antriebsgeschwindigkeit und der Bewegung über Grund sehr groß ist. Für die Schlupfberechnung ändert sich dadurch nicht viel, sodass die Traktions-Schlupfkurven keine Auffälligkeiten erkennen lassen.

Für landwirtschaftliche Anwendungen wird die Geschwindigkeit über Grund oftmals durch einen Radarsensor erfasst. Die Ermittlung der Geschwindigkeit beruht dabei auf dem Doppler-Effekt. Dieser beschreibt eine Frequenzänderung der Radarwellen, wenn sich Quelle und Beobachter einander nähern oder sich voneinander entfernen. Der Doppler-Effekt tritt auch bei Echos auf, sodass sich aus der Frequenzänderung Geschwindigkeiten berechnen lassen (GREHN UND KRAUSE, 1998). Diese Messvariante ist dabei unabhängig von der Fahrdistanz und relativ unempfindlich gegen Störungen. Der Einsatz bei den geringen Geschwindigkeiten des Versuchs sowie den stark wechselnden Untergrundeigenschaften durch Bewuchs und Reisigauflage hat jedoch seine Grenzen. Unter den vergleichbaren Bedingungen der SliFor-Studie (vgl. JACKE ET AL., 2004; HITTENBECK, 2004) führte der Einsatz eines Radarsensors zu einer deutlichen Veränderung der Traktions-Schlupfkurven, die teilweise auf eine träge Messwerterfassung zurückzuführen war. Aktuelle Versuche mit der Einbindung eines Radarsensors in die hier beschriebene Messtechnik im Rahmen des Projektes CTI-Holz (vgl. BROKMEIER ET AL., 2009) bestätigen diesen Eindruck. Während die Messwerte auf Waldwegen sehr plausibel erscheinen und die Fahrbewegung eines Versuchslastkraftwagens gut wiedergeben, zeigt sich eine deutliche Zeitverzögerung im Ansprechverhalten des Radarsensors. Für die geringen Geschwindigkeiten bei den Traktionsmessungen gepaart mit der kurzen Abbremsphase bildet der Einsatz eines Radarsensors daher keine Alternative für die Versuche. Für die Steuerung einer Schlupfregelung in Forstmaschinen, wie sie WEISE UND JIRIKOWSKI (2008a) fordern, wäre ein Einsatz dieser Technik jedoch durchaus denkbar, da die Anforderungen an das Ansprechverhalten hier geringer sind.

6.1.1.3 Verzögerungstechnik

Eigens für die Traktionsmessungen wurde eine Verzögerungstechnik auf Basis einer Seilwinde konstruiert (vgl. Kap. 3.7). Hintergrund hierzu war der Ersatz eines früher genutzten zweiten Schleppers (JACKE ET AL., 2004) zum Bremsen durch eine mobil einsetzbare Einrichtung. Zudem sollten die stark variierenden Abbremsungen in Folge der manuellen Betätigung der Betriebsbremse durch einen standardisierten Prüfzyklus ersetzt werden. Die daraus entstandene Bremswinde hat sich während der Versuche bewährt und konnte bereits für andere kleinere Projekte eingesetzt werden. Bei BLOCK (2008) ist der Einsatz bei der vergleichenden Bemessung von Flurförderfahrzeugreifen (Gabelstapler) beschrieben. Darüber hinaus konnte die Technik im Rahmen einer Kooperation mit dem Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V. (KWF) für die Traktionsbemessung eines Raupenharvesters eingesetzt werden (HITTENBECK, 2007b; WEISE UND

JIRIKOWSKI, 2008a+b; JACKE UND HITTENBECK, 2009). Aktuell erfolgt die Verwendung der Bremswinde bei der Untersuchung von Lastwagen zum Rohholztransport (BROKMEIER ET AL., 2009). Die verschiedenen Messobjekte zeigen die breiten Einsatzmöglichkeiten der Verzögerungstechnik bei Fahrzeugen unterschiedlicher Traktionspotentiale.

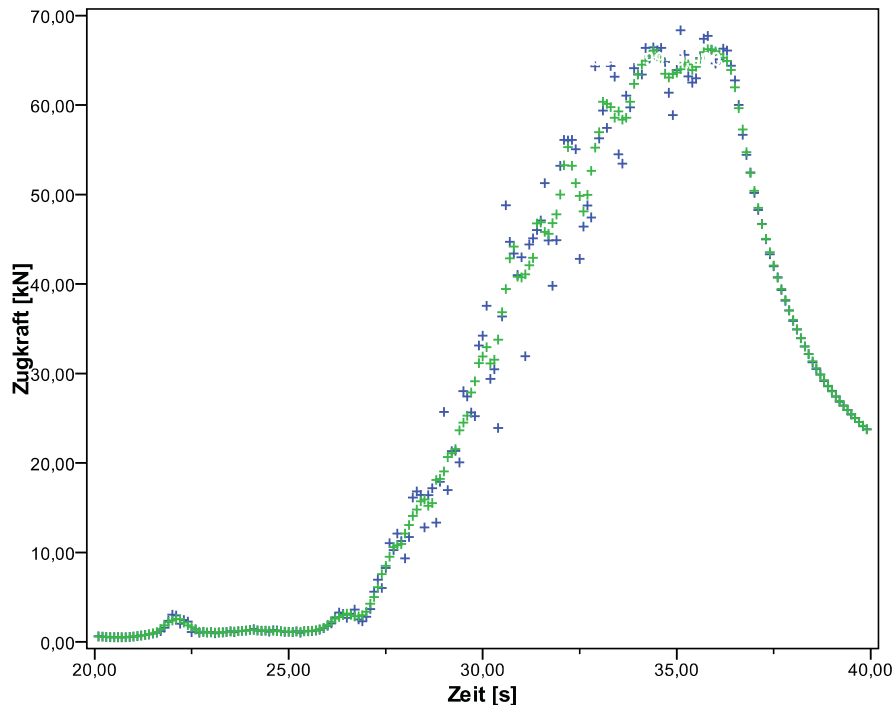


Abbildung 42: Vergleich zwischen originären Messdaten (blau) für die tatsächliche Geschwindigkeit und den gleitenden Mittelwerten (grün)

Trotz vielfältiger Möglichkeiten bleibt der Einsatz der Bremswinde nicht ohne Schwierigkeiten, die vorwiegend durch die Steuerung der pneumatischen Bremsanlage entstehen. Diese erzeugt einen stufenweisen Anstieg des Bremsdrucks. Dadurch wird das Seil nicht immer gleichmäßig von der Winde gespult, was sich auf die gemessenen Zugkräfte auswirkt. Diese zeigen neben der deutlichen Tendenz zur Zunahme während des Messzyklus eine sichtliche Schwankung. Abbildung 42 präsentiert die originären Messwerte (blau) und die für die spätere Auswertung verwendeten gleitenden Mittelwerte (grün) der Zugkraft. Anhand der blau dargestellten Ausgangsdaten wird die Schwankung der Messwerte deutlich. Nach einem rapiden Anstieg der Kräfte brechen diese zusammen und steigen kurz darauf wieder an. Die hochfrequenten Schwankungen sind dabei auf die Steuerung und die federnden Eigenschaften der Befestigung sowie des Seils zurückzuführen. Durch die Fahrbewegung wird das gesamte System gespannt, bis die Zugkraft die Haltekraft der Bremse übersteigt. Daraufhin beginnen sich die Seiltrommel und damit die Brems Scheibe zu drehen. Die Reibkräfte zwischen den Bremsbelägen und der Brems Scheibe sind nun etwas geringer als die Kraft im statischen Zustand, sodass der Auszug etwas erleichtert wird und die Zugkräfte einbrechen. Durch den stufenweisen Anstieg des Bremsdrucks erhöhen sich die Reibkräfte, bis die Winde steht und das System erneut vorgespannt wird. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis der Forwarder nicht weiter in der Lage ist, die erforderlichen Kräfte gegen den Untergrund abzustützen. Die Amplituden der Zugkraftschwankungen sind dabei im Bereich der mittleren Zugkräfte am stärksten ausgeprägt.

Durch die ebenfalls in der Abbildung 42 dargestellten gleitenden Mittelwerte der Zugkraftmesswerte werden die Schwankungen wirkungsvoll eliminiert, ohne den Informationsgehalt der Zugkraftmessungen zu reduzieren. Für die Auswertung kommen daher die gleitenden Mittelwerte der Zugkraft zum Einsatz, da die originären Messwerte zu insgesamt unplausibler Streuung der Traktionsbeiwerte führen würden. Trotz der beschriebenen Probleme bewirkt die konstruierte Verzögerungstechnik einen vergleichbaren Ablauf der Messungen in allen Versuchen.

Die aufgetretenen Schwierigkeiten könnten für Teilbereiche durch eine veränderte Bremstechnik reduziert werden, dafür müsste jedoch auf die Abbremsung bis zum Fahrzeugstillstand verzichtet werden. So kommen in Leistungsprüfständen und bei Zugkraftmessungen durch die Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft e.V. (DLG) Wirbelstrombremsen zum Einsatz (ANONYMUS, 2003; LAUER, 2008). Diese eignen sich, solange der absolute Stillstand nicht gefordert wird bzw. unter konstanten Geschwindigkeiten. Für den hier untersuchten forstlichen Maschineneinsatz spielen jedoch auch geringe Geschwindigkeiten und das Verhalten beim Durchdrehen der Räder eine entscheidende Rolle. Während der ersten Versuche mit der Bremswinde wurden unterschiedliche Einstellungen der Steuerung und damit des Bemessungszyklus getestet. Der resultierende Prüfzyklus stellt dabei einen guten Kompromiss aus dem langsamen Anstieg der erforderlichen Zugkräfte zum Ausspulen des Seils und der Anforderung, möglichst viele Abbremsungen pro Seilauszug zu realisieren, dar.

Neben der Untersuchung von ganzen Fahrzeugen (vgl. u.a. PYTKA ET AL., 2006; STOILOV, 2007) werden für die meisten Traktionsmessungen auf gewachsenem Boden Einzelradtestvorrichtungen verwendet (vgl. u.a. WALCZYKOVA ET AL., 2002; YAHAYA ET AL., 2007; ANSORGE UND GODWIN, 2008). Dabei lässt sich eine weitere Unterteilung in Versuche unter standardisierten Bedingungen in einer Bodenrinne (vgl. u.a. REMPFER, 1998; ANSORGE UND GODWIN, 2007) und solche unter Feldbedingungen (vgl. u.a. STEINKAMPF, 1971; SCHNAUFER UND KUTZBACH, 1998), die mit angehängten Einzelradtestern arbeiten, treffen. Eine vergleichende Darstellung unterschiedlicher Bauweisen und der damit verbundenen Vorteile ist bei ZOZ UND GRISSO (2003) beschrieben. Für die vorliegende Fragestellung von Grenzneigungen beim Maschineneinsatz ist jedoch das Verhalten des gesamten Fahrzeugs entscheidend. Die Ergebnisse aus unterschiedlich belasteten Einzelradmessungen zusammenzurechnen ist zudem mit Fehlern behaftet, da beispielsweise der Multipass-Effekt (HOLM, 1972) berücksichtigt werden müsste. Durch die mehrfache Überrollung verbessert sich der Radwirkungsgrad der nachfolgenden Räder. Für den in Spur laufenden Forwarder sind dies immerhin drei Räder, die hintereinander den Untergrund überrollen. Hinzu kommt, dass für die Befahrung von Hanglagen auch die Gewichtsverteilung des Schleppers berücksichtigt werden muss (ENGEL, 1974). Zur Beantwortung der ursprünglichen Fragestellung nach Grenzneigungen ist daher die Erhebung mit einem kompletten Fahrzeug erforderlich.

6.1.2 Validierungsfahrten

Zur Überprüfung des Prognosemodells wurden Validierungsmessungen in Hanglagen durchgeführt. Schwierigkeiten bei der Bemessung ergaben sich aus den nur wenigen geeigneten Rückegassen für die Versuche. Insbesondere das Finden ausreichend langer Messstrecken mit gleichmäßiger Steigung gestaltete sich im Bereich des Forstamtes Reinhausen als äußerst schwer, da die Geländestrukturen vorwiegend durch kurze und steilere Hänge geprägt sind. Hinzu kommt die Buchenbestockung der Bestände, sodass die Flächen vielfach nicht auf eine Bewirtschaftung mit hochmechanisierter Erntetechnik ausgelegt sind. In den vielen und kleinen Kerbtälchen wird die Bewirtschaftung unterlassen oder die Bringung erfolgt über Seilschlepper von Rückewegen aus. Aufgrund der geringen Anzahl geeigneter Gassen in Reinhausen wurden diese daher mehrfach für die Validierungsfahrten genutzt.

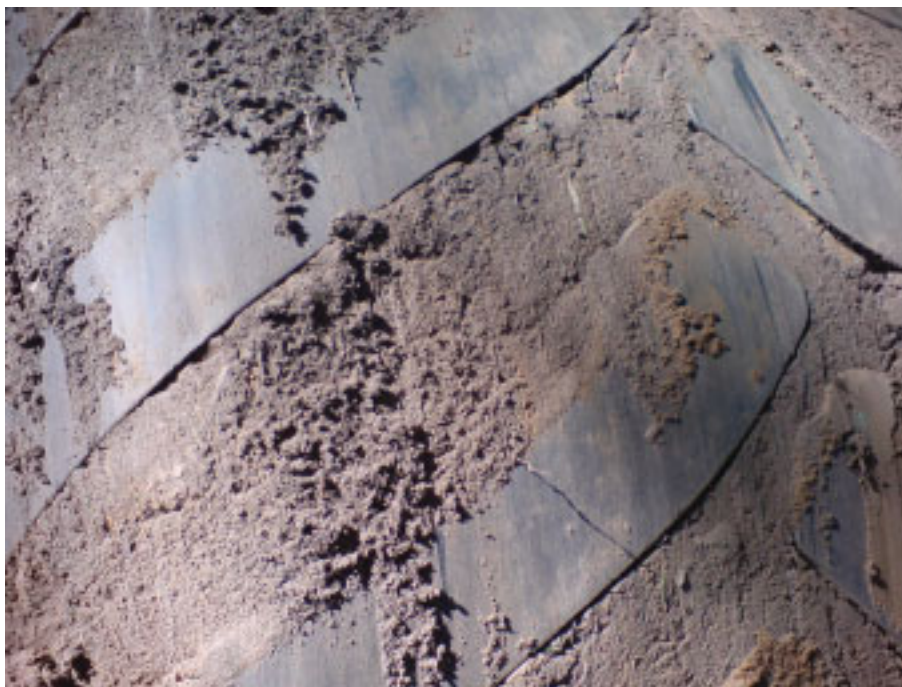


Abbildung 43: *Reifen mit zugesetztem Profil nach dem Versuch, eine Steigung von 28 % bei einem Bodenwassergehalt von 39,2 % zu befahren*

Zudem machte teilweise die feuchte Witterung zum Ende des Jahres 2007 eine wiederholte Befahrung der geringer ansteigenden Gassen im Abstand weniger Tage erforderlich. Dadurch hatte der Boden nicht die Möglichkeit, sich zu regenerieren. Es bildete sich eine stark verdichtete Bodenschicht, die für die weiteren Nutzungen zu einer rutschigeren Bodenoberfläche und veränderten Bodenwassergehaltswerten führte. Durch diese Sperrschicht wurde die formschlüssige Kraftübertragung zwischen den Reifen und dem Untergrund behindert. Zudem war der Wassergehalt der oberen Zentimeter deutlich höher als durch die TDR-Sonde angesprochen (vgl. Kap. 6.1.3.2), sodass die aufliegenden Bodenpartikel sehr schnell das Reifenprofil verschlossen. Abbildung 43 zeigt die neuen Reifen nach dem Versuch, eine solche Rückegasse mit einer Steigung von im Mittel 28 % bei 39,2 % gemessenem Bodenwassergehalt zu befahren. Im Laufe der Versuchsfahrt setzte sich das Reifenprofil zu und führte so zu einem permanenten Anstieg des Schlupfs. Die Selbstreinigung der Reifen wurde dabei durch die Bindigkeit des Bodens in Verbin-

derung mit dem hohen Wassergehalt nahezu komplett ausgeschaltet. Obwohl die Versuchsbedingungen den Prognosewert für 25 % Schlupf nur um eine zusätzliche Steigung von 6 % übertreffen, ist die Befahrung mit dem Forwarder nicht mehr möglich.

Neben der Geländetopographie und dem Bodenzustand beeinträchtigen in Fichten bestockten Flächen oftmals die deutlich hervorstehenden Pflanzenwurzeln die Kraftübertragung zwischen Reifen und Untergrund. Auf der Oberfläche sammeln sich so Humusanteile und Bodensubstrat, während unterhalb der Wurzeln eine geringe Auswaschung der Partikel festzustellen ist. Insgesamt entstehen so kleinräumige Wechsel der Steigungen durch einen teilweise treppenförmigen Anstieg der Gassenoberfläche. Zusätzlich bieten die Wurzeln den Reifen jedoch einen stabilen Kraftangriffspunkt, der das Fortkommen des Forwarders verbessert (SCHARDT ET AL., 2007). Dies ist insbesondere bei der Verwendung der Traktionshilfsmittel zu erwarten, da diese über die montierten Traktionsstollen sehr punktuell in den Bodenraum und die hochanstehenden Wurzeln eingreifen.

Trotz der genannten Schwierigkeiten bei der Auswahl der Rückegassen für die Vergleichsfahrten in Hanglagen konnten ausreichend Flächen gefunden werden, die den Ansprüchen des Versuchs genügten. Die teilweise kleinräumigen Unterschiede in der Steigung gleichen sich insgesamt über die Länge der Versuchsgassen aus, sodass der Einfluss auf die Ergebnisse eher gering einzuschätzen ist. Demgegenüber sind die Auswirkungen der zeitnah wiederholten Nutzung einiger Bereiche im Forstamt Reinhausen deutlich. So ist gerade die einzige vermeintliche Überschätzung durch das Prognosemodell für eine betroffene Rückegasse zu verzeichnen.



Abbildung 44: Fahrspur nach Befahrung einer Steigung von 23 % mit höherem Schlupf

Für die genauere Bestimmung der Grenzwertigkeit einzelner Befahrungen wären zusätzliche Zugkraftmessungen in Hanglagen sehr interessant gewesen. Dies hätte jedoch zum einen den Rahmen der Versuche überstiegen und zum anderen deutliche und nachhaltige Schäden an den sensiblen Standorten der Hanglagen hinterlassen. Exemplarisch sei in Abbildung 44 das Ergebnis einer Validierungsmessung in Hanglagen dargestellt. Eine zusätzliche Beanspruchung der Gasse

durch Traktionsmessungen mit durchdrehenden Rädern würde zu noch stärkeren Schäden und einer akuten Gefährdung der technischen Befahrbarkeit führen.

6.1.3 Bodenerhebungen

6.1.3.1 Hintergrund

Der Untergrund bestimmt neben den Endantriebskomponenten der Versuchsmaschine die übertragbaren Kräfte und damit die Mobilität des Rückezugs. Während die maschinenseitigen Ausstattungen klar und eindeutig zu bestimmen sind, ist der Untergrund sehr variabel und daher die Beschreibung und Erfassung der Versuchsbedingungen aufwändiger. Die erhobenen Bodenparameter unterliegen teilweise einer recht großen Variabilität zwischen den Versuchsbeständen und auch bereits innerhalb der einzelnen Versuchsgassen. Aufgrund der teilweise aufwändigen und kostenintensiven Messungen sind nicht für alle Parameter die erforderlichen Wiederholungen für eine zuverlässige Beschreibung der Böden erfolgt. Dies betrifft insbesondere die Analyse der Korngrößenverteilung und die Bemessung der Trockendichte.

6.1.3.2 Volumetrischer Bodenwassergehalt

Der in den Daten enthaltene volumetrische Bodenwassergehalt (Variable: *Feuchte*) für die einzelnen Versuchsserien beruht auf dem Mittelwert aus mindestens sechs Einzelmessungen. Für das Gros der Versuchsfahrten wurden jedoch um die zehn Einstiche mit der TDR-Sonde durchgeführt. Die Werte beinhalten somit die vorgefundene Variabilität des volumetrischen Wassergehalts der jeweiligen Versuchsgassen. Für einzelne Versuchsserien ergeben sich dabei deutliche Unterschiede zwischen den Einzelwerten, während andere Versuchstage sehr einheitliche Wassergehalte des Oberbodens lieferten.

Die Messungen mit der TDR-Sonde sind mit einigen Fehlerquellen versehen. So wird die Mindest-Messgenauigkeit für speziell kalibrierte Böden mit 1 Vol-% angegeben. Während der Versuche kam jedoch eine generalisierte Einstellung des Gerätes zum Einsatz, da eine Vielzahl unterschiedlicher Böden untersucht wurde. Für diesen Einsatzfall erhöht sich die Ungenauigkeit auf 5 Vol-%. Da die Zusammensetzung der befahrenen Böden jedoch vergleichbar mit dem voreingestellten Bodentyp des Datenloggers ist, ist von einer Messgenauigkeit zwischen ein und fünf Volumenprozent zu rechnen. Eine zusätzliche Fehlerquelle stellen Luftpolster im Boden dar, da diese die elektrische Verbindung zwischen den Messstäben und dem Boden behindern. Insbesondere beim nicht exakt geradlinigen Einstich in den Boden können solche Luftpolster entstehen. Eine weitere Ursache für Lufteinschlüsse ist das Verbiegen der Messstäbe, was häufig bei skeletthaltigen Böden auftritt. Letztere führen zudem durch kleinere Steine ebenso wie stärkere Pflanzenwurzeln im Messvolumen zu möglichen Abweichungen der Messwerte vom eigentlichen Bodenzustand.

Für einen Teil der Versuchsserien ergeben sich Schwierigkeiten mit der verwendeten Messsonde, da diese mit ca. 7 cm langen Messstäben arbeitet. Die dabei bemessenen Bodenschichten entsprechen für einige Versuche nicht dem Interaktionsraum zwischen Fahrwerk und dem Unter-

grund. Sind geringe Zugkräfte zum Ausspulen des Seils erforderlich, erfolgt der Eingriff der Reifen in den oberen Zentimetern des Bodens, während die Wassergehaltsmessungen in eine größere Tiefe reichen. Dies wirkt sich bei konstanten Witterungsbedingungen, wie sie für die meisten Versuchstage zu verzeichnen waren, nicht aus. Demgegenüber sind die Auswirkungen auf das Messergebnis der TDR-Sonde kurz nach Regenschauern teilweise erheblich. Dabei stellt sich der Interaktionsraum zwischen Reifen und Boden deutlich feuchter dar als von der Messsonde bestimmt. Die Messstäbe der Sonde greifen bei der Messung auch in tiefere und somit noch trockenere Bodenschichten ein und bilden einen Mittelwert aus den unterschiedlichen Feuchtebedingungen. Die Differenzen der verschiedenen Bodentiefen ergeben sich aus der verlangsamten Infiltration des Wassers in tiefere Schichten. Typische Infiltrationsraten für die vorwiegend untersuchten Lössböden reichen von 1 cm bis zu 8 cm pro Tag (vgl. u.a. BECHER, 1970; SCHEFFER ET AL., 1998). Direkt nach einem Regenschauer sind daher erhebliche Unterschiede zu erwarten, die sich für die bemessene Tiefe von 7 cm etwa innerhalb eines Tages ausgleichen. Unter wechselnden Witterungsbedingungen und hier insbesondere bei Regenwetter führen die Bodenfeuchtemessungen zu einer systematischen Unterschätzung der eigentlichen Bodenbedingungen. Dies wird auch für einige Versuchsserien deutlich, da diese auffällig geringe Traktionsbeiwerte ausweisen, obwohl die Bodenwassergehalte besseres erwarten lassen. Hiervon sind auch einige Validierungsfahrten in Hanglagen betroffen, sodass sich unerwartet hohe Schlupfwerte ergeben bzw. der Rückzug bereits bei vergleichsweise geringen Neigungen des Geländes stecken bleibt.

Bei einigen Versuchen verstärkt sich die Problematik fehlerhafter Wassergehaltsansprachen durch eine vorherige Verdichtung der tieferen Bodenschichten. Durch die Reduktion des Porenvolumens in der verdichteten Schicht kann weniger Wasser aufgenommen werden. Daraus ergeben sich geringere Maximalwerte und zusätzliche Behinderungen der Infiltration. Wasser kann so langsamer in die tieferen Schichten gelangen, während sich für die oberste Bodenschicht Wassergehalte nahe der Wassersättigung ergeben.

Trotz der möglichen Fehlerquellen liefert die TDR-Sonde brauchbare und schnell zu ermittelnde volumetrische Bodenwassergehalte. Für einen Einsatz des Prognosemodells ist der Wassergehalt eine entscheidende Eingangsgröße, die mit der verwendeten Messtechnik für praktische Anwendungen ausreichend genau bestimmt werden kann. Selbst eine deutliche Unterschätzung des Bodenwassergehalts um beispielsweise 10 % würde die Mobilität, bei Einhaltung der 25 % Schlupfgrenze, nicht ernsthaft gefährden. Die Folgen für den Boden wären jedoch je nach tatsächlichem Wassergehalt erheblich. Für Anwendungen mit einem höheren Genauigkeitsbedarf ist zum einen eine Kalibrierung auf den jeweiligen Boden, zum anderen die Entnahme mehrerer Bodenproben für eine Labortrocknung anzuraten.

6.1.3.3 Standortaufnahme

Ein Vergleich der Bodenart basierend auf der Standortaufnahme mit den Ergebnissen der Korngrößenuntersuchung im Labor zeigt eine geringe Übereinstimmung. So stimmen diese nur für gut 26 % der Versuchsgassen überein, während für die übrigen Flächen unterschiedliche Bodenarten bestimmt wurden. Reduziert auf die Bodenartenhauptgruppen (Sand, Lehm, Schluff und Ton) besteht immerhin eine Überstimmung von 50 %. Für die Bewertung muss jedoch berücksichtigt werden, dass sowohl bei der Standortaufnahme als auch bei der Probenentnahme für die Laborun-

tersuchungen jeweils nur eine Probe erfolgte. Mit beiden Verfahren kann daher die Variabilität der Bodenarten innerhalb der Versuchsgassen nicht erfasst werden, da nur ein sehr kleiner Ausschnitt betrachtet wurde. Hinzu kommt, dass die Grenzen zwischen den Bodenarten oftmals stark vom Tongehalt bestimmt werden und eine Veränderung um wenige Prozent bereits den Wechsel der Bodenart bewirkt.

Neben der Bestimmung der Bodenart wurden auch die Humusform und der Skelettanteil der verschiedenen Bodenschichten angesprochen. Da die Humusaufgabe gut zu erreichen ist, ergeben sich hier nur geringe Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Humusform. Für den Skelettanteil stellt sich die Ermittlung etwas schwieriger dar, da die Bestimmung anhand des im Pürckhauer-Bohrstock enthaltenen Skelettanteils erfolgt. Dabei kann es vorkommen, dass größere Gesteinsanteile während des Eindringens des Bohrstocks in den Boden verdrängt werden und der Skelettgehalt des Bodens somit zu gering eingeschätzt wird. Zudem wurde in jeder Versuchsgasse nur eine Probebohrung mit dem Pürckhauer durchgeführt, sodass die Variabilität nicht richtig erfasst werden konnte. Die Humusform hingegen lässt sich leicht durch eine zweite Probe bzw. einen zweiten Blick auf die Gasse überprüfen.

Durch die Standortaufnahme ergibt sich insgesamt ein guter und untereinander vergleichbarer Einblick in die Untergrundbedingungen der Versuchsgassen. Der Vergleich mit den Laborergebnissen zeigt jedoch auch, dass die Angaben der Standortaufnahme nicht immer exakt sind. Da beide Einschätzungen der Bodenart nur auf je einer Probe pro Versuchsgasse bestehen, ist ein Teil der Differenzen auf die grundsätzliche Variabilität der Böden in der Versuchsregion zurückzuführen. Für die Betrachtung der Einflussfaktoren spielen die Ergebnisse der Standortaufnahme eine entscheidende Rolle, da diese eine gewisse Vergleichbarkeit sicherstellen und zudem für alle Versuchsgassen vorhanden sind. Insbesondere letzteres ist ein erheblicher Vorteil gegenüber den Laborwerten, die lediglich für etwas über die Hälfte der Versuchsgassen zur Verfügung stehen.

6.1.3.4 Scherfestigkeitsmessungen

Durch die geringe Anzahl an Versuchsserien, für die Scherfestigkeitswerte zum Zeitpunkt der Traktionsmessungen bestehen, lassen sich anhand der Messergebnisse keine gesicherten Aussagen über ihre Auswirkungen auf das Traktionsverhalten treffen. Dies gilt auch für die flächig erfolgte nachträgliche Messung der Scherfestigkeit im Rahmen der Standortaufnahme, da die Festigkeit des Bodens entscheidend vom Wassergehalt beeinflusst wird. Dass Zusammenhänge zwischen der Scherfestigkeit und den auf den Boden übertragbaren Kräften bestehen, ist jedoch leicht nachzuvollziehen und bereits mehrfach untersucht worden (vgl. u.a. KARAFIATH, 1986; FODA, 1991; WANJII ET AL., 1997; WALCZYKOVA ET AL., 2002). Durch die verbesserte Stabilität des Bodens kann dieser höhere tangentialen Kräfte aufnehmen, ohne dass der Boden abgeschert wird und die Gleitreibung des Reifens überwiegt.

Insgesamt wurde die erforderliche Messtechnik für die Scherfestigkeit jedoch zu spät in die Erfassung der Untergrundbedingungen einbezogen, sodass das mögliche Erklärungspotential für das Traktionsverhalten des Forwarders nicht abzuschätzen ist.

6.1.3.5 Korngrößenanalyse

Eine entscheidende Eigenschaft der Untergründe ist die Zusammensetzung aus den unterschiedlichen Korngrößenfraktionen (Sand, Schluff und Ton). Durch Laboruntersuchungen von während der Versuche entnommenen Bodenproben konnten für 36 der insgesamt 60 Versuchsgassen die entsprechenden Informationen bestimmt werden.

Eine Ursache für die geringe Probenanzahl im Vergleich zur Anzahl der Versuchsgassen ist ein hoher Skelettgehalt des Oberbodens. Beim Einschlagen der Stechzylinder können diese beschädigt werden oder lassen sich aufgrund größerer Gesteinsbrocken nicht ausreichend tief in die Erde einbringen. Ähnliche Schwierigkeiten bestehen bei einem sehr dichten und oberflächennahen Wurzelteppich. Hier werden zum einen zu große Humusanteile in die Probe eingebracht, zum anderen können stärkere Wurzeln das Einschlagen der Probekörper behindern.

Die gelieferten Laborergebnisse sind insgesamt als unstrittig und wenig fehlerwahrscheinlich zu betrachten. Aufgrund der hohen Kosten für die Analysen im Labor wurde, mit wenigen Ausnahmen, für jede Versuchsgasse nur eine Bodenprobe entnommen. Obwohl die Oberböden überwiegend sehr homogen sind, lassen sich kleinräumige Unterschiede innerhalb der Untersuchungseinheiten nicht ausschließen. Dies wird unter anderem beim Vergleich von Versuchsgassen mit direkter räumlicher Nähe deutlich. So zeigten sich bei der Überprüfung einzelner scheinbarer Ausreißer beim Schluffanteil deutlich höhere Werte für die umliegenden Rückegassen (vgl. Kap. 5.2.4.9).

Ziel der Korngrößenanalysen war, die befahrenen Versuchsgassen auf Gemeinsamkeiten zu untersuchen. Werden die Zusammensetzungen der Böden den Bodenartenhauptgruppen zugeordnet, so fallen 50,0 % der Flächen unter die Schluffe und weitere 26,5 % unter die Lehmböden. Die vorgefunden Böden bestätigen somit die Einschätzungen von STÜBER (2006) und zeigen, dass es sich für die Größe des Versuchsraums um vergleichsweise einheitliche Bodenbedingungen handelt. Diese werden lediglich von einer Fläche durchbrochen, die den Sanden zugeordnet wird, sowie insgesamt sieben Versuchsgassen auf Tonböden.

6.1.3.6 Trockendichte

Aufgrund des vergleichsweise hohen Aufwands der Untersuchungen erfolgte lediglich die Entnahme einer Probe je Bestandteil, sodass es sich um eine punktuelle Information handelt, deren Variabilität nicht erfasst wurde. Hinzu kommt, dass ein Teil der Proben zudem Humusanteile enthält, die sich eher reduzierend auf das Messergebnis auswirken. Trotz der beschriebenen Fehlerquellen sind die resultierenden Trockendichten mit den bei TEPPE ET AL. (2003) beschriebenen Tendenzen vergleichbar. So ergeben sich nur für sehr wenige Versuchsserien Lagerungsdichten über $1,65 \text{ g/cm}^3$. Das Gros der Ergebnisse zeigt zudem geringe Trockendichten unter $1,45 \text{ g/cm}^3$. Bezogen auf die Häufigkeiten der einzelnen Lagerungsdichteklassen von TEPPE ET AL. (2003) weisen die erhobenen Werte jedoch eine Tendenz zu geringeren Angaben auf. Ein mögliche Ursache hierfür kann die Beimischung von Humusbestandteilen zu den Proben sein.

Für die Fragestellung möglicher Einflussfaktoren auf das Traktionsverhalten von Forstmaschinen genügen die Informationen zur Lagerungsdichte der Versuchsbestände. So zeigt sich der positive Einfluss erhöhter Trockendichte innerhalb der Fahrspur auf das Zugkraftverhalten der Versuchs-

maschine anhand der linearen Regression in Kap. 5.4.2. Die geringe Präzision bei den Untersuchungen sowie das Fehlen von Vergleichsproben aus derselben Versuchsgasse schließen eine bodenkundliche Verwertung der Messergebnisse jedoch aus.

6.2 Datenverarbeitung

6.2.1 Datenaufbereitung

Im Zuge der Datenaufbereitung wurden für die originären Messdaten der Geschwindigkeiten und der Zugkräfte gleitende Mittelwerte gebildet. Die Berechnung führt dabei zu einer deutlichen Reduktion der Streuung, insbesondere durch die Eliminierung von Spitzenwerten.

Insbesondere für die Geschwindigkeiten stellt die Bildung der gleitenden Mittelwerte die tatsächliche Bewegung des Versuchsförderers plausibler dar. Es handelt es sich dabei teilweise um Artefakte durch die hohe Auflösung des Drehgebers mit 5.000 Impulsen und die ebenfalls noch hohe Messrate von 10 Hz. Die einzelne Sekunde führt dabei zu zehn verschiedenen Messwerten, die im Prinzip keine großen Geschwindigkeitsschwankungen aufweisen können. Verglichen mit älteren Messeinrichtungen zum Traktionsverhalten bei Schleppern, wie sie beispielsweise bei STEINKAMPF (1971) für Messungen im Feld eingesetzt wurden, oder auch für Einsätze in Bodenrinnen (vgl. u.a. BOLLING, 1987; VECHINSKI ET AL., 1999) ergibt sich eine Glättung der Messwerte bereits durch die geringeren Messraten. Hinzu kommen deutlich geringere Auflösungen der Radumfänge, die unterhalb der hier erzielten 5.000 Impulse / Inkremente liegen.

Für die gemessenen Zugkräfte wäre die vorgenommene Glättung der Messwertverläufe nicht zwangsläufig erforderlich, da die Streuungen nicht immer bei den gleichen Zugkräften auftreten und daher damit zu rechnen ist, dass sich diese durch die Vielzahl der Versuchsserien ausgleichen. Da die Messeinrichtung auch für Versuche mit einem geringeren Messumfang eingesetzt wird und Messergebnisse untereinander vergleichbar sein sollen, erfolgt die Bildung des gleitenden Mittelwerts auch für die Zugkräfte. Bei wenigen Abbremsungen, bei BLOCK (2008) beispielsweise lediglich drei, wird das Traktionsverhalten einer Maschine durch die gleitenden Werte besser abgebildet.

Die derart aufbereitete Zugkraftinformation in den Datensätzen wurde zur Berechnung der Traktionsbeiwerte verwendet. Bevor jedoch aus der Gesamtmasse des Förderers und den erzielten Zugkräften ein Verhältnis berechnet wird, erfolgt eine Bereinigung der Einflüsse unterschiedlicher Geländeneigungen während der Versuche (vgl. Kap. 4.2.4).

Anhand der linearen Ausgleichsmodelle in Kap. 5.4.2 wird jedoch deutlich, dass die Steigung der Versuchsgassen für die Traktionsmessungen in die Regressionen einbezogen wird. Dies gilt sowohl für das Modell mit reduzierten Einflussfaktoren als auch für das umfangreichere Regressionsmodell mit allen möglichen Einflussfaktoren. Die jeweils positiven Koeffizienten deuten an, dass durch die berechnete Hangneigungskorrektur eine Überkompensation erfolgte. So ergeben sich bei ansteigendem Gelände während der Traktionsmessungen höhere Traktionsbeiwerte (berechnet aus den um die Hangneigung bereinigten Zugkraftwerten) als bei Versuchen in Gefälle-

richtung. Durch die Hangneigungskorrektur erhöht sich der Traktionskoeffizient durch eine befahrene Steigung von einem Prozent um 0,01. Der Regressionskoeffizient der Variable *Steigung* im Modell mit den reduzierten Einflussfaktoren beträgt 0,004 und weist somit eine geringere Erhöhung der zu erwartenden Traktionsbeiwerte für jedes zusätzliche Steigungsprozent aus. Hier könnte daher vermutet werden, dass die Hangabtriebskräfte, zumindest im Bereich geringer Neigungen, einen kleineren Einfluss auf das Traktionsverhalten haben, als sich aus der geometrischen Betrachtung ergibt. Andererseits muss berücksichtigt werden, dass deutlich mehr Traktionsmessungen auf Gefällestrecken erfolgten als unter ebenen oder leicht ansteigenden Geländebedingungen. Hinzu kommt, dass die Steigung mit einigen ebenfalls signifikant in die Regressionsmodelle aufgenommenen Faktoren korreliert. Hierzu zählen u.a. der Bodenwassergehalt, bei dem es sich um einen der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Fahrzeugzugkraft handelt. Der Einfluss der Geländeneigung und somit der Hangneigungskorrektur kann daher nicht präzise erfasst werden. Angesichts des geringen Koeffizientenwerts der *Steigung* im linearen Regressionsmodell ist die mögliche Beeinträchtigung des Ergebnisses durch die Bereinigung der Hangabtriebskraft zu vernachlässigen. Die Berechnung der Traktionsbeiwerte ohne den Ausgleich der Hangabtriebskraft hätte zu einem deutlich größeren Fehler geführt. Da es sich vorwiegend um Flächen mit Gefälle handelt, wären um wenige Prozent geringere Grenzneigungsangaben des Prognosemodells die Folge gewesen.

6.2.2 Datenauswahl / Artefaktbereinigung

6.2.2.1 Traktionsmessungen

Für die Auswertung der Messergebnisse erfolgte eine Reduktion der betrachteten Daten auf eine Mindestradumfangsgeschwindigkeit von 0,2 m/s, positive Traktionsbeiwerte sowie ansteigenden Schlupf. Die zahlenmäßig größte Reduktion ergibt sich aus der Vorgabe der Mindestradgeschwindigkeit. Insgesamt werden dadurch über 70 % der Datensätze von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Die Beschränkung auf positive Traktionsbeiwerte wirkt sich zum einen auf vereinzelte Zugkraftmesswerte mit negativen Vorzeichen aus, zum anderen auf originäre Zugkraftwerte, die durch den Ausgleich der Hangabtriebskraft verringert und somit negativ werden. Letzteres hat eine größere Bedeutung, da alle Messungen bei Gefälle zu entsprechenden Abschlägen auf die Messwerte führen. Das Vorkommen negativer Zugkräfte und somit von Druckbelastungen auf der Messtechnik während der Versuche ist nicht plausibel, da der Forwarder lediglich auf Zug belastet wird. Negative Werte würden ein externes Schieben der Maschine bedeuten. Dieses ist zu keinem Zeitpunkt während der Versuche erfolgt und kann daher nicht Gegenstand der Auswertung sein.

Bereits bei früheren Anwendungen der Messtechnik (JACKE ET AL., 2004; BLOCK, 2008) waren teilweise stark variierende Zugkraftwerte während des Durchdrehens im Fahrzeugstillstand zu verzeichnen. Um diese Werte von der Betrachtung auszuschließen, wurde die Analyse auf Schlupfwerte bis 98 % reduziert. Entsprechend hohe Schlupfprozente haben keine Bedeutung für die eigentliche Fragestellung nach ökologisch vertretbaren Einsatzgrenzen für Forstmaschinen und

spielen selbst bei der Frage nach maximalen Zugkräften nur eine geringe Rolle. Der Einfluss auf die Ausgleichsfunktionen und auf den Stufenmittelwert der obersten Schlupfstufe kann jedoch teilweise erheblich sein. Verglichen mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen zum Traktionsverhalten wird zudem deutlich, dass die meisten Darstellungen der Traktions-Schlupfkurve auf Schlupfwerte über 60 % verzichten (ZOZ UND GRISSO, 1994; SÖHNE UND BOLLING, 1981; ENGEL, 1974). SOMMER ET AL. (2001) reduzieren die Betrachtung sogar auf Werte unter 25 % und beschränken sich somit auf den effizienten und bodenschonenden Bereich des Schlupfspektrums.

Eine weitere deutliche Datenreduktion entsteht durch die Beschränkung auf ansteigende Schlupfwerte (vgl. Kap. 4.3.5). Es werden nur Datensätze aufgenommen, bei denen der Schlupf höher als für den vorherigen Datensatz ist. Während der einzelnen Abbremsungen erhöht sich der Auspulwiderstand, sodass der Antriebsschlupf stetig zunimmt, bis die Räder auf der Stelle durchdrehen. Fallender Schlupf ist im Rahmen des Versuchs daher nicht zu erwarten und deutet auf Zeiten zwischen den einzelnen Abbremsungen hin. Durch die Betrachtung lediglich des ansteigenden Schlupfs konnte VON HITTENBECK (2004) eine erhebliche Verbesserung der Datengrundlage sichergestellt werden, da die Beschleunigungsphasen mit relativ geringem Zugkraftbedarf, aber wechselnden Schlupfzuständen, aus der Betrachtung ausgeschlossen wurden.

Neben der beschriebenen systematischen Datenauswahl erfolgt eine fachliche Einschätzung (basierend auf den Erfahrungen mit der Messtechnik) der Punktwolken, die bei wenigen Versuchsreihen zu einer weiteren Bereinigung von Artefakten führt. Durch das Entfernen dieser Datenpunkte verbessert sich nicht nur optisch die Anpassung, sondern dieser Eindruck wird auch durch verbesserte Bestimmtheitsmaße bestätigt.

6.2.2.2 Validierungsmessungen

Für die Validierungsfahrten in Hanglagen sind die Beschränkungen des Ausgangsdatenbestandes deutlich geringer. Neben einer Mindestradgeschwindigkeit von 0,6 m/s entsteht eine weitere Reduktion der Daten lediglich durch Fehler der Messtechnik oder durch das Verfangen der Angelsehne. Durch die höhere Mindestgeschwindigkeit der Räder wird die Anfahrphase des Forwarders effektiv eliminiert, und dadurch entfallen ebenfalls die Effekte der Anfahrwiderstände. Zu deren Überwindung sowie für die Anfangsbeschleunigung wären sonst höhere Schlupfwerte zu erwarten, die nicht den Bedingungen der eigentlich zu untersuchenden gleichmäßigen Hangbefahrung entsprechen. Selbst wenn geringere Geschwindigkeiten zugelassen werden, kommt es nicht zu gravierenden Veränderungen der Ergebnisse. Die bereits als befahrbar eingestuftten Versuche bleiben in dieser Kategorie; es kann lediglich zu einem leichten Anstieg der mittleren Schlupfwerte sowie der Streuungsmaße führen.

6.2.3 Fazit der Datenverarbeitung

Zur Verbesserung der Ergebnisqualität werden die Daten verschiedenen Aufbereitungsschritten und Artefaktbereinigungen unterworfen. Hauptursachen für die durchgeführte Datenaufbereitung sind die hohe Messrate sowie die Traktionsmessungen auf Rückegassen mit unterschiedlicher Steigung. Die entstehenden Effekte können jedoch effektiv durch gleitende Mittelwerte und den

Ausgleich der Neigung mittels der Hangabtriebskräfte reduziert werden, ohne das Ergebnis der Messungen zu verfälschen.

Die zusätzliche Artefaktbereinigung für die Traktionsmessungen führt zu einer weiteren Verbesserung des Ergebnisses. Insbesondere die Eliminierung von Stillstandszeiten des Rückezugs durch die Mindeststradumfangsgeschwindigkeit und die Betrachtung von ansteigenden Schlupfwerten unterhalb von 98 % erleichtern die Datenhandhabung und -auswertung erheblich. Dabei werden die Informationen über das Traktionsverhalten der Maschine nicht beeinflusst, sondern die Betrachtungen auf den relevanten Einsatzbereich beschränkt. Die vereinzelt getroffene „erfahrungsbaasierte“ Datenauswahl führt nur zu geringen Veränderungen, die jedoch die Plausibilität der Ergebnisse erhöhen. Eine in Teilen unterschiedliche Datenauswahl für die Validierungsmessungen beeinträchtigt das mittlere Schlupfniveau nur minimal und verändert für keine der getesteten Versuchsbedingungen die Einschätzung zur Befahrbarkeit.

6.3 Ebenenauswertung

6.3.1 Traktionsmessungen / Punktwolken

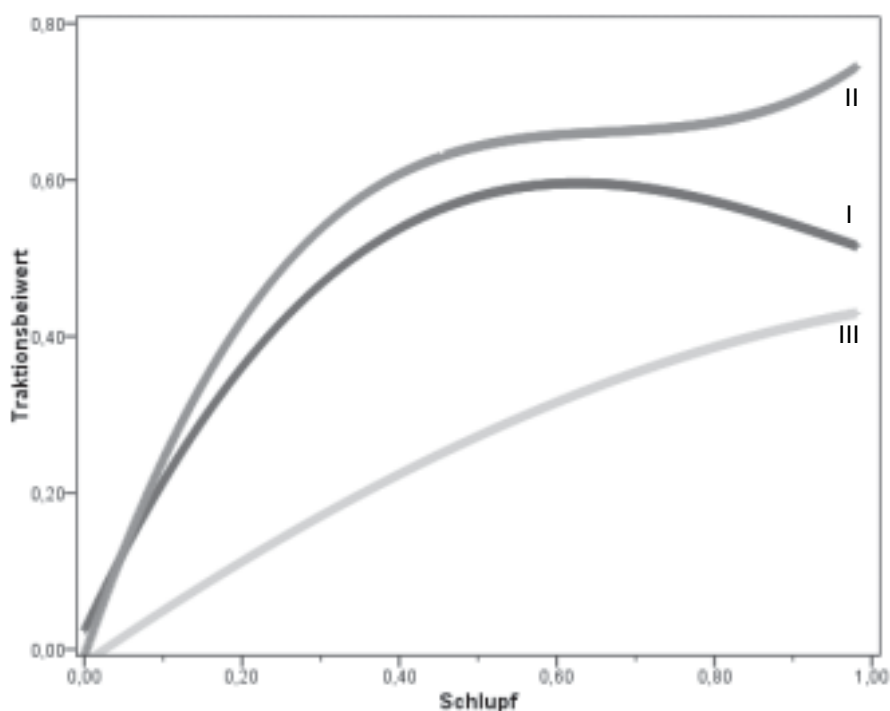


Abbildung 45: Exemplarische Ausgleichskurven für die drei unterschiedlichen Gruppen von typischen Kurvenverläufen (I: steiler Anstieg mit klarem Maximum; II: steiler Anstieg ohne Maximum; III: flacher Anstieg ohne Maximum)

Aus den Traktionsmessungen wurden Punktwolken aus dem Traktionsbeiwert über dem Schlupf erzeugt. Die Punktwolken und Ausgleichskurven lassen sich grob in drei Gruppen aufteilen. So zeigt sich für die erste Gruppe (I) ein klares Maximum der Ausgleichsmodelle über dem Schlupf,

während die Ausgleichsfunktionen für die Gruppen II und III einen stetigen Anstieg aufweisen. Die Unterteilung der letzten beiden Gruppen erfolgt über die Zunahme des Traktionsbeiwertes bei geringen Schlupfwerten. Für die zweite Gruppe, die vorwiegend durch sehr gute Traktionsbedingungen geprägt ist, ergibt sich ein steiler Anstieg, während die Gruppe III eine nahezu lineare Zunahme zeigt. Für die dritte Gruppe sind vorwiegend schlechtere Traktionsbedingungen zu verzeichnen. Hierzu zählen tendenziell höhere Bodenwassergehalte während der Versuche sowie geringere Skelettgehalte im Oberboden. Beide Faktoren sind durch die lineare Regression in Kap. 5.4.2 als entscheidende Faktoren für das Zugkraftverhalten des Rückezugs identifiziert worden. Die zweite Gruppe weist demgegenüber nahezu alle Versuche mit Traktionshilfsmitteln auf sowie weitere Messungen bei guten Traktionsbedingungen. Abbildung 45 zeigt exemplarisch typische Ausgleichskurvenverläufe für die drei Gruppen.

Insbesondere die beiden ersten Gruppen stimmen mit den Erfahrungen aus anderen Untersuchungen zum Traktionsverhalten auf nachgiebigen Böden überein (vgl. u.a. BOCK, 1952; STEINKAMPF, 1971; ENGEL, 1974; MOORE, 1975; KUTZBACH, 1982; BOLLING, 1987; YOSHIDA ET AL, 2002; BLEY, 2002; DU PLESSIS UND YU, 2006). Der Kurvenverlauf der Traktionsbeiwerte variiert dabei jedoch zwischen den einzelnen Autoren deutlich. Gemeinsam ist den meisten allerdings der steile Anstieg bei geringem Schlupf. Die Art, wie sich die Traktion bei höherem Schlupf verhält, unterscheidet die einzelnen Untersuchungen. Während zum Beispiel MOORE (1975) von einem deutlichen Maximum ausgeht, finden sich u.a. bei STEINKAMPF (1975) und WEISSBACH UND WINTER (1996) asymptotische Kurvenverläufe. Bei derartigen Vergleichen der Ausgleiche muss jedoch berücksichtigt werden, dass neben unterschiedlichen Untergrundbedingungen auch verschiedene Ausgleichsmodelle angewendet wurden.

Eine weitere Vergleichsmöglichkeit, die relativ einfach auf andere Untersuchungen sowie auf unterschiedliche Versuchsbedingungen übertragen werden kann, besteht in der Anfangssteigung der Traktionskurven / Punktwolken. Wird über alle Ausgleichskurven der drei Gruppen die lineare Steigung aus dem Ursprung bis zum Traktionsbeiwert beim ökologischen Grenzschlupf von 25 % berechnet, ergibt sich eine klare Abfolge der Versuche. Bezogen auf den Schlupf als Verhältniszahl beträgt die Steigung für die zweite Gruppe 1,51 (0,38/0,25), für die erste Gruppe 1,40 (0,35/0,25) und für die dritte Gruppe lediglich 0,76 (0,19/0,25). Anhand der Steigung kann daher eine vergleichende Bewertung der Traktionsbedingungen erfolgen.

Mit der Kombination aus der Verzögerungswinde und der Messtechnik wurden bereits Traktionsmessungen mit verschiedenen Fahrzeugen bei unterschiedlichen Untergrundbedingungen durchgeführt. Diese lassen sich untereinander vergleichen, sodass Tendenzen erkannt werden können. Bei Untersuchungen mit einem Raupenharvester (HITTENBECK, 2007b; JACKE UND HITTENBECK, 2009) sowie bei der Bemessung eines Gabelstaplers durch BLOCK (2008) lässt sich die Steigung nur anhand der Punktwolken bestimmen. Dieses Vorgehen führt zu anderen Werten als der Vergleich anhand der Ausgleichsmodelle. Die Werte sind jedoch insgesamt besser vergleichbar, da die Steigungsinformation nicht durch einen Ausgleich beeinträchtigt wird. Für den Raupenharvester unter trockenen und skelettreichen Bodenbedingungen ergibt sich eine Steigung bis 25 % Schlupf von 3,04. Der vergleichbare Wert des Gabelstaplers (BLOCK, 2008) mit einem als Standard definierten Reifen auf trockenem Asphaltboden bzw. auf gepflastertem Untergrund erzielt eine Steigung von 3,84. Für den Vergleich mit den vorliegenden Daten eignen sich die Messergebnisse

der Konfiguration 1 am besten, da diese einheitlich durch gute Traktionsbedingungen geprägt sind und nicht unterschiedlichen Gruppen der Ausgleichskurvenform zugeordnet werden. Mit einer mittleren Steigung der Punktwolke bis 25 % Schlupf von 2,09 ergibt sich ein nochmals flacherer Anstieg. Die Abfolge der Steigungswerte entspricht damit den Erwartungen an das generelle Traktionsvermögen der jeweiligen Versuchsbedingungen. Beim Gabelstapler kommt die nahezu ideale Reibpaarung aus einem profilarmen Gummireifen mit festem Untergrund zum Einsatz. Entsprechend ergibt sich hier der steilste Anstieg der Traktionsbeiwerte bei geringem Schlupf. Ebenfalls sehr gute Kraftübertragungsmöglichkeiten entstehen durch die Gliederketten des Raupenharvesters in Verbindung mit der skeletthaltigen Braunerde des Versuchsbestandes. Das etwas schlechtere Traktionsverhalten lässt sich durch das Befahren eines weichen und nachgiebigen Untergrunds erklären, der die Kraftübertragung von den Kettenstegen auf den Boden erschwert. Für die bei der vorliegenden Untersuchung verwendeten Traktionsbänder ist mit einem nochmals verschlechterten Traktionsverhalten auszugehen, da sie weniger aggressiv gestaltet sind als die Gliederketten des Raupenharvesters und zudem nur auf einer Bogie-Achse montiert wurden.

Der anfängliche Anstieg der Traktionsbeiwerte über dem Schlupf kann, zumindest bei der verwendeten Messtechnik, als ein Gradient für die Traktionsbedingungen einer Paarung aus Untergrund und Endantrieb gesehen werden. Eventuell bietet sich hiermit ein Erklärungsansatz für die unterschiedlichen Verläufe des Traktionsbeiwertes über dem Schlupf bei verschiedenen Autoren.

Ein weiterer Unterschied zu anderen Untersuchungen liegt in der Darstellung der Punktwolken. Für die einzelnen Versuchsserien stehen oftmals mehrere Tausend Datensätze zur Verfügung, während bei anderen Erhebungen sehr viel weniger Datenpunkte dargestellt werden. Die Streuung der Messwerte kann jedoch nur bei entsprechenden hohen Messraten und Wiederholungen erfasst und bewertet werden. ZOZ UND GRISSO (2003) haben Traktionsmessungen an landwirtschaftlichen Schleppern und Raupentraktoren mit einer vergleichsweise hohen Messwertanzahl durchgeführt. Der Vergleich mit den vorliegenden Ergebnissen zeigt dabei eine gute Übereinstimmung der Punktwolken. Bei vielen Untersuchungen, insbesondere in den letzten zehn Jahren, ist mit ähnlich hohen Messraten zu rechnen, wie sie für die vorliegenden Versuche eingesetzt wurden. Bei der Darstellung scheinen diese Informationen jedoch oftmals auf Mittelwerte verdichtet zu sein. Durch die Betrachtung lediglich weniger Datenpunkte verändert sich die Form der Punktwolke erheblich, wie die Betrachtungen der Stufenmittelwerte in Kap. 5.3.2.3 zeigen.

Neben der Darstellung der Ergebnisse führt die Wahl des Ausgleichsmodells zu weiteren Unterschieden beim Vergleich von Traktionskurven. Während beispielsweise STEINKAMPF (1975) oder WEISSBACH UND WINTER (1996) asymptotische Verläufe beschreiben, verzichten viele Autoren auf die Fragestellung nach einem Zugkraftmaximum über dem Schlupf. Entsprechend können auch Ausgleichsmodelle verwendet werden, die kein Maximum beschreiben oder bei hohen Schlupfwerten zu schlechten Anpassungen führen. Für den Ausgleich der durchgeführten Traktionsmessungen wurde ein kubischer Ausgleich gewählt, da dieser sowohl die Möglichkeit eines stetigen Anstiegs im Bereich bis 100 % Schlupf bietet als auch in der Lage ist, ein Maximum zu beschreiben, indem der Einfluss des kubischen Ausgleichsgliedes reduziert wird. Knapp ein Drittel der Versuchsserien führt zur Bildung eines Maximums bis 90 % Schlupf. Für die übrigen Messungen ist ein stetiger Anstieg der Ausgleichsmodelle zu verzeichnen, obwohl die Punktwolken teilweise ein Maximum erkennen lassen. Die Wahl des „richtigen“ Regressionsmodells für Zugkraftmessungen ist sehr

schwierig, da sich das Verhalten zwischen den verschiedenen Schlupfbereichen verändert. Bei HITTENBECK (2004) wurden alternative Ausgleichsfunktionen für Traktionsmessungen mit einem beladenen Forwarder getestet. Neben der bei HITTENBECK (2004) und JACKE ET AL. (2004) verwendeten quadratischen Form sind zwei Wachstumsmodelle überprüft worden sowie die nicht lineare Regression mit einem variablen Exponenten. Letztere führte zu einer leicht verbesserten Anpassung gegenüber der quadratischen Ausgleichsfunktion, ohne jedoch große Abweichungen von dieser zu zeigen. Das von MICHAILOFF (1943) eingesetzte asymptotische Wachstumsmodell beschreibt den Bereich des ansteigenden Schlupfs sehr plausibel, führt jedoch bei höheren Schlupfwerten über 25 % zu deutlichen Abweichungen zwischen den Messwerten und dem Ausgleichsmodell.

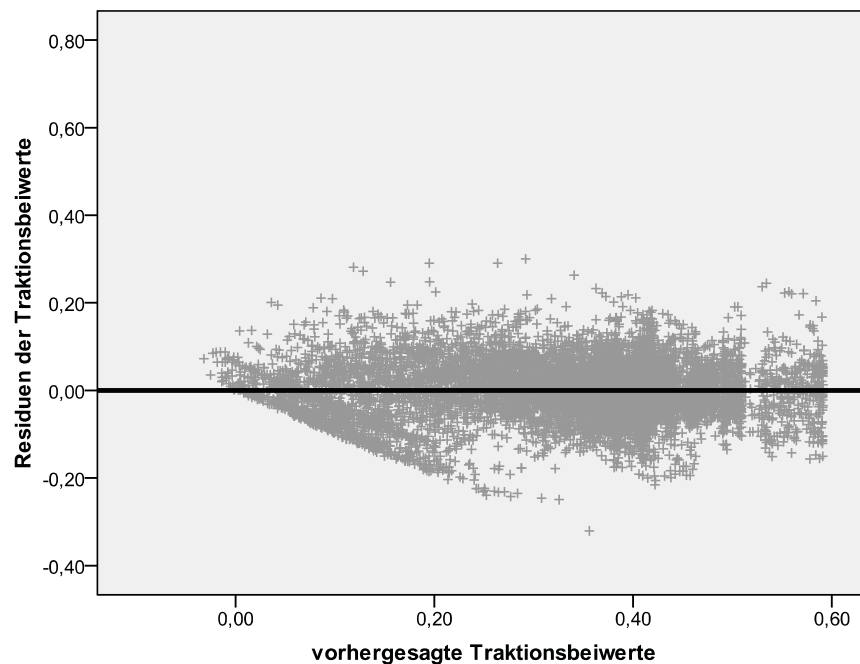


Abbildung 46: Verteilung der Residuen über den vorhergesagten Traktionsbeiwerten für die Konfiguration 0

Insgesamt ergeben sich durch die Wahl des Ausgleichsmodells, sofern denn eines angewendet wird, erhebliche Unterschiede in der Darstellung des Traktionsbeiwertes über dem Schlupf. Das für die Untersuchungen eingesetzte kubische Ausgleichsmodell bietet eine gute Flexibilität, ohne auffällige systematische Abweichungen zu offenbaren. Abbildung 46 zeigt die Streuung der gemessenen Traktionsbeiwerte über den prognostizierten Werten der Ausgleichsfunktionen für die Konfiguration 0. Dabei wird die sehr gute Anpassung anhand der gleichmäßigen Streuung von der Nulllinie deutlich. Bei sehr geringen Traktionsbeiwerten kommt es zu einer leichten Unterschätzung der Werte. Ursache hierfür sind die unterschiedlichen Konstantenwerte der Ausgleichsfunktionen. Ansonsten sind jedoch keine deutlichen Abweichungen zu erkennen.

6.3.2 Vergleich Rad-, Bänder- und Raupenfahrwerk

Die Ausweitung der hochmechanisierten Holzernte mit Harvestern in steilere Gebirgslagen führt vor allem in den südlicheren Bundesländern Deutschlands zu einem vermehrten Einsatz von Raupenfahrwerken. Entsprechende Harvester zeichnen sich dabei durch einen geringen Kontaktflächendruck und somit reduzierte Verdichtungsschäden im Oberboden aus (vgl. u.a. KELLER ET AL., 2002, KREMER ET AL., 2005; ANSORGE UND GODWIN, 2008). Durch die größere Auflagefläche der Raupenlaufwerke lassen sich höhere Massen und Zugkräfte gegen den Boden abstützen. Die höheren Eigenmassen dienen dabei als Gegengewicht zu den Auslegern, sodass ein sicherer Fällvorgang auch unter schwierigen Bedingungen möglich ist. Durch die verbesserte Zugkraft kann zudem in steilere Lagen vorgedrungen werden, als dies mit Radfahrwerken der Fall ist. Entsprechende Nachteile ergeben sich durch die wenig flexiblen Laufwerke, die zu einer Erhöhung der Wurzelschäden führen (vgl. u.a. KORTEN UND MATTHIES, 2003; KREMER ET AL., 2007; SCHARDT ET AL., 2007). Im Rahmen einer Auftragsmessung für die Technische Prüfabteilung des KWF konnte zudem ein Raupenharvester mit der hier beschriebenen Verzögerungs- und Messtechnik bemessen werden. Für die resultierenden Punktwolken aus Traktionsbeiwerten und Schlupf der Antriebsketten zeigt sich dabei ein den untersuchten Radfahrwerken ähnlicher Verlauf (vgl. u.a. WEISE UND JIRIKOWSKI, 2008a+b; JACKE UND HITTENBECK, 2009).

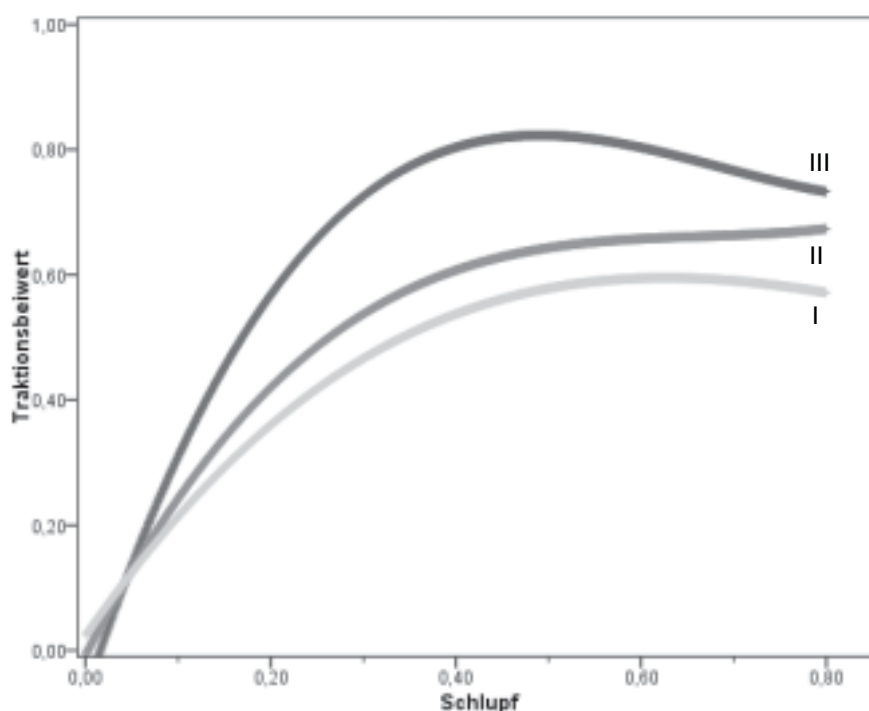


Abbildung 47: Exemplarische Ausgleichskurven für drei unterschiedliche Fahrwerkskonfigurationen (I: Radfahrwerk; II: Radfahrwerk mit Ketten und Bändern; III: Raupenfahrwerk)

Abbildung 47 zeigt exemplarisch die Traktionsunterschiede zwischen dem Radfahrwerk des Versuchsforderers, dem Rückezug mit Traktionshilfsmitteln und den Ergebnissen der Zugkraftmessungen am Raupenharvester. Während letzterer nur auf einem Untergrund untersucht wurde, ste-

hen auf Basis der Zugkraftmessungen eine Vielzahl verschiedener Untergründe zur Verfügung. Da die Messungen mit dem Raupenharvester bei vergleichsweise geringerem Bodenwassergehalt und auch ansonsten eher günstigen Bedingungen erfolgten, basieren die exemplarisch dargestellten Kurven für das Rad- und das Bänderfahrwerk auf ebenfalls sehr günstigen Traktionsbedingungen. Obwohl diese nahezu optimale Traktionsvoraussetzungen beschreiben, zeigt sich die deutliche Überlegenheit des Raupenfahrwerks. Selbst mit Bändern und Ketten auf dem Rückezug ergibt sich ein maximaler Traktionsbeiwert unter 0,65, während der vergleichbare Wert des Raupenharvesters knapp 0,85 beträgt. Zudem gestaltet sich der Anstieg der Traktionsbeiwerte beim Raupenlaufwerk deutlich steiler als für die radbasierten Varianten mit dem Forwarder (vgl. a. vorheriges Kapitel). Eher dem steilen Anstieg und den daraus folgenden Anforderungen des Ausgleichsmodells ist daher auch die frühe Kulmination der Regressionskurve (für das Raupenfahrwerk) bei 54 % Schlupf geschuldet.

Anhand der bei JACKE UND HITTENBECK (2009) dargestellten originären Punktwolke wird deutlich, dass sich eventuell vorhandene Unterschiede in den Streuwolken lediglich auf den Bereich hohen Schlupfs beziehen. So zeigt sich für das Raupenlaufwerk ab ca. 50 % Schlupf ein nahezu konstantes Traktionsniveau, während insbesondere die Versuche mit Traktionshilfsmittel in diesem Bereich noch eine weitere Zunahme der Traktionsbeiwerte zeigen. Eine mögliche Ursache für dieser Unterschiede besteht in den Bodenbedingungen der Raupenharvestermessungen. Während die Bodenart zu den im Rahmen der Forwarderbemessung befahrenen Standorten vergleichbar ist, handelte es sich um einen vergleichsweise locker gelagerten Boden, der zudem noch nicht mit schwerem Holzerntemaschinen befahren wurde.

Obwohl zwischen den Fahrwerken erhebliche konstruktive Unterschiede bestehen, kommt es unter den jeweils lössdominierten Untergrundbedingungen zu einem ähnlichen Traktionsverhalten, welches sich lediglich in der Höhe der umsetzbaren Zugkräfte unterscheidet. Alle drei „Fahrwerks“-Varianten erzeugen die gemessenen Zugkräfte vornehmlich durch den Eingriff und die Abstützung im Oberboden. Für das Raupenlaufwerk und den mit Bändern ausgestatteten Rückezug ist dabei die Kontaktfläche zwischen den Antriebskomponenten und dem Untergrund größer, sodass die Scherwiderstände des Bodens eine entsprechend höhere Kraftübertragung zulassen.

6.3.3 Einflussfaktoren auf das Traktionsverhalten

6.3.3.1 Hintergrund

Während der Datenerhebungen wurden viele mögliche Einflussfaktoren erhoben und in der späteren Analyse wichtiger Parameter für das Traktionsverhalten berücksichtigt (vgl. Kap. 5.4.2). Bei der linearen Regression mit allen erhobenen Einflussfaktoren ist deutlich geworden, dass nahezu alle Faktoren in das Regressionsmodell einbezogen werden. Neben der tatsächlichen Wirkrichtung ist vereinzelt jedoch von deutlichen Korrelationen und zufälligen Effekten auszugehen. Dies bestätigt sich teilweise bereits anhand der stark variierenden Regressionskoeffizienten in den verschiedenen Modellschritten. Im Weiteren werden daher die berechneten Auswirkungen mit den Erfahrungen anderer Untersuchungen verglichen. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Ausrüstung der Versuchsmaschine. Der Einfluss der einzelnen Bestandes- und Bodenparameter lässt

sich aufgrund der Vielzahl der Faktoren nur schwer isolieren. Zudem sind insbesondere die erhobenen Bodenparameter nicht exakt genug bestimmt worden. Der Aufwand für die Entnahme und Aufbereitung ausreichender Stichprobenumfänge, im Sinne einer bodenkundlichen Erhebung, konnte im Rahmen der Versuche nicht geleistet werden.

6.3.3.2 Maschinenkonfiguration

Dem Forstmaschinenbetreiber bietet sich eine Vielfalt an Gestaltungsmöglichkeiten, um die Maschine an die Einsatzbedingungen anzupassen. Dies beginnt bereits beim Kauf des Fahrzeugs, wo beispielsweise für einen Forwarder die Wahl zwischen Sechs- und Achtradmaschine, unterschiedlichen Reifenbreiten (-dimensionen) und auch der Nutzlast - und somit den Abmessungen - getroffen werden muss. Diese einmal entschiedenen Faktoren der Maschine lassen sich, wenn überhaupt, nur unter großem finanziellen Aufwand verändern. Demgegenüber besteht bei der Ausstattung mit Traktionshilfsmitteln oder der Wahl des Reifenfülldrucks eine größere Flexibilität, die eine begrenzte Anpassung an die jeweiligen Einsatzbedingungen ermöglicht.

Traktionshilfsmittel in Form von Ketten und Bändern haben eine große Bedeutung für Forstmaschineneinsätze. Die positiven Auswirkungen auf die Zugkraft des Rückezugs sind deutlich anhand der linearen Regressionsmodelle (vgl. Kap. 5.4.2) zu erkennen. So wird die Dummy-Variablen für die Bänder als erstes in beide Regressionen aufgenommen, während die entsprechende Variable für die Ketten jeweils etwas später hinzukommt. Die Regressionskoeffizienten beider Traktionshilfsmittelvariablen weisen durch deren Einsatz eine erhebliche Steigerung des Traktionsbeiwerts aus. Dieser Eindruck wird auch bei der Befahrung von größeren Steigungen bestätigt, da sich zu keinem Zeitpunkt Traktionsschwierigkeiten offenbaren. In der Folge werden durch die kombinierte Montage der Traktionshilfsmittel die ökologischen Einsatzgrenzen um 13,6 % Neigung nach oben verschoben und die maximalen Einsatzgrenzen sogar um 19,2 %. Bereiche, in denen eine Holzernte mit Reifen nicht mehr bodenökologisch vertretbar ist, können durch den Einsatz von Ketten und Bändern ohne die Gefahr verstärkter Bodenerosion bewirtschaftet werden.

Obwohl Traktionshilfsmittel für forstliche Anwendungen sehr verbreitet sind (vgl. u.a. WIPPERMANN, 2000; GABRIEL, 2005; RICHTER, 2008), gibt es nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen, die sich diesem Thema widmen. VECCHINSKI ET AL. (1999) vergleichen das Traktionsverhalten von gebrauchten Reifen, Neureifen und den Einsatz von Forstketten auf beiden Reifen. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten waren dabei oftmals gering und nicht immer gleich. So ist für einen der getesteten Böden die höchste Traktion mit dem gebrauchten Reifen ohne Ketten erzielt worden, während für drei der vier Untergründe die Kombination eines Reifens mit Ketten zum Traktionsmaximum führte. Für die Versuche kam ein Einzelradtester zum Einsatz, sodass nicht, wie bei der vorliegenden Untersuchung, ein komplettes Fahrzeug untersucht wurde. Zugkraftmessungen mit einem Skidder finden sich bei STOILOV (2007). Dabei führen die montierten Ketten bei einem Fülldruck von 2,3 bar zu einem Anstieg des Traktionsbeiwerts um ca. 10 %. Für geringere Fülldrucke reduziert sich jedoch die Differenz, da der Rollwiderstand der Reifen mit Ketten zunimmt, während sich für die lediglich mit Reifen ausgestattete Maschine eine Reduktion der Fahrwiderstände zeigt.

Da der ausschließliche Einsatz der Gleitschutzketten nur in einer Versuchsserie Untersuchungsgegenstand war, lassen sich die Auswirkungen der Ketten- und Bändermontage auf das Traktionsverhalten nur schwer trennen. Der größere Einfluss ist jedoch durch die Bänder zu erwarten, da die Interaktionsfläche mit dem Boden deutlich vergrößert wird und zudem durch die aufgeschweißten Traktionsstollen eine sehr gute Verzahnung mit dem Untergrund erfolgt.

Die Reifen an einer Forstmaschine zu wechseln, um diese an die Untergrundbedingungen anzupassen, ist sehr aufwendig und kostenintensiv. Zudem sind die Variationsmöglichkeiten beschränkt, da nur wenige Größen untereinander getauscht werden können. Hinzu kommt eine geringe Anzahl von Reifenherstellern, die oftmals nur eines oder wenige Profile in jeder Größe im Angebot haben. Eine demgegenüber kostengünstige aber trotzdem effektive Möglichkeit, Einfluss auf das Fahr- und Traktionsverhalten zu nehmen, ist die Anpassung des **Reifeninnendrucks** an die Untergrundbedingungen. Bei den Versuchen wurde dies durch die Bemessung der beiden Reifensätze bei einem reduzierten Reifeninnendruck von 1,5 bar berücksichtigt. Der positive Einfluss des geringeren Innendrucks auf die verfügbare Zugkraft ist bereits aus eigenen Untersuchungen (HITTENBECK, 2004, 2007a; 2008) bekannt und zudem bereits vielfach untersucht worden (vgl. u.a. RAPER ET AL., 1995; LEE UND KIM, 1997; LI UND SANDU, 2007). Die linearen Regressionen mit der Zielgröße Traktionsbeiwert (vgl. Kap. 5.4.2) berücksichtigen die Dummy-Variable für den reduzierten Reifenfülldruck jedoch nicht immer. So erfolgt für die Regression mit reduzierten Einflussfaktoren keine Aufnahme in das Modell, und bei der Betrachtung aller Parameter wird der Fülldruck Dummy zwar früh in das Modell einbezogen, aber im vorletzten Regressionsschritt auch wieder ausgeschlossen. Die Regressionskoeffizienten weisen in den verschiedenen Modellschritten allerdings immer einen traktionsverbessernden Einfluss des reduzierten Innendrucks aus.

Die positive Wirkung einer Absenkung des Reifenfülldrucks auf das Traktionsverhalten ist seit längerem vor allem für gewachsene Böden bekannt. Bereits sehr früh hat man sich dieser Thematik in der Landtechnik gewidmet. So beschreiben MEYER UND KLIEFOTH (1935; 1936) schon 1935 einen Anstieg des Kraftschlussbeiwertes durch Absenken des Innendrucks bei gleichbleibender Auflast. WUSCHEK (1966) empfiehlt einen Innendruck von 0,8 bar zur Reduktion des Rollwiderstands und zur Vermeidung von Verlusten durch Schlupf. Ähnliche Empfehlungen sind u.a. bei SÖHNE (1970) und STEINER (1979) zu finden. SONNEN (1970) stellte die größten Effekte bei bereits geringeren Fülldrücken fest. So zeigte sich die größte Zugkraftsteigerung bei der Absenkung von 0,8 bar auf 0,5 bar. Dieser Effekt steigt zudem mit zunehmender Radlast. RADEMACHER (2000) weist jedoch darauf hin, dass die Innendruckveränderung insbesondere bei Standardreifen eine Steigerung des Zugkraftvermögens bewirkt. Mit Breitreifen werden allerdings die insgesamt höheren Zugkräfte und ein im Vergleich geringerer Schlupf erreicht.

Entsprechende Erfahrungen bestehen auch für forstliche Untergründe, wobei berücksichtigt werden muss, dass die Mechanisierung in der Forstwirtschaft erst später als in der Landwirtschaft begonnen hat. So wurden in den Anfängen des forstlichen Schleppereinsatzes nur wenig veränderte landwirtschaftliche Maschinen verwendet, die erst mit der Zeit durch Spezialmaschinen für die Waldbewirtschaftung ersetzt wurden. In der forstlichen Betrachtung des Reifeninnendrucks dominiert die bodenökologische Betrachtung zum Schutz des Bodens vor Verdichtungsschäden (vgl. u.a. JACKE, 1989; EISENBARTH, 1989; BENTHAUS UND MATTHIES, 1993). So beschreibt BACKHAUS (vgl. u.a. 1992; 2002) vorwiegend Erfahrungen mit reduziertem Reifeninnendruck bei einem aufgerüsteten

Schlepper und die Bedeutung für den Bodenschutz. Um für die unterschiedlichen Einsatzbedingungen optimal angepasst zu sein, sind Reifendruckregelanlagen für die Maschinen empfehlenswert (WEISE, 2003). Diese bieten neben Bodenschutz und dem Traktionsvorteil zudem Einsparpotenziale beim Treibstoffverbrauch (JENANE ET AL., 1996; LÖFGREN ET AL., 1997; GABRIEL, 2007). Die Traktionsvorteile durch die Fülldruckabsenkung werden dabei teilweise als weitere positive Effekte beschrieben und kommen erst später in den forstlichen Fokus (vgl. u.a. BLEY, 2002; WEISE, 2002; STOILOV, 2007). Neben den Vorzügen müssen jedoch auch die Risiken beachtet werden. Diese ergeben sich aus den typischen forstlichen Einsatzbedingungen mit Wurzelstöcken und Schlagresten auf der Rückegasse. Für Reifen mit Schläuchen beschreibt BACKHAUS (1994) mögliche Schäden, die sich vorwiegend auf die montierten Schläuche beziehen. So kann es zu Bewegungen des Reifens auf der Felge kommen, die insbesondere bei Schlauchreifen zum Druckverlust durch Abscheren des Ventils oder Scheuern des Schlauchs führen. Durch den Einsatz eines schlauchlosen Reifensystems mit einer speziellen „Klemmfelge“ ergaben sich keine auf den Fülldruck (im Rückebetrieb 0,6 bar) des Reifens zurückzuführenden Schäden. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass es sich um einen Seilschlepper handelt und keine tragende Maschine. Für letztere sind höhere Innendrucke erforderlich, um eine ausreichende Tragfähigkeit des Reifens zu gewährleisten.

Auch wenn der Einfluss des Reifeninnendruckes während der Versuche eher gering ausfällt, sind die Auswirkungen für den Boden (vgl. u.a. VAN DEN AKKER ET AL., 2003; VAN DEN AKKER, 2004) und das Traktionsverhalten (vgl. u.a. SAARILATHI, 2002a; JACKE ET AL., 2004) durch eine Vielzahl von Untersuchungen bestätigt worden. Dass der Effekt des Fülldrucks bei den Versuchen nicht entsprechend deutlich hervortritt, ist auf verschiedene Faktoren zurückzuführen. Wie bereits für die Neureifen festgestellt, werden einige Versuchsserien bei reduziertem Innendruck der dritten Gruppe von Kurvenverläufen (mit flachem, linearem Anstieg, vgl. Kap. 6.3.1) zugeordnet und führen so zu tendenziell geringeren Traktionsbeiwerten. Hinzu kommt, dass die Reifen, insbesondere unter dem unbeladenen Rungenkorb, nicht ausgelastet sind und entsprechend das Potenzial nicht ausspielen können. БОСК (1952) führt dies auf die geringere Einfederung und die damit verbundene kleinere Kontaktfläche mit dem Boden zurück.

Während der Einsatz von Traktionshilfsmitteln und die Variation des Reifeninnendruckes mit vergleichsweise geringem Aufwand bewerkstelligt werden kann, sind die im Weiteren beschriebenen Einflussfaktoren auf das Traktionsverhalten deutlich weniger veränderlich. So wird die Bereifung nur selten geändert (meistens als Ersatzbeschaffung), wohingegen der Wechsel der Zuladung sowie die mehrfache Befahrung einer Rückegasse nicht zu vermeiden sind.

Der Einfluss unterschiedlicher **Reifen** wurde im Versuchsdesign durch einen neuen Rädersatz (Konfiguration 2, 6, 12 und 16) berücksichtigt. Obwohl durch das aggressivere Profil gepaart mit einer deutlich größeren Profiltiefe eine Verbesserung des Traktionsverhaltens zu erwarten ist, konnte dies nicht anhand der linearen Regressionen bestätigt werden. Für die Betrachtung mit reduzierten Einflussfaktoren (über nahezu alle Versuchsserien) erfolgt in keinem Modellschritt die Aufnahme der Dummy-Variable *Reifen*, die mit dem Eintrag „1“ die Neureifen kennzeichnet. Bei der linearen Regression mit allen Faktoren (und reduziertem Versuchsserienumfang) wurde die Variable relativ früh in das Modell einbezogen. Die Regressionskoeffizienten schwanken dagegen zwischen den einzelnen Modellschritten deutlich (zwischen 0,023 und 0,057). Für die Befahrung

von geneigtem Gelände bedeuteten die positiven Werte eine vergleichsweise geringe Verbesserung der befahrbaren Steigung.

Ein richtiger Vergleich zwischen Neureifen und gebrauchten Reifen findet sich lediglich bei VECHINSKI ET AL. (1999). Neben der eigentlichen Untersuchung des Einflusses von Ketten für den Einsatz auf Forstreifen wurden auch die Auswirkungen der unterschiedlichen Gebrauchszustände eines Reifens dargestellt. Durch einen Einzelradtester konnten jeweils einheitliche Schlupfzustände von 10 % und 20 % sichergestellt werden. Auf drei der insgesamt vier untersuchten Böden ergab sich eine geringe Verschlechterung des Traktionsverhaltens durch die Neureifen, während auf lediglich einem Untergrund eine Verbesserung der Zugkraft zu verzeichnen war. Da die Versuche unter vergleichsweise trockenen Bodenbedingungen absolviert wurden, ist davon auszugehen, dass der gebrauchte Reifen mit der geringeren Profiltiefe eine bessere Haft- und Gleitreibung auf den Untergründen erzeugen kann und die Bedeutung des Formschlusses zwischen Reifenprofil und dem Boden reduziert ist. Ähnliche Überlegungen finden sich bei BOCK (1952), der unter trockenen Bedingungen ebenfalls einen Traktionsvorteil für Reifen mit relativ geringer Profiltiefe sieht. Diese Vorstellung deckt sich mit den Untersuchungsergebnissen von O'BRIEN (1991), der bei unter 20 % Schlupf eine bessere Traktion mit gebrauchten und somit weniger profilierten Reifen verzeichnete. Für feuchtere oder lockere Böden wäre jedoch mit einem besseren Traktionsverhalten des Neureifens zu rechnen. Die Unterschiede zwischen den Reifen im Rahmen der vorliegenden Untersuchung waren jedoch nicht signifikant, sodass keine Unterscheidung der Reifen für das berechnete Prognosemodell erfolgt. Der mögliche Einfluss der unterschiedlichen Bereifung müsste genauer untersucht werden, um eventuell Bereiche zu identifizieren, in denen deutliche Unterschiede bestehen. Für das Prognosemodell wäre dies jedoch zu aufwändig und die praktische Bedeutung zu gering: Angesichts des Aufwands für einen Reifenwechsel ist es nur schwer vorstellbar, dass Forstmaschinenbetreiber die Bereifung in der Praxis für einzelne Einsätze wechseln.

Dass der Wechsel von Reifen der gleichen Größe einen Einfluss haben kann, ist aus Vergleichen verschiedener Autoreifen bekannt (vgl. ADAC, 2009). Auch für land- und forstwirtschaftliche Untergrundbedingungen bestehen entsprechende Untersuchungen. DABROWSKI ET AL. (2006) haben beispielsweise Ganzjahresreifen mit speziellen Winterreifen für sechsrädrige Militärfahrzeuge verglichen und dabei eine geringe Verbesserung durch die Montage der Ganzjahresreifen festgestellt. Bei den Untergründen handelte es sich zum einen um Sandboden und zum anderen um einen lössdominierten Boden. BOCK (1952) stellt demgegenüber die Auswirkungen unterschiedlicher Profilbauweisen dar. So wurden anfangs Reifen mit einem geschlossenen Profil verwendet, die mittlerweile durch solche mit offener Profilgestaltung abgelöst wurden. Letztere sind in der Lauffläche weicher und können sich so besser an den Boden anpassen, was zu einer größeren Kontaktfläche mit entsprechend positiven Auswirkungen auf das Traktionsverhalten führt.

Häufiger als der Vergleich zwischen Reifen einer Größe ist jedoch die Frage nach bauartbedingten Unterschieden. Bereits seit den Anfängen der Radialreifen für Geländeeinsätze werden diese mit Reifen in der ursprünglich diagonal geschlagenen Bauweise verglichen (vgl. u.a. SÖHNE, 1976; AL HAMED UND AL JANOBI, 2001). Entscheidender als die Bauart sind hingegen die Abmessungen der Reifen. So ergeben sich für größere Reifendurchmesser bei ansonsten gleicher Maschine bessere Traktionswerte (vgl. u.a. ENGEL, 1974; CANILLAS UND SALOKHE, 2002; KORLATH, 2007). Bei BOCK

(1952) zitierte Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, dass die Triebkraft und somit der Traktionsbeiwert eines Reifens linear zum Außendurchmesser ansteigt. Einen Teil dieses Effektes ist auf den reduzierten Rollwiderstand und auf die verlängerte Aufstandsfläche zurückzuführen. Eine vergrößerte Kontaktfläche und ein dadurch verbessertes Traktionsverhalten des Reifens ist zudem durch die Bestückung mit Breitreifen zu erwarten (vgl. u.a. JACKE, 1989; AL HAMED ET AL., 1994; JACKE, 1999; RADEMACHER, 1999).

Trotz identischer Aufstandsfläche wäre eine Reduktion der Zugkräfte für rückwärtsgerichtete Fahrten zu erwarten, da sich hier die Drehrichtung und somit optimale „Arbeitsrichtung“ des Profils ändert. Diese Vermutung wurde durch einen einzelnen Versuch bestätigt. Die dabei in Fahrtrichtung mehrfach erfolgreich befahrene Steigung konnte rückwärts nicht bewältigt werden. Erst das erneute Drehen des Rückzugs führte zur Überwindung der Steigung.

Die Wahl der Bereifung hat einen Einfluss auf das Traktionsverhalten von Fahrzeugen auf unterschiedlichem Untergrund. Wenn der Unterschied im Rahmen der vorliegenden Versuche nicht sehr deutlich ist, so liegt dies vielfach an dem hohen Bodenwassergehalt während der Versuche mit den Neureifen. Es fallen mehr Versuchsserien mit den neuen Reifen in die Gruppe (III) von Punktwolken, die einen auffallend flachen Anstieg und ebensolche Traktionsmaxima zeigen. Die Ursache hierfür liegt vermutlich in Fehlern bei der Ansprache des Wassergehalts durch die TDR-Sonde (vgl. Kap. 6.1.4). Werden die Versuche der dritten Gruppe aus der Analyse ausgeklammert, so ergibt sich ein deutlicher Traktionsvorteil durch die Neubereifung des Rückzugs. Bei der Betrachtung der Neigungsangaben für einen akzeptierten Schlupf von 25 % reduziert sich dieser Vorsprung jedoch etwas. Eine mögliche Ursache ist die bessere Verzahnung der Neureifen mit dem Untergrund bei höherem Schlupf. Hier nimmt die Bedeutung des Formschlusses zwischen dem Reifenprofil und dem Boden zu.

Bei der Holzbringung mit dem Forwarder wird dieser im Bestand mit den eingeschlagenen Rohholzsortimenten **beladen**. Dadurch erhöht sich im Laufe des Rückzyklus zum einen die Gesamtmasse der Maschine und zum anderen verändert sich die Lastverteilung zwischen dem vorderen und dem hinteren Bogie. Der Traktionsbeiwert, wie er in der vorliegenden Studie verwendet wird, geht davon aus, dass sich die Zugkraft des Fahrzeugs proportional mit dem Faktor des Kraftschlussbeiwertes zur Gewichtskraft der angetriebenen Achsen (in diesem Falle alle) verhält. Daher dürfte die zusätzliche Ballastierung keinen Einfluss auf das Traktionsverhalten haben. Die linearen Regressionen in Kap. 5.4.2 zeigen jedoch eine leichte Reduktion der Zugkräfte infolge der Beladung. Die Erhöhung der Gesamtmasse führte somit während der Versuche zu einer Reduktion der Traktionsbeiwerte.

Ähnliche Auswirkungen der Beladung sind bei PYTKA ET AL. (2006) beschrieben. Durch die zusätzliche Beladungsmasse hat sich die Zugkraft eines Militärlastwagens zwar erhöht, die Veränderung der Zugkraft fiel jedoch deutlich geringer aus als die Veränderungen der Fahrzeuggesamtmasse. Eine Erhöhung der Radlasten um 45 % führte zu einem Anstieg der gemessenen Zugkraft um lediglich 30 %. Die Versuche wurden auf Sand- und Lössböden durchgeführt. Zu einer umgekehrten Einschätzung kommt БОК (1952), der über 15 % Schlupf von einer Zunahme des Kraftschlussbeiwertes bei steigender Achslast ausgeht. Für eine beladene Maschine bei sonst gleichem Reifen ergeben sich also höhere Traktionsbeiwerte bei gleichem Schlupfprozent als bei einer vergleichbaren unbeladenen Maschine. БОК (1952) stellt zudem insgesamt eine Zunahme

des Traktionsbeiwertes für steigende Achslasten fest. Als Ursache gibt BOCK (1952) die mangelnde Auslastung des Reifens an. Durch die höhere Auflast vergrößert sich die Kontaktfläche zwischen dem Reifen und dem Untergrund. Für den nicht ausgelasteten Reifen ergeben sich, von sehr weichen Böden abgesehen, daher geringere Zugkräfte. Bei einer Ausnutzung der Reifentraglast zwischen 60 % und 100 % kommt es jedoch zu konstanten Kraftschlussbeiwerten, so dass BOCK (1952) grundsätzlich die Annahme des Versuchs stützt, dass die Beladung keinen Einfluss auf die Traktionsbeiwerte hat. Unter gewissen Bedingungen sind jedoch Veränderungen durch die zusätzliche Last nicht auszuschließen.

Eine interessante Sichtweise findet sich bei LI UND SANDU (2007), die ein Traktionsmodell (Simulation) für Geländefahrzeuge beschreiben. Dabei wird die Beladung für den Traktionsbeiwert erst dann relevant, wenn dadurch die Tragfähigkeit des Bodens beeinträchtigt wird. Als mögliche Ursache ist der überproportionale Anstieg des Rollwiderstands zu sehen. Dies könnte für einzelne Versuchsserien der Fall gewesen sein, sodass sich insgesamt eine leichte Verschlechterung des Traktionsverhaltens durch die Beladung erklären lässt. Hinzu kommt, dass die Kontaktfläche des Reifens nicht linear zur Auflast zunimmt und so der Druck in der Fläche ansteigt. Der höhere Kontaktflächendruck gleicht den größten Teil der geringeren Aufstandsfläche aus. Die Auswirkungen der Beladung sind daher insgesamt gering einzuschätzen. UPADHYAYA ET AL. (1989) haben bei Reifentests mit drei Reifen festgestellt, dass der Einfluss der Beladung deutlich hinter der Bedeutung unterschiedlicher Bodenbedingungen zurückfällt. Zeigen sich Auswirkungen der Beladung, so sind diese jedoch tendenziell eher traktionsmindernd als verbessernd.

Im Rahmen der Traktionsmessungen wurden die Rückegassen **mehrfach befahren** und für Wiederholungen verwendet. Durch die Befahrung, insbesondere in Bereichen mit hohem Schlupf, verändert sich der Oberboden. Für die Auswertung erfolgte jedoch keine Trennung nach der Anzahl der bereits absolvierten Überfahrten, sodass sich hier eine mögliche Fehlerquelle bietet. Dass eine entsprechende Mehrfachbefahrung Auswirkungen auf das Zugkraftverhalten haben kann, ist bei BECKER ET AL. (1989) und EISENBARTH (1989) beschrieben: Bei Versuchen auf feuchten Tonstandorten wurde eine Strecke solange befahren, bis sich ein Seilschlepper nicht mehr aus eigener Kraft bewegen konnte. Nach anfänglich akzeptablen Traktionsbedingungen haben sich diese mit jeder weiteren Befahrung verschlechtert. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass es sich um Versuche bei einem sehr empfindlichen Bodenzustand handelte. Unter landwirtschaftlichen Bedingungen findet sich oftmals eine Verbesserung des Traktionsverhaltens durch die vorherige Befahrung einer Spur. Dieser sogenannte Multipass-Effekt ist von HOLM (1972) näher untersucht worden und ergibt sich aus der Vorverdichtung der befahrenen Spur auf Ackerböden. Da es sich bei allen Versuchsgassen um bereits vorher genutzte Spuren handelt, ist die Bedeutung des Multipass-Effekts für die Versuche gering.

Dies bestätigt sich bei der Erweiterung der linearen Regression mit den Stufenmittelwerten (vgl. Kap. 5.4.2) um die Anzahl der Überfahrten. Dadurch ergibt sich ein deutlich umfangreicherer Datensatz, da für jede Versuchsserie je zehn Stufenmittelwerte multipliziert mit der Anzahl der Befahrungen entstehen. Die Regressionskoeffizienten für die Variable *Befahrung* schwanken dabei zwischen $-0,006$ und $+0,002$ (unbeladene Versuchsvarianten). Für fünf der sieben Maschinenkonfigurationen sind die berechneten Koeffizienten hochsignifikant, während bei zwei Konfigura-

tionen kein signifikanter Einfluss der Mehrfachbefahrung festzustellen ist. Insgesamt stellt sich der Einfluss der wiederholten Gassennutzung für die Versuche als vergleichsweise gering dar.

6.3.3.3 Bestandesbedingungen

Einige der möglichen Einflussfaktoren wurden bereits in Kap. 5.2 auf verschiedene Bereiche aufgeteilt. Unter die Bestandesbedingungen fallen neben der Baumart auch die Geländegestaltung und der Zustand der Rückegasse. Während der Einfluss der Steigung auf das Ergebnis in Kap. 6.2 diskutiert wurde, bietet insbesondere die Unterteilung in Nadel- und Laubholzbestände interessante Aspekte. So können sich durch die unterschiedlichen Wurzelsysteme Auswirkungen auf das Traktionsverhalten ergeben. Anhand der beiden linearen Regressionsmodelle lässt sich jedoch keine eindeutige Wirkrichtung erkennen. Für die Berechnung auf Basis nahezu aller Versuchsserien folgt eine Reduktion der Zugkräfte durch die Laubholzbestockung.

Sowohl die Reifen als auch die Traktionshilfsmittel greifen in die oberen Bodenschichten ein und können hier eine zusätzliche Abstützung der Kräfte durch das Wurzelwerk erhalten. Für die Fichtenbestände ist von einem flacheren Wurzelsystem auszugehen und somit von einer geringen Steigerung des Traktionsvermögens. Diese einfache Erklärungsmöglichkeit wird jedoch durch die Regression mit allen Einflussfaktoren nicht bestätigt. Der resultierende Regressionskoeffizient für die Variable *baumart_dummy* ist deutlich positiv und weist somit auf eine Traktionsverbesserung durch die Laubholzbestockung hin. Vergleiche mit landwirtschaftlichen Untersuchungen sind hier nicht möglich, da zum einen andere Wurzelwerke ausgebildet werden und zum anderen eine Vielzahl der Versuche auf frischgepflügtem Ackerboden durchgeführt werden. Trotz des uneinheitlichen Bildes, das die Bestockung und damit vornehmlich die Wurzelwerke der Baumarten hinterlassen, ist insbesondere für Maschineneinsätze mit Bogie-Bändern von einer traktionsfördernden Wirkung oberflächennaher Wurzelwerke auszugehen. Die Traktionsstollen von Ketten und Bändern erfahren durch die im Boden verlaufenden Wurzeln eine zusätzliche Abstützung der Maschinenkräfte. Dabei ist jedoch mit deutlichen Schäden der Gassenrandwurzeln zu rechnen (vgl. u.a MENG, 1978; KREMER ET AL., 2003; SCHARDT ET AL., 2007).

Ein weiterer, den Bestandesbedingungen zuzurechnender Faktor, ist die bei einzelnen Versuchsserien auftretende Querneigung der Rückegassen während der Traktionsmessungen. Das Regressionsmodell mit allen Einflussfaktoren lässt einen deutlichen Anstieg der Traktionsbeiwerte durch die Geländeneigung quer zur Fahrtrichtung erwarten. Je nach Ausrichtung der Geländestruktur sind jedoch unterschiedliche Auswirkungen möglich. So ist es zum einen denkbar, dass die Maschine abrutscht und dabei die Kraftübertragung auf den Untergrund behindert wird, zum anderen kann sich das Abrutschen zu einer zusätzlichen Kraftkomponenten in Fahrtrichtung entwickeln und so vermeintlich die Traktion verbessern. Da allerdings nur wenige Versuchsgassen eine entsprechende Querneigung aufweisen und der Einfluss zwischen den Regressionsmodellen (vgl. Kap. 5.4.2) variiert, sind die möglichen Auswirkungen auf das Prognosemodell zu vernachlässigen.

6.3.3.4 Bodenbedingungen

Neben der Ausrüstung der Versuchsmaschine entscheidet der Bodenzustand maßgeblich über das Traktionsverhalten. Am deutlichsten wird dies beim Bodenwassergehalt, der in beiden linearen Regressionsmodellen direkt nach der Dummy-Variablen für den Bändereinsatz in den Ausgleich aufgenommen wird. Die reduzierende Wirkung einer Zunahme des Wassergehalts ist bereits aus eigenen Untersuchungen (HITTENBECK, 2004; JACKE ET AL., 2004) bekannt und wurde in vielen Forschungsvorhaben verschiedener Institutionen bestätigt (vgl. u.a. HOLM, 1972; JENANE UND BASHFORD, 2000, DU PLESSIS UND YU, 2006). In welchem Umfang der Bodenwassergehalt das Traktionsverhalten der Maschine beeinflusst, variiert dabei stark. Insbesondere bei älteren Untersuchungen mit ganzen Fahrzeugen ergibt sich ein höherer Einfluss des Bodenwassergehalts, da die Vorderreifen oftmals nicht angetrieben werden und sie somit ein zusätzliches Bremsmoment erzeugen.

Viel interessanter ist jedoch die Frage nach den Auswirkungen unterschiedlicher Bodenarten. Im Zuge der linearen Regression zeigt sich eine besondere Bedeutung des Tongehalts der befahrenen Untergründe für die Traktion. Danach führt der Anstieg des Tonanteils zur Verbesserung des Traktionsbeiwerts. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass der in Teilen komplementäre Schluffgehalt mit einem negativen Vorzeichen in das Regressionsmodell eingeht. Zudem besteht für die Versuche eine deutliche Korrelation des Tongehalts mit dem Skelettgehalt des Untergrunds (vgl. Kap. 6.3.3.9). Grundsätzlich deckt sich der Anstieg der Traktionsbeiwerte durch einen zunehmenden Tongehalt mit Reibungsbeiwerten entsprechender Böden bei Scherfestigkeitsmessungen von SÖHNE (1952a). Dort zeigt sich ein klarer Anstieg der Reibungsbeiwerte von sanddominierten Böden über Lehme zu den Tonböden.

Da ein guter Zusammenhang zwischen den übertragbaren Antriebskräften auf den Boden und dem Widerstand besteht, den der Boden einem Abschertest entgegenbringt, beschäftigen sich viele Untersuchungen zur Mobilität von Maschinen im Geländeeinsatz mit der Scherfestigkeit des Bodens (vgl. u.a. OKELLO, 1994; WANJII ET AL., 1997; DU PLESSIS UND YU, 2006). FODA (1991) stellt beispielsweise eine gute Übereinstimmung zwischen den Scherfestigkeitswerten eines Bodens und dem Traktionsverhalten fest. KARAFIATH (1986) sieht den Scherwiderstand als Gegengewicht zur Zugkraft eines Geländefahrzeugs. Die Scherfestigkeit wirkt sich dabei doppelt auf die Mobilität von Fahrzeugen aus, da sie neben der Zugkraft auch die Fahrzeugmasse abstützt (vgl. u.a. WIERMANN ET AL., 2000; HORN ET AL., 2004) und so indirekt zur Reduktion des Rollwiderstands beiträgt. Gleiches gilt für den Skelettgehalt des Oberbodens, da durch die Beimischung des gröberen Materials eine zusätzliche Abstützung der übertragenen Kräfte erfolgt. Bestätigt wird der gleichgerichtete Einfluss der Scherfestigkeit und des Skelettanteils durch die Korrelation zwischen diesen Faktoren. Der Zusammenhang nach Pearson beträgt 0,315 und ist mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von unter 3 % signifikant. Sehr ähnliche Werte finden sich zudem für den Tongehalt, der ebenfalls eine positive Korrelation mit der Scherfestigkeit des Bodens aufweist (vgl. Kap. 6.3.3.5).

Der Boden als Widerlager für die Antriebskomponenten hat eine besondere Bedeutung für das Traktionsverhalten von Fahrzeugen auf nachgiebigem Untergrund. Durch die Zusammensetzung des Bodens aus unterschiedlichen Korngrößenfraktionen, Skelettanteilen und organischen Materialien ist es, verglichen mit der Maschinenausrüstung, jedoch schwieriger die einzelnen Faktoren genau zu identifizieren. Entgegen den Maschinenparametern gibt es zudem stufenlose Verände-

rungen der Bodenzustände, die sich gegenseitig beeinflussen. Als wichtigster Unterschied zwischen den befahrenen Untergründen stellt sich der Wassergehalt im Oberboden dar. Bei der Zusammensetzung des Bodens aus Skelettanteilen und den verschiedenen Korngrößenfraktionen zeigen sich bereits Schwierigkeiten, da diese untereinander korrelieren. Für die vorliegenden Versuche wird jedoch die besondere Bedeutung des Skelettgehalts im Oberboden deutlich, da dieser maßgeblich die Bodenstabilität gegenüber den Kraftereinwirkungen des Reifens fördert. Obwohl die übrigen während der Versuche erhobenen Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf die Mobilität des Forwarders sich insgesamt mit den Erfahrungen anderer Untersuchungen decken, können nur zwei Faktoren in das Grenzneigungsmodell einbezogen werden. Durch die Vielzahl der möglichen Parameter und die teilweise geringen Effekte würde sich ansonsten eine praktisch nicht anzuwendende Pseudogenauigkeit des Modells ergeben.

6.3.3.5 Korrelation der Einflussfaktoren

Für die Modellentwicklung stehen insgesamt 18 mögliche Einflussfaktoren zur Verfügung. Die Vielfalt der Faktoren sowie der naturgegebenen Verbindungen zwischen beispielsweise einzelnen Bodenparametern führen zu unterschiedlichen Korrelationen zwischen den Faktoren. Im Weiteren kann nicht auf alle Zusammenhänge zwischen den Einzelfaktoren eingegangen werden, sodass exemplarisch lediglich einige Besonderheiten der Versuchsbedingungen beschrieben werden.

Bereits für die Bodenparameter angedeutet, zeigt sich ein positiver Zusammenhang zwischen dem Tongehalt der Versuchsflächen und dem Skelettgehalt. Dieser weist eine Korrelation nach Pearson von 0,747 auf und ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von unter 0,1 % hochsignifikant. Die Auswirkungen dieses Zusammenhangs zeigen sich bei der linearen Regression mit allen Einflussfaktoren (vgl. Kap. 5.4.2) anhand der vergleichsweise späten Aufnahme des Skelettgehalts in das Regressionsmodell. Obwohl es sich um einen wichtigen Faktor für das Traktionsverhalten handelt, führt dieser nur zu einer geringen Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes, da der gleichgerichtete Effekt des Tongehalts den Einfluss überdeckt.

Der Zusammenhang kann auf zwei mögliche Ursachen zurückzuführen sein. So kann der erhöhte Tongehalt in Kombination mit hohem Skelettgehalt Ausdruck der fehlenden oder geringen Lössdecken sein, oder es handelt sich um einen räumlichen Zusammenhang. Letzteres dominiert in diesem Fall, da skeletthaltige Böden vorwiegend in der Revierförsterei Kapellenfleck befahren wurden, die zudem sehr tonhaltige Böden aufweist. Die Versuche auf skelettarmen Böden erfolgten hingegen überwiegend in Reinhausen und Münden, wo sich mächtigere Lössdecken mit geringerem Tongehalt finden.

Neben der beschriebenen Verbindung zwischen dem Ton- und Skelettgehalt ergeben sich zudem weitere Korrelationen des Skelettgehalts mit den in Tabelle 24 (nächste Seite) dargestellten Boden- und Bestandesparametern. Der negative Zusammenhang mit dem Baumarten-Dummy (Variableneintrag „1“ für Laubholzbestände) ergibt sich wiederum aus den räumlichen Bedingungen. So sind die Versuchsbestände der Försterei Kapellenfleck nahezu ausschließlich mit Fichten bestockt, während umgekehrt die skelettfreien Böden in Reinhausen vorwiegend mit Laubholz bestanden sind. Die übrigen Korrelationen mit den verschiedenen Bodenparametern sind ebenfalls größtenteils auf die räumlichen Bedingungen zurückzuführen.

Tabelle 24: Korrelationen des Skelettanteils mit weiteren Einflussfaktoren

Einflussfaktor	Skelettanteil	
	Korrelation nach Pearson	Signifikanz (2-seitig)
Baumart Dummy	-0,400	0,004
Humusvorkommen	-0,699	0,000
Humusform	0,606	0,000
Bodenscherfestigkeit (während der Standortaufnahme)	0,314	0,025
Lagerungsdichte (in der Fahrspur)	-0,364	0,021
Lagerungsdichte (im Bestand)	-0,316	0,050
Tongehalt	0,747	0,000

Als weiteres Beispiel sind in Tabelle 25 die Korrelationen mit der Dummy-Variable *Baender* dargestellt. Während es zum einen zu den erwarteten Korrelationen mit den Maschinenparametern kommt, ergeben sich zum anderen auch Zusammenhänge im Datensatz zwischen der Bändermontage und der Bodenscherfestigkeit sowie der Humusform. Die negativen Korrelationen mit der Neureifenmontage und dem reduzierten Fülldruck entstehen, da die Bänder nur auf den gebrauchten Reifen montiert wurden und zudem seitens des Bänderherstellers ein hoher Fülldruck gefordert wird. Der hochsignifikante Zusammenhang mit der Kettenmontage beruht auf dem vorrangig gemeinsam vorgesehenen Einsatz der Traktionshilfsmittel. Wiederum die Unterschiede zwischen den Versuchsräumen können ein Erklärungsansatz für die Korrelationen der Bändermontage mit den Bodenzustandsparametern sein. So wurden Versuche mit den Traktionshilfsmitteln vorwiegend in der Revierförsterei Reinhausen durchgeführt.

Tabelle 25: Korrelationen der Variable *Baender* mit weiteren Einflussfaktoren

Einflussfaktor	Baender	
	Korrelation nach Pearson	Signifikanz (2-seitig)
Reifen („1“ für Neureifen)	-0,413	0,003
Druck Dummy („1“ für reduzierten Fülldruck)	-0,397	0,004
Ketten („1“ mit Ketten)	0,586	0,000
Humusform	-0,314	0,025
Bodenscherfestigkeit (während der Standortaufnahme)	-0,435	0,001

Anhand der vielfältigen Zusammenhänge wird deutlich, dass sich die vielen möglichen Einflussfaktoren untereinander stark beeinträchtigen. Neben den Abhängigkeiten aufgrund der räumlichen Unterschiede zwischen den Versuchsförstereien gibt es solche, die auf allgemein gültigen

Zusammenhängen der Faktoren untereinander beruhen. Daher können nur die wichtigsten Erklärungsvariablen in das Grenzneigungsmodell aufgenommen werden. So zeigen die stark variierenden Regressionskoeffizienten der einzelnen Faktoren zwischen den Modellbildungsschritten der linearen (schrittweisen) Regressionen die gegenseitige Einflussnahme und verdeutlichen zugleich die Probleme bei der Interpretation der berechneten Koeffizienten. Durch die Verdichtung auf wenige Faktoren wird im Modell zwar auf das Erklärungspotenzial der übrigen Einflüsse verzichtet, dafür ergeben sich für die berücksichtigten Größen jedoch verwertbare Einschätzungen zu den Auswirkungen auf das Traktionsverhalten.

6.3.4 Prognosemodelle

6.3.4.1 Entwicklung

Die Prognosemodelle für die ökologischen und die absoluten Einsatzgrenzen in Hanglagen basieren jeweils auf einer linearen Regression mit dem Zielwert der Steigung (vgl. Kap. 5.4.3). Die verwendeten Zielwerte (bodenökologische Grenzneigung) entstammen dem Ausgleich des reduzierten Datensatzes. Als Alternativen hierzu bestehen vergleichbare Ausgleichsmodelle für den vollständigen Datensatz sowie für die Stufenmittelwerte. Darüber hinaus ist ein der maximalen Grenzneigung vergleichbares Vorgehen denkbar, bei dem die Zielgröße über den Mittelwert der Traktionsbeiwerte der Schlupfstufe „25“ bestimmt wird. Die Unterschiede zwischen den Varianten sind jedoch gering, und durch die reduzierten Daten wird die Variabilität der Ausgangsdaten in weiten Teilen erhalten, ohne dass der Bereich geringen Schlupfs überrepräsentiert wird.

Anhand der zwei Regressionsmodelle für die Grenzneigungen bei 25 % Schlupf und die absolute Einsatzgrenze in Hanglagen zeigt sich die unterschiedliche Bedeutung der Einflussfaktoren. Während für die schlupfbasierte Grenzneigung eine stärkere Auswirkung der wechselnden Bodenbedingungen (gekennzeichnet durch den Wasser- und Skelettgehalt) festzustellen ist, ist der Einfluss der Bodenfaktoren für die maximal befahrbare Hangneigung geringer. Umgekehrt spielen die Traktionshilfsmittel ihren deutlichen Traktionsvorteil erst bei höherem Schlupf und somit bei Berechnung der absoluten Grenzneigung voll aus. Der positive Effekt der Profilierung und der Ketten scheint sich erst bei höheren Schlupfwerten zu zeigen (vgl. a. Kap. 6.3.3.2).

Basis des Prognosemodells ist die in Kap. 2.5 beschriebene direkte Umrechnung des Traktionsbeiwertes in die befahrbare Geländeneigung. Während diese Betrachtungen auf dem Traktionsbeiwert und somit auf entsprechenden Messungen basieren, wird die Bodenfestigkeit vor allem für militärische Anwendungsgebiete begutachtet. Hintergrund ist die Tragfähigkeit für Militärfahrzeuge und die Kraftübertragung auf den Untergrund. MACLAURIN (2007) vergleicht vier verschiedene Mobilitätsmodelle, die mehrheitlich auf Messungen des Cone-Index (CI) aufbauen. Ähnliches findet sich bei SAARILATHI (2002c), der unterschiedliche Mobilitätsmodelle auf deren Übertragbarkeit auf Forstmaschinen überprüft. Insbesondere die Anwendung auf die typischen Feuchtstandorte Skandinaviens sowie die Hanglagen bereiten dabei jedoch Probleme.

Das verbreitetste Mobilitäts-Modell ist das Nato Reference Mobility Model, das seit Anfang der 1990er in der zweiten Auflage besteht (AHLVIN UND HALEY, 1992). Dabei werden Anforderungen ei-

nes Fahrzeugs an die Bodenfestigkeit mit einer bewerteten Bodentragfähigkeit verglichen. Letztere berechnet sich aus dem Ergebnis mehrerer Penetrometermessungen zur Bestimmung des CI multipliziert mit einem Korrekturfaktor für den zu befahrenen Boden. Die Fahrzeugdaten sind einer Tabelle zu entnehmen und können unterschieden werden für eine einzelne Befahrung oder 50 Überfahrten mit dem gleichen Fahrzeug. Letzteres ist entscheidend für größere Truppenbewegungen, da immer mehrere Fahrzeuge im Verbund fahren.

WEISE UND JIRIKOWSKI (2008b) haben dieses in der US ARMY angewandte Modell (US ARMY, 1994) auf den Raupenharvestereinsatz unter feuchten Bedingungen angewendet und sind dabei zu einem „unrealistischen“ Ergebnis gekommen. Als Ursache hierfür sind die Grenzen des Modells bei rutschigen Untergrundbedingungen zu vermuten. Diese sind jedoch für forstliche Maschineneinsätze in Hanglagen eher die Regel als die Ausnahme, sodass nur auf der Tragfähigkeit basierende Modelle die Grenzen beim Forstmaschineneinsatz nicht richtig abschätzen können. Einige der bei MACLAURIN (2007) vorgestellten Modelle ergänzen in der Modellerstellung die Tragfähigkeitsmessungen um Traktionsmessungen mit Fahrwerksteilen. Die Prognose noch befahrbarer Standorte und Neigungen basiert in der weiteren Anwendung jedoch wieder auf Penetrometermessungen. Für militärische Anwendungen ergeben sich anhand derartiger Modelle gute Planungsinstrumente. Der Fokus liegt jedoch auf anderen Schwerpunkten, als sie die vorliegende Fragestellung nach Einsatzgrenzen für vorwiegend radbasierte Forstmaschinen erfordert. Zudem sind die Modelle auf Basis der Bodentragfähigkeit auf eine breite Standortbasis zugeschnitten, während insbesondere im Versuchsraum Südniedersachsens die Lössböden stark dominieren. Durch die Traktionsmessungen auf sehr ähnlichen Untergründen kann das vorgestellte Prognosemodell daher spezifischere Informationen liefern.

Schwierigkeiten ergeben sich lediglich durch die Einteilung der Skelettgehalte im Oberboden in drei Skelettgehaltsklassen. Die ordinalisierte Einteilung verbunden mit der Zuordnung von Zahlen, die für Berechnungen genutzt werden, kann zu erheblichen Fehldeutungen führen. Ein Vergleich zwischen skeletthaltigen Böden und solchen ohne Skelettanteile ist demgegenüber weniger problematisch (die Regressionskoeffizienten der übrigen Variablen bleiben nahezu gleich). Durch die Zahlenzuordnung („1“ für Skelettgehalte bis 7 %; „2“ für höhere Skelettgehalte) wird das Regressionsergebnis direkt beeinflusst. So ergibt sich mit den verwendeten Zahlen eine Verdoppelung des Skelettzuschlags bei Skelettgehalten über 7 %. Würden die obere Skelettgehaltsstufe beispielsweise mit der Zahl „4“ belegt werden, so ergäbe sich eine Vervierfachung eines vermutlich geringeren Skelettzuschlags. Für die vorliegenden Daten stellt die vorgenommene Trennung der Skelettanteile jedoch eine gute Lösung dar. In die höhere Stufe fallen vorwiegend die geschobenen Rückewege im Bereich der Revierforsterei Kapellenfleck, die einen entsprechend deutlichen Effekt erwarten lassen. Die Skelettgehaltsgrenzen mit den eingesetzten Zahlenwerten wurden zudem mit Blick auf die Verbesserung des linearen Regressionsmodells ausgewählt.

6.3.4.2 Grenzneigungen

Das in Kap. 5.4.3 berechnete Prognosemodell weist ein weites Spektrum an Neigungsangaben auf. Unter sehr feuchten Bedingungen ohne Traktionshilfsmittel und auf skelettfreiem Untergrund ergibt sich eine bodenökologische Grenzneigung von lediglich 17 %, während unter sehr „traktiven“ Bedingungen (stark skeletthaltiger Boden und geringer Bodenwassergehalt) mit Ketten und

Bändern auch Steigungen von 60 % noch mit vertretbarem Schlupfniveau befahrbar scheinen. Im Gegensatz zu sonst üblichen subjektiven Einschätzungen über Einsatzgrenzen bei der hochmechanisierten Holzernte basieren die vorgestellten Grenzen auf terramechanischen Messungen und Berechnungen. Für den deutschsprachigen Raum reicht das Spektrum der Grenzneigungsangaben für radbasierte Forstmaschinen von knapp 30 % Steigung bis zu 60 % Steigung unter sehr guten Bedingungen (vgl. Kap. 1.3).

Obwohl die Mechanik zwischen den Antriebsrädern und dem Boden identisch ist, gehen die meisten Autoren davon aus, dass sich die Einsatzgrenzen von Harvestern und Forwardern unterscheiden. Einigkeit herrscht dabei über höhere Steigungen für den Harvestereinsatz. Hier zeigt sich die Bedeutung subjektiver Einschätzungen am deutlichsten, da rein mechanisch keine Traktionsunterschiede zu erwarten sind. Hinzu kommt, dass Radharvester vorwiegend über sechs Räder verfügen, während Forwarder oftmals auf zwei Bogie-Achsen und somit auf acht Rädern fahren. Durch das zusätzliche Räderpaar ist von einem leicht verbesserten Bodenkontakt auszugehen, der eine entsprechend bessere Steigfähigkeit bewirkt.

Bei den meisten Angaben für Einsatzgrenzen ist nicht eindeutig zu erkennen, ob diese sowohl für die Fahrt bergauf als auch bergab gelten. Insbesondere bei sehr hohen Neigungsangaben, wie sie beispielsweise bei SAUTER ET AL. (1998) zu finden sind, ist von einer Beschränkung auf die Fahrt bergab auszugehen. Die Validierungsmessungen bestätigen dies. So wurde eine Versuchsserie mit dem Rückzug und Neubereifung bei sehr guten Bodenbedingungen (geringer Bodenwassergehalt und knapp 10 % Skelettgehalt) und 40 % Geländeneigung durchgeführt. Obwohl der mittlere Schlupf mit 23 % knapp die 25 % Schlupfgrenze unterschritten hatte, zeigten sich bereits deutliche Traktionsprobleme des Forwarders. Mit einzelnen Schlupfwerten während der Befahrung von teilweise über 70 % (vgl. Kap. 5.5.4) kann hier nicht mehr von einer bodenökologisch vertretbaren Befahrung ausgegangen werden.

Ein Vergleich der Steigungsangaben anderer Autoren mit den absoluten Grenzneigungen des Prognosemodells zeigt, dass bei Bodenwassergehalten unter 40 % die Standsicherheit gegen Abrutschen in den meisten Fällen gewährleistet ist. Dass ein Überschreiten dieser Grenzen Gefahren birgt, lässt sich, trotz teilweise unterschiedlicher Interpretation, bei SAUTER ET AL. (1998) feststellen. In einer Schönwetterperiode wurden teilweise Hangabschnitte mit über 60 % Geländeneigung befahren, was zum gelegentlichen Rutschen der eingesetzten Maschinen (Harvester und Forwarder) führte. Die Einhaltung der absoluten Grenzneigungsprognose dient gerade der Vermeidung solch unkontrollierter Fahrsituationen, die SAUTER ET AL. (1998) als noch befahrbar ausweisen.

Für die Arbeit mit dem Rückzug hangabwärts sind geringe Überschreitungen der ökologischen Grenzneigung, z.B. bei kurzen Absätzen im Gelände, sicher zu tolerieren. Bei deutlichen Abweichungen empfiehlt sich jedoch der Einsatz im Rahmen verbauter Traktionshilfswinden. Erste Hinweise zu einer solchen Technik finden sich bei SAUTER ET AL. (1998). Diese wurde maßgeblich von der Herzog Forsttechnik in der Schweiz forciert (vgl. u.a. FORBRIG ET AL., 2004) und ist mittlerweile bei verschiedenen Herstellern in abgewandelten Formen zu finden (vgl. u.a. MÜHLHAUSEN, 2008; ANONYMUS, 2009). Die Einsatzgrenzen hochmechanisierter Erntetechnik erweitern sich durch den Einbau solcher Traktionshilfswinden deutlich, können aber nicht ins Grenzenlose verschoben werden. Um auch für diese Technik verlässliche und die Betriebssicherheit gewährleistende

Grenzneigungen zu erhalten, wurde im Prognosemodell neben der ökologischen auch die absolute Einsatzgrenze bestimmt. Letztere stellt einen sicheren Stand des Rückezugs auf größeren Steigungen sicher. Die Grenzen für radbasierte Maschinen liegen dabei je nach Untergrundbeschaffenheit zwischen knapp 40 % und 60 % Steigung.

6.4 Hangauswertung

6.4.1 Überprüfung der Neigungsprognosen

Die Validierungsfahrten in Hanglagen dienen der Überprüfung der prognostizierten Grenzneigungen für die unterschiedlichen Maschinenkonfigurationen. Das Prognosemodell gibt dabei die mit 25 % Schlupf noch befahrbaren Steigungen vor. Da nur selten die Bedingungen (Bodenzustand und Neigung) einer Fläche mit exakt jenen der Vorhersage übereinstimmen, kann nur verglichen werden, ob die befahrene Steigung mit im Mittel 25 % Schlupf befahrbar ist. Mit einer Trefferquote von knapp 80 % zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der Vorhersage und dem praktischen Versuch. Anhand der wenigen Fehleinschätzungen zeigt sich die Eignung des Prognosemodells zur Vorgabe von Einsatzgrenzen für die hochmechanisierte Holzernte in den Wäldern Südniedersachsens.

Obwohl sich eine gute Übereinstimmung zwischen Modell- und Versuchsergebnissen ergibt, kann das Schlupfniveau der einzelnen Versuchsserien nicht zuverlässig (genau) abgeschätzt werden. Ansätze, den mittleren Schlupf vorherzusagen, führen zu teilweise enormen Abweichungen. Dies deckt sich jedoch mit dem Schlupfspektrum, das sich für einen Traktionsbeiwert (der wiederum mit einer Steigung verbunden ist) anhand der Streuwolken (vgl. Kap. 5.3.1) ergibt. Kleinere Unterschiede der Versuchsbedingungen können so zu einer deutlichen Verschiebung des mittleren Schlupfniveaus führen. Dies wird auch für kleinere Überschreitungen der ökologischen Grenzneigungsangabe deutlich, da diese teilweise zu einem erheblich höheren Schlupf als erwartet führen. Entsprechend kommt es auch deutlich vor Erreichen der absoluten Grenzneigung bereits zum Festfahren des Rückezugs. SAARILATHI UND ALA ILOMÄKI (1997) geben für eine ähnliche Fragestellung zu bedenken, dass die Veränderung des Schlupfs von 20 % auf 100 % groß erscheinen mag, die ursächliche Veränderung der Einsatzbedingungen jedoch vergleichsweise gering sein kann. Dabei muss berücksichtigt werden, dass sich das Reifenprofil bei höherem Schlupf zusetzt und die Selbstreinigung des Profils nicht mehr ausreicht. Dadurch geht die Formschlusskomponente der Traktionsgleichung weitestgehend verloren und die noch befahrbare Neigung reduziert sich. Einen ähnlichen Bruch der befahrbaren Geländeneigungen beschreibt auch das Nato Reference Mobility Model (AHLVIN UND HALEY, 1992). Überschreiten die vom Fahrzeug auf den Boden zu übertragenden Kräfte die Bodentragfähigkeit, ist mit Problemen während der Befahrung zu rechnen.

Ein Vergleich der Messergebnisse mit anderen Untersuchungen gestaltet sich sehr schwierig, da sich meistens keine Angaben zum tatsächlichen Schlupf bei der Befahrung von Hanglagen finden. FRØNSDAL (1985) misst bei 40 % Steigung Schlupfwerte zwischen 10 % und 40 %. Die Unterschiede führt er vorrangig auf die Hindernishöhe (Wurzelanläufe, Blöcke, etc.) im Verlauf der Fahrwege zurück. SAARILATHI UND ALA ILOMÄKI (1997) stellen unter „sehr feuchten“ Untergrundbedin-

gungen die Immobilisierung eines Rückezugs bei 34 % Steigung fest. In der gleichen Untersuchung lassen sich jedoch Neigungen unter 20 % mit weniger als 20 % Schlupf befahren. Letzteres stimmt mit den Einschätzungen der vorliegenden Arbeit überein. Problematisch für die direkte Vergleichbarkeit sind fehlende Angaben zum Boden und insbesondere zum Bodenwassergehalt.

Vergleiche mit Einschätzungen zur Befahrbarkeit bestimmter Steigungen (vgl. Kap. 6.3.4), die nicht auf Messungen des Schlupfs beruhen, verbieten sich, da es sich oftmals um sehr subjektive Beurteilungen handelt. Zudem lassen sich die Versuchsbedingungen nur schwer miteinander vergleichen. Bereits kleinere Unebenheiten der Rückegasse können den Schlupf empfindlich ansteigen lassen und so den Beginn eines zugesetzten Profils markieren. Während der Versuche konnte vereinzelt ein deutlicher Effekt einzelner stärkerer Wurzeln auf das Fahrverhalten des Rückezugs festgestellt werden. Beim Erreichen entsprechender Hindernisse reduzierte sich die tatsächliche Fahrgeschwindigkeit, während die Geschwindigkeit am Radumfang nahezu gleich blieb. Nach Überwindung dieser kleineren Unebenheiten stieg die Fahrgeschwindigkeit wieder deutlich an.

Insgesamt zeigt sich anhand der Validierungsfahrten die Qualität des Prognosemodells. Vor allem im Hinblick auf die Fragestellung einer bodenökologischen Steigungsangabe wird der eher konservative Ansatz des Modells deutlich. Dabei werden die noch befahrbaren Lagen eher unter- als überschätzt. Für die betroffenen Bestände ist dies ein wichtiger Ansatz, um die Erosionsschäden dieser sensiblen Bereiche zu reduzieren.

6.5 Konsequenzen

6.5.1 Hochmechanisierte Holzernte in Hanglagen

Die ökonomische Nutzung des Rohstoffes Holz ist, vor allem bei schwächeren Dimensionen, auf die hochmechanisierte Holzernte mit Harvestern und Rückezügen angewiesen. Ursache ist die höhere Produktivität gegenüber manuellen Einschlagsverfahren. Entgegen der motormanuellen Holzernte mit der Motorsäge stellen die hochmechanisierten Verfahren jedoch höhere Anforderungen an die Bestandesbedingungen. So muss die Befahrbarkeit der Flächen gewährleistet und ein dichtes Rückegassennetz vorhanden sein, um die vollständige Aufarbeitung durch den Harvester und den nachfolgenden Rückezug zu ermöglichen. Die Befahrbarkeit der Bestände ergibt sich aus der Geländetopographie und der Tragfähigkeit des Untergrunds. Letztere korreliert dabei für die meisten Böden stark mit dem Bodenwassergehalt. Für die Topographie spielt neben Hindernissen durch beispielsweise Gesteinsblöcke oder Gräben auch die Neigung der Flächen eine besondere Rolle. In weiten Teilen Deutschlands ist die hochmechanisierte Holzernte daher limitiert durch die mit der Bodenfeuchte veränderliche Tragfähigkeit des Bodens und die ebenfalls vom Wassergehalt abhängige Befahrbarkeit von Steigungen. Obwohl unterschiedliche Vorstellungen von den Grenzen bestehen (vgl. Kap. 6.3.4), ist deren grundsätzliches Bestehen unstrittig.

Anhand des vorgestellten Prognosemodells ergibt sich unter vergleichsweise ungünstigen Bodenbedingungen (skelettfrei, 40 % Bodenwassergehalt) eine noch befahrbare Neigung von mindes-

tens 20 %. Bei gleichen Bedingungen und der Montage von Ketten und (Traktions-) Bändern erhöht sich diese Mindestneigung bereits auf 35 %. Für beide Einsatzbeispiele gilt jedoch, dass die Bodentragfähigkeit aufgrund des hohen Wassergehalts reduziert ist und sich deutliche Bodenverdichtungseffekte ergeben. Insbesondere in den Hanglagen ist die Befahrung jedoch auf trockene und tragfähige Witterungsbedingungen zu beschränken, um die Gefahren für den Boden und damit die langfristige technische Befahrbarkeit zu minimieren.

Bei dauerhaften Einsätzen im Terrain über 20 % Geländeneigung sollten daher frühzeitig Traktionshilfsmittel eingesetzt werden, um die Standsicherheit der Maschine zu gewährleisten. Diese vermeintliche Verbesserungen beim Bodenschutz (vgl. u.a. KREMER ET AL., 2007) und der Bediener-sicherheit wird allerdings mit stärkeren Schäden am Wurzelsystem der Gassenrandbäume (SCHARDT ET AL., 2007) und einem deutlichen Anstieg der Fahrzeugmassen (JACKE, 2007) erkauft. Zudem gibt es unterschiedliche Bändertypen, die sich entsprechend der Bandgestaltung auf das Traktionsverhalten und auch den resultierenden Bodendruck auswirken. Obwohl durch die Montage der Ketten und (Traktions-) Bänder unter günstigen Bedingungen auch Geländeneigungen deutlich über 40 % befahrbar scheinen, ist hier bereits die zusätzliche Sicherheit und technische Unterstützung einer Traktionshilfswinde zu empfehlen. Dabei wird die Maschine an einem Seil gesichert und durch eine spezielle Winde der Gleichlauf zwischen Seil und Fahrtrieb erreicht (NICK, 2005; MÜHLHAUSEN, 2005; STUHLMANN UND FINDEISEN, 2009). Neben der zusätzlichen Sicherheit kommt es zu deutlich geringerem Schlupf, sodass die Gefahr von Bodenerosionsschäden reduziert wird.

Der Einsatz der Hilfswindenteknik stellt jedoch besondere Anforderungen an die Bestände und deren Vorbereitung. So müssen die Rückegassen geradlinig der Gefällerrichtung des Hanges folgen und dürfen keine größeren Hindernisse aufweisen, um Schäden an den Gassenrandbäumen und dem Seil durch Scheuern zu verhindern. Zudem werden ausreichend dimensionierte Ankerbäume benötigt, da diese das Gewicht des beladenen Forwarders halten müssen. Hinzu kommt, dass die Länge der Rückegassen durch das montierte Seil begrenzt ist. Insgesamt handelt es sich bei den Traktionshilfswinden um ein Arbeitssystem, das auf einen kleinen Bereich von Hangneigungen optimiert ist (AMELANG, 2009).

Ein ähnliches Einsatzspektrum wie für die Hilfswindenteknik zeigt sich bei den Raupenfahrwerken. Durch das verbesserte Traktionsverhalten sind mit entsprechenden Fahrzeugen vergleichbare Hangneigungen zu bearbeiten. Während sich eine Vielzahl von Raupenharvestern findet, ist die nachfolgende Rückung teilweise mit Problemen behaftet. Vereinzelt Versuche, Rückezüge mit entsprechenden Fahrwerken auszustatten (SOPPA, 2001), konnten sich nicht in größerem Umfang durchsetzen. So bleibt für die Holzbringung der Einsatz der Windentechnik oder von Seilkränen. Letztere ermöglichen entgegen der Traktionshilfswindenteknik auch die Bearbeitung längerer Rückegassen. Demgegenüber steht der hohe und kostspielige Aufwand für die Installation der Seillinien.

Sowohl die Raupenfahrwerke als auch die Windentechnik sind an die physikalischen Grenzen der Standsicherheit gebunden. Entsprechende Grenzneigungswerte für Radfahrwerke finden sich in Kapitel 5.4. Neben dieser Grenze muss jedoch auch eine weitere technische Grenze berücksichtigt werden. Die Arbeit unter sehr steilen Bedingungen stellt eine erhebliche Beanspruchung der Maschinenbediener dar. FORBRIG ET AL. (2004) sehen daher die Einsatzgrenze der Windentechnik,

und dies lässt sich auf Raupenfahrwerke übertragen, in den Neigungsausgleichen der Forstmaschinen, d.h. in den Möglichkeiten Kran und Kabine trotz Neigung der Maschine in die Senkrechte zu bringen (vgl. a. Kap. 6.5.2). So ist beispielsweise der Sitz im Forcar FC 200 bis zu 50 % tiltbar. Das ermöglicht dem Bediener bis zu dieser Steigung eine annähernd horizontale Sitzposition.

Oberhalb von ca. 50 % Steigung ist daher auf eine Befahrung der Hanglagen außerhalb von Rücke- und Fahrwegen zu verzichten. Zusammen mit einer motormanuellen Fällung der Bäume können diese Wege zum Vorseilen von Raubbäumen genutzt werden, deren Aufarbeitung in einem weiteren Schritt durch den Harvester erfolgt. Wo die Infrastruktur nicht ausreichend Wege bietet, ist der Einsatz der Seilkrantechnologie erforderlich. Auch diese lässt sich mit der Aufarbeitung durch den Harvester und mit einer Forwarderrückung kombinieren. Der Anstieg der motormanuellen Arbeitsanteile und die seilgestützte Bringung unter stärker geneigten Geländebedingungen vervielfachen jedoch das Unfallrisiko gegenüber der hochmechanisierten Holzernte. Hinzu kommt ein ebenfalls deutlicher Anstieg der Aufarbeitungskosten, der den Erlös der eingeschlagenen Sortimente übersteigen kann.

Als grobe Leitlinie kann zusammenfassend festgestellt werden, dass sich Hangneigungen bis 20 % mit herkömmlicher radbasierter Erntetechnik ohne besondere Maßnahmen bewirtschaften lassen, wenn eine ausreichende Tragfähigkeit des Bodens gewährleistet ist. Für dauerhafte Einsätze bei mittleren Geländesteigungen bis 35 % sollten Harvester und Rückezug mit Traktionshilfsmitteln bestückt werden, um so die Arbeitssicherheit für die Bediener und einen verbesserten Schutz des Bodens vor Erosion zu gewährleisten. Bei einer weiteren Zunahme der Neigungen bis 50 % ist der Einsatz von Raupenlaufwerken oder Traktionshilfswinden zu empfehlen. Steigungen darüber hinaus sind mit einer ausschließlich hochmechanisierten Holzernte in den wenigsten Fällen unter Berücksichtigung der Arbeitssicherheit und der Ergonomie verantwortbar zu realisieren.

6.5.2 Technische Zusatzanforderungen in Hanglagen

Die Eignung einer Forstmaschine für die Arbeit in hängigem Gelände ergibt sich nicht nur aus dem Fahrwerk, also der Verbindung zum Boden, sondern auch aus technischen Anpassungen, die Bediener solcher Maschinen entlasten. Hierzu zählen insbesondere Einrichtungen, welche die Hangneigung für den Bediener ausgleichen. Dies ist zum einen für das Wohlbefinden des Fahrers entscheidend und zum anderen für das zielgerichtete Arbeiten. So verfügen Raupenharvester und auch viele Radharvester über Kabinen und Ausleger, die über Tilt- (Ausgleich nur entlang der Längsachse der Maschine) oder Nivelliereinrichtung verfügen und so einen aufrechten Stand der entsprechenden Fahrzeugteile ermöglichen. Dabei kann für die Kabine zumeist zwischen einem automatischen Ausgleich und einer manuellen Steuerung gewählt werden. Letztere wird von einigen Forstmaschinenführern bevorzugt, da so das Gefühl für die Bewegungen der Maschine nicht verloren geht und gefährliche Schrägeneigungen früher erkannt werden können.

Der Hangausgleich für den Ausleger oder Kran hat den Vorteil, dass die Kransäule parallel zu den Bäumen senkrecht steht und so weniger Schäden am verbleibenden Bestand entstehen. Durch den Krantilt behält der Fahrer die Möglichkeit, ohne umzudenken direkt den stehenden Baum oder die liegenden Sortimente anzusteuern und zu greifen. Würde der Kran demgegenüber im 90° Winkel zur befahrenen Hangneigung stehen, kann es beim Ansteuern einzelner Bäume,

durch die im Vergleich zu den Bäumen geneigte Drehachse des Auslegers zu Schäden am verbleibenden Bestand kommen. Bäume im Zwischenfeld können dabei durch den oberen Teil des Krans beschädigt werden bzw. einen auf Blickhöhe des Aggregats funktionierenden „Kurs“ auf den Zielbaum verhindern. Diese Einschränkung trifft sowohl auf Harvester als auch auf Forwarder zu, wobei jedoch erstere meistens über geeignete Kranausgleichsmöglichkeiten verfügen. Einige Harvester vereinen den Krantilt mit der Kabinennivellierung, da sowohl Ausleger als auch die Kabine auf einer gemeinsamen Plattform untergebracht sind. Forwarder sind demgegenüber nur selten mit Kabinennivellierung ausgestattet und müssen zudem oftmals ohne Krantilt auskommen. Ursache hierfür ist der erforderliche Bauraum für einen tiltbaren Kran, der durch den Runnenkorb begrenzt wird. So bieten lediglich einige Hersteller diese Technik im Rückzug als Sonderzubehör an, obwohl für die Arbeit in Hanglagen erhebliche Vorteile zu erwarten sind.

Bei der Befahrung stärkerer Steigungen kann es zum Aufsteigen der Bogie-Achsen kommen. Dabei wird das hangobere Rad entlastet, während das zweite Rad des Bogies eine zusätzliche Belastung erfährt. Der resultierende Traktionsverlust sowie der höhere Bodendruck lässt sich durch Hydraulikzylinder oder ein spezielles mechanisches Planetengetriebe verhindern (vgl. u.a. FEHRLE, 2006; JÖNSSON, 2008; GABRIEL, 2008a-c). Entsprechende Einrichtungen sind jedoch zur Zeit noch nicht bei allen Herstellern verfügbar.

Beim Harvestereinsatz in Hanglagen ist zusätzlich zu den bereits beschriebenen technischen Einrichtungen ein stärkerer Ausleger sinnvoll. Müssen Bäume gegen den Hang zur Maschine gezogen werden, sind die erforderlichen Kräfte höher als unter ebenen Bedingungen. Ausleger mit höheren Hub- und Schwenkmomenten gefährden jedoch die Standsicherheit der Maschinen zusätzlich, weshalb für die Ernte in Hanglagen vorwiegend größere und damit schwerere Harvester zum Einsatz kommen.

7 Zusammenfassung

Der Rohstoff Holz erfreut sich einer zunehmenden Beliebtheit sowohl für die stoffliche Verwendung als auch als Ersatz fossiler Energieträger. Um die langfristig steigende Nachfrage zu befriedigen, müssen bisher ungenutzte und vernachlässigte Rohholzpotenziale für den Markt zugänglich gemacht werden. Ein wichtiger Bereich sind dabei die Hanglagen der Mittelgebirge, die aufgrund der topografischen Schwierigkeiten bei der Holzernte über teilweise ungenutzte Holzreserven verfügen. Neben den ökonomischen Restriktionen der Bewirtschaftung kommt vielfach eine große Unsicherheit über die Grenzen der hochmechanisierten Holzernte bei stärkeren Hangneigungen hinzu.

Die Grenzen entstehen dabei zum einen durch die Standsicherheit der Maschinen, zum anderen durch die verursachten Bodenschäden in Folge der Befahrung. Letztere entstehen in Hanglagen verstärkt durch unangepasste Befahrungen mit zuviel Schlupf. Landwirtschaftliche Untersuchungen (SÖHNE 1952a) zeigen, dass mit zunehmendem Schlupf die Gefahr von Bodenerosion verstärkt wird. Für die vorliegende Fragestellung nach Einsatzgrenzen für die hochmechanisierte Holzernte wird die bodenökologisch vertretbare Schlupfgrenze bei 25 % gesehen. Ein stärkeres „Durchdrehen“ der Antriebsräder führt zum nahezu vollständigen Abscheren des Oberbodens, sodass die locker aufliegenden Bodenpartikel bei stärkerem Niederschlag ausgewaschen werden. Um diese zusätzliche Belastung für die Waldböden zu verhindern, sind objektive Grenzen für den Einsatz bodengebundener Holzerntetechnik erforderlich.

Auf Basis von Zugkraftmessungen in der Ebene wurde daher ein Grenzneigungsmodell für einen Rückezug entwickelt. Überlegungen zur Hangabtriebskraft und damit zum Steigungswiderstand, den die Maschine zu bewältigen hat, zeigen einen direkten Zusammenhang zwischen der Neigung und dem Verhältnis zwischen gemessener Zugkraft und Eigenmasse der Maschine. Der sogenannte Traktionsbeiwert lässt sich anhand von Zugkraft- und Schlupfmessungen unter ebenen Bedingungen bestimmen und in Abhängigkeit des Antriebsschlupfs darstellen. Mit Hilfe von linearen Regressionsmodellen kann das Traktionsvermögen vereinfacht beschrieben und der Hangabtriebskraft gegenübergestellt werden. Neben der maximalen Zugkraft ist dabei der Traktionsbeiwert bei 25 % Schlupf von besonderer Bedeutung, da sich dieser in die Steigung einer noch bodenvertretbaren Befahrung umrechnen lässt.

Als Versuchsraum diente das Südniedersächsische Bergland mit seinen typisch lössdominierten Standorten. Die Zugkraftmessungen weisen den Bodenwassergehalt sowie den Skelettgehalt des Oberbodens als wichtigste Bodenparameter für das Steigvermögen des Rückezugs aus. Während die Variation der Reifen und des Reifeninnendruckes nur geringe Auswirkungen zeigte, ergibt sich eine deutliche Verbesserung des Traktionsvermögens durch die Montage von Traktionshilfsmitteln auf den Forwarder. Anhand dieser Faktoren wurde eine Grenzneigungsprognose für einen bodenökologisch vertretbaren Maschineneinsatz sowie eine an der Abrutschsicherheit orientierte absolute Einsatzgrenze berechnet.

Die Überprüfung der bodenökologischen Einsatzgrenze erfolgte im Rahmen von Validierungsfahrten in Hanglagen bei Steigungen bis zu 40 %. Dabei ergab sich eine Übereinstimmung zwischen der vorherigen Einschätzung (mit max. 25 % Schlupf befahrbar) und der realen Befahrung von über 80 %. Lediglich ein Versuch zeigte dabei eine Unterschätzung des Schlupfniveaus,

während in vier Fällen eine Befahrung unterblieben wäre, obwohl diese ohne größere Schäden durch Schlupf möglich gewesen wäre. Eine Überprüfung der absoluten Einsatzgrenzen war im Rahmen der Versuche nicht vorgesehen. Einzelne Befahrungen bei größeren Steigungen zeigten jedoch, dass die Mobilität des Rückezugs deutlich vor Erreichen dieser absoluten Grenze endet.

Sowohl die angegebenen bodenökologischen Grenzneigungen als auch die Fahrversuche bei Steigungen bis 40 % verdeutlichen, dass die rein radbasierte hochmechanisierte Holzernte in Hanglagen an ihre Grenzen stößt. Zum Schutz des Bodens vor Erosionsschäden und für die Sicherheit der Maschinenbediener ist daher ein frühzeitiger Einsatz von Traktionshilfsmitteln oder (Traktions-) Hilfswinden zu empfehlen. Eine entsprechende Tragfähigkeit des Bodens vorausgesetzt, lassen sich mit Ketten und Bändern Steigungen bis 35 % auch unter feuchten Bedingungen relativ schadlos befahren. Neigungen darüber können nur bei sehr guten Bedingungen bodenökologisch vertretbar befahren werden bzw. erfordern den zusätzlichen Einsatz der Traktionswindentechnik. Über die Winde wird der Schlupf während der Befahrung reduziert, und die Traktionshilfsmittel gewährleisten für den Fall technischer Probleme mit Winde oder Seil die Abrutschsicherheit der Maschine. Die Grenzen dieser Technik ergeben sich zum einen aus der bodenabhängigen absoluten Grenzneigung des Prognosemodells und zum anderen aus den technischen Möglichkeiten der Einzelmaschine, Hangneigungen für den Bediener und die Ladeeinrichtung auszugleichen.

8 Summary

Timber as a regrowing resource is getting more and more popular for material use as well as for energetic usage. In order to meet the demands it is important to make previously unused wood potentials accessible for the timber market. One interesting block are the incompletely utilized resources in inclined regions. Problems arise in these areas by the topographic limitations of high mechanized timber harvesting. Apart from economical problems there are great uncertainties about the terramechanic limits in inclination for the adoption of high mechanized harvesting machines.

Limitations occur from the stability of the machines as well as from the damages done to the soils. In inclined areas the later often result from driving with high slip. Results from agricultural research (SÖHNE, 1952a) indicate that with increasing slip the risk of serious harm that is done to the soil gets bigger. For the present question of how far high mechanized harvesting machines can be used in inclined areas the acceptable limit for wheel slip was set to 25 %. Higher wheelspin leads to a complete shearing-off of the topmost soil structures. Loose soil material gets washed away with the next intense rain. In order to reduce this additional strain objective limits for harvesting operations with land-based machinery are important.

On the basis of traction measurements under level conditions an inclination limitation model for a forwarder was developed. Considerations about the downhill slope forces acting on the machines show a direct correlation between the inclination and the traction coefficient, which describes the relation between drawbar pull and machine weight. The traction coefficient depending on wheel slip can be determined by traction and slip measurements under level conditions. Linear regressions lead to a good description of traction abilities and can be faced with the downhill slope force. Apart from the maximum tractive forces the traction coefficient which results from 25 % slip is of special interest because it can be converted to an acceptable inclination for machine traffic on soft soils.

The trials were conducted on typical loess soils of the uplands in southern Lower Saxony. Traction measurements identified the soil water content and the skeletal admixtures as the main soil parameters that effect the climbing ability of the forwarder. While the variation of tires and tire inflation pressure showed little influence an obvious advancement in traction performance was achieved by mounting wheel tracks and chains. All these factors were used to calculate a prognosis about the trafficable inclinations with regard to soil protection and a second (maximum) limitation with regard to stability against an uncontrolled gliding.

The resulting ecological limitations in inclination were verified by driving tests in uplands at inclinations up to 40 %. Thereby an agreement between the prognosis (trafficable with max. 25 % slip) and the driving test of more than 80 % occurred. Slip was just once underestimated while four tests showed an ecologically acceptable pass although the inclination exceeds the prognosis. Tests of the absolute limits for stand stability were not conducted. Single tests at higher inclinations showed however that the mobility of the forwarder definitely ends before reaching these absolute limits.

The calculated ecological limits as well as the test drives under inclined conditions point out that land-based high mechanized timber harvesting is limited in uplands. In order to protect the soil from erosion and for the safety of the machine operators it is recommended to use traction aids (tracks and chains) early enough. If the soils bearing capacity is assured tracks and chains allow an ecological passing of forest soils even at higher water contents up to inclinations of 35 %. Inclinations higher than that can be traveled only at good conditions (dry soil) or with the additional aid of a traction support winch. The later reduces the wheel slip while the traction aids ensure the stability of the machine against gliding in chase that the winch or the mounted rope gets broken. The limitations for these systems result on one hand from the soil depending absolute limits of the inclination prognosis model and on the other hand from the machine facilities which level out the inclination for the operator and the load devices.

9 Literaturverzeichnis

- ADAC (2009): Test Sommerreifen 205/55 R 16 W. Online verfügbar unter http://www.adac.de/Tests/Reifentests/Sommerreifen/205_55_R16/default.asp?ComponentID=242487&SourcePageID=8772, zuletzt geprüft am 15.05.2009.
- AHLVIN, R. B.; HALEY, P. W. (1992): NATO Reference Mobility Modell Edition II. NRMM II User's Guide. (Wes Tech Report, GL-92-19).
- AHO, K.; RANTPUU, K. (1971): Metsätraktorien veto janousukyvystä rinteessä. Summary: About slope-evaluation performance for forest tractors. In: Folia For., H. 111, S. 13 ff, zuerst veröffentlicht: vgl. Saariathi und Ala Ilomäki (1997).
- ALA-ILOMÄKI, J.; HÖGNÄS, T. (1987): Painonjakauman vaikutus kuusipyöräisen kuormatraktorin raiteenmuodostukseen turvemaalla. Metsähallituksen kehittämisaosto, Hirvas. (Koeselostus 246, 10 S.), (vgl. Saariathi und Ala Ilomäki, 1997).
- AL-HAMED, S. A.; GRISPO, R. D.; ZOZ, F. M.; BARGEN, K. V. (1994): Tractor performance spreadsheet for radial tires. In: Computers and Electronics in Agriculture, Jg. 10, H. 1, S. 45–62.
- AL-HAMED, S.A.; AL-JANOBI, A.A. (2001): A program for predicting tractor performance in Visual C++. In: Computers and Electronics in Agriculture, Jg. 31, H. 2, S. 137–149.
- AMELANG, D. (2009): "Nur bei Hangneigungen bis 45 Prozent einsetzbar". Einsatz von Hangerntesystemen in der Praxis - Interview mit Henning Geske, Leiter des forsttechnischen Stützpunktes im Forstamt Seesen. In: Forst und Holz, Jg. 64, H. 3, S. 52.
- ANONYMUS (2003): 90 Jahre Taktorentests. 75 Jahre Zugleistungsmessungen. In: dlG-test.de, H. 2, S. 14–15.
- ANONYMUS (2008): Der Berg ruft - Rückzug für den Steilhang. Von Herzog umgebaut - Der Ponsse Buffalo lernt in der Schweiz das Klettern. In: Forstmaschinenprofi, H. 6, S. 30.
- ANONYMUS (2009): Rückender Kletter-Bison. Steilhang-Forwarder Ponsse Buffalo Alpine. In: Forst und Holz, Jg. 64, H. 3, S. 55.
- 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. In: Biosystems Engineering, Jg. 99, H. 3, S. 338–347.
- ANSORGE, D.; GODWIN, R. J. (2007): Raupen und Reifen. Eine maßstäbliche Laboruntersuchung. In: Landtechnik, H. 1.
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (1996): Forstliche Standortsaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. 5. Aufl. Eching bei München: IHW-Verl.
- ARNOLD, K.-D. (2002): Wohin wird sich die forstliche Technik in den nächsten Jahren entwickeln. In: Forst und Holz, Jg. 57, H. 12, S. 363–368.
- BACHER-WINTERHALTER, M.; BECKER, G.; UHLICH, U. (2007): Empfehlungen für die Holzernte in Mittelgebirgs-Steilhängen - Praxiserfahrungen. In: Forsttechnische Informationen, H. 9, S. 121–124.
- BACKHAUS, G. (1992): Reifendruckregelsystem als Forstausrüstung. In: Allgemeine Forst Zeitschrift, Jg. 49, H. 6, S. 296.
- BACKHAUS, G. (1994): Reifendruck - Verstellanlagen. Konsequenzen für die Bereifung von Forstmaschinen bei verstellbarem Reifenluftdruck. In: Forst und Technik, H. 12, S. 12–17.
- BACKHAUS, G. (2002): Forsttechnische Ökobilanz - ein Diagnose-Instrument. In: Forst und Technik, H. 11, S. 19–21.
- BECHER, H. H. (1970): Eine Methode zur Messung der Wasserleitfähigkeit von Böden im ungesättigten Zustand. Dissertation. Technische Universität Hannover.
- BECKER, G.; HOFMANN, R.; ROEDER, A.; EISENBARTH, E.; HANEWINKEL, M. (1989): Bodenschäden durch Forstmaschinen auf Tonstandorten. Entstehung, Messung, Begrenzung. In: Forst und Holz, Jg. 44, H. 19, S. 507–512.
- BEHRNDT, W. (1988): Der Einsatz von Forstunternehmen in der Niedersächsischen Landesforstverwaltung. Stand und Perspektiven. In: Forst und Holz, Jg. 43, H. 8, S. 186–188.

- BENTHAUS, M.; MATTHIES, D. (1993): Regeneration befahrener Waldböden. In: Allgemeine Forstzeitschrift, Jg. 48, H. 9, S. 448–451.
- BIERNATH, D. (2004): Forcar FC 200 Der Forwarder am Seil. In: Forstmaschinenprofi, H. 7.
- BLEY, D. (2002): Sind Traktionshilfsmittel immer nötig. Zugkrafteerhöhung nur mit Absenkung des Reifeninnendruckes. In: Forsttechnische Informationen, H. 1+2, S. 14–16.
- BLOCK, H. (2008): Zur Traktionsmessung an Industriereifen mit einem forsttechnischen Messsystem. Masterarbeit. Georg-August-Universität Göttingen (54 S.).
- BOCK, G. (1952): Feldversuche über die Zugfähigkeit von Ackerschlepperreifen. In: Grundlagen der Landtechnik, H. 3. S. 88-100.
- BOHLANDER, F. (2001): Vollmechanisierte Holzernte im Steilhang. In: Forsttechnische Informationen, H. 8, S. 81-82.
- BOLLING, I. (1987): Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen: neue Mess- und Rechenmethoden. Dissertation. Technische Universität München (247 S.).
- BOMBOSCH, F.; SOHNS, D.; KANZLER, H.; NOLLAU, R. (2003a): Der Forwarder im Steilhang. In: Forst und Technik, H. 9, S. 22–23.
- BOMBOSCH, F.; SOHNS, D.; KANZLER, H.; NOLLAU, R. (2003b): Grundlagen für eine Vision. Stellungnahme zur Entgegnung der Herren Wilfried Pröll, Herbert Körner, Klaus Pöhler auf den Artikel "Forwardereinsatz bei über 70 %". In: Forst und Technik, H. 12, S. 22–23.
- BROKMEIER, H.; JACKE, H.; HAAG, C.; WITTE, R.; WITTE, M. (2009): CTI-Systeme beim Rohholztransport in Deutschland. In: Forst und Technik, Jg. 21, H. 2, S. 20–22.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2004): Zur Zukunft des Waldes. (BMVEL) Berlin.
- CANILLAS, E. C.; SALOKHE, V. M. (2002): Modeling compaction in agricultural soils. In: Journal of Terramechanics, Jg. 39, H. 2, S. 71–84.
- CLEMENS, D. (2008): Bodenkundliche Feldmethoden zur Identifikation alter Fahrlinien. In: AFZ - Der Wald, Jg. 63, H. 6, S. 294–295.
- CONRAD, B.; KREBS, R. (2005): Bodenschonende Holzernte im Allgäu auf Problemstandorten. In: Allgemeine Forst Zeitschrift, Jg. 60, H. 2, S. 56–58.
- DABROWSKI, J.; PYTKA, J.; TARKOWSKI, P.; ZAJAC, M. (2006): Advantages of all-season versus snow tyres for off-road traction and soil stresses. In: Journal of Terramechanics, Jg. 43, H. 2, S. 163–175.
- DIETZ, H.-U.; NARJES, H.-J.; HITTENBECK, J. (2004): Laubholzdurchforstung mit Kranvollernter; Rücken, Direktbe- ladung und Vortransport des Sattelauflegers mit Tragschlepper; Auf dem Weg zum strukturierten Mischwald. In: Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V.; Allgemeine Forst Zeitschrift (AFZ-Der Wald) (Hg.): 14 KWF-Tagung. Prozessorientierung in der Forstwirtschaft - neue Technik, neue Partner, neues Denken. Tagungsführer. Groß-Umstadt, S. 63–67.
- DU PLESSIS, H. L. M.; YU, T. (2006): Modelling the traction of a prototype track based on soil-rubber friction and adhesion. In: Journal of Terramechanics, Jg. 43, H. 4, S. 487–504.
- DUFFNER, W. (2003): Forstbetrieb der Zukunft. In: Forst und Holz, Jg. 58, H. 12, S. 347–351.
- DÜRRSTEIN, H.; STAMPFER, K. (2000): Aktuelle Trends in der Forsttechnik. In: Arbeit im Wald, H. 4, S. 1–3.
- EBEL, A. (2006): Druckverteilung auf Kontaktflächen unter Forstreifen. Dissertation. Georg-August Universität Göttingen (101 S.).
- EISENBARTH, E. (1989): Auswirkungen mechanischer Methoden der Forstwirtschaft auf den Boden. FAO - ECE - ILO - Seminar. Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz - Abt. D, Arbeitswirtschaft und Forstnutzung. Trippstadt.
- ENCKE, B.-G. (2007a): Energieholz - Risiken und Chancen. Fachtagung Energieholz. In: AFZ - Der Wald, Jg. 62, H. 21, S. 1148-1149.
- ENCKE, B.-G. (2007b): Energieholz-Potential der Forstwirtschaft. Fachtagung Energieholz - Teil II. Was ist nachhaltig möglich. In: AFZ - Der Wald, Jg. 62, H. 21, S. 1140 f.

- ENGEL, R. (1974): Die Zugkraft von Ackerschleppern in Abhängigkeit von Reifenabmessungen, Reifenbelastungen, Bodenzustand und Hangneigung. In: Forsttechnische Informationen, H. 6, S. 42–46.
- ERLER, J. (2007): Forsttechnik für Laub- und Starkholz. In: Arbeit im Wald, H. 2, S. 10 f.
- FEHRLE, M. (2006): Alternative zur Kette am Steilhang. In: Forst und Technik, H. 9, S. 52–53.
- FINNERN, H. (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung. Mit 91 Tabellen. 4., verb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart.
- FODA, M.A. (1991): On the prediction of drawbar pull-normal slip relationship for a pneumatic tyre moving on soft soil. In: Journal of Terramechanics, Jg. 28, H. 4, S. 383–392.
- FORBRIG, A.; LELEK, S.; NICK, L. (2004): Holzernte am Hang mit Seiltragschlepper - verfahrenstechnische Nische oder zukunftsweisender Quantensprung. In: Forsttechnische Informationen, H. 11+12, S. 153–155.
- FRØNSDAL, J. (1985): Off-road transport by different forest machines. A practical and theoretical analysis of effects of various terrain factors on the machine's travel speed and stability. Report on on Forest Operations Research Nr 28. Norwegian Forest Research Institute. (63 S.).
- GABRIEL, O. (2005): Für Hänge optimiert. Der dänische Hersteller Silvatec bietet seinen Harvester Sleiþner seit der Elmia Wood mit stärkeren Bogies, mit Tiltkran und neuer Kabine an. In: Forst und Technik, H. 8, S. 44 f.
- GABRIEL, O. (2008a): Das Beste vom Besten. In: Forst und Technik, H. 5, S. 102–104.
- GABRIEL, O. (2008b): John Deere Forestry stellt E-Series vor. In: Forst und Technik, H. 6, S. 58f.
- GABRIEL, O. (2008c): Getrübte Stimmung trotz Rekordzahlen. KWF-Tagung 2008. In: Forst und Technik, H. 7, S. 8–15.
- GAERTIG, T.; GREEN, K. (2008): Die Waldbodenvegetation als Weiser für Bodenstrukturstörungen. In: AFZ - Der Wald, Jg. 63, H. 6, S. 300–301.
- GEHLERT, D.; SCHACK-KIRCHNER, H.; HILDEBRAND, E. E. (2006): Field tests for soil deformation in forest soils: A means to protect not yet disturbed soil areas. In: ISTRO (Hg.): Proceedings of Istro 17 "Sustainability - its Impact on Soil Management and Environment. Kiel, S. 1445–1449.
- HARTGE, K. H.; HORN, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik. 19 Tabellen. 3., überarb. Aufl. Stuttgart: Enke.
- HARTKOPF, A. (2009): Flexibel und schnell im Laubholz. In: Forst und Technik, H. 4, S. 60.
- HEIL, K. (1999): Holzernte am Steilhang. In: Forst und Holz, Jg. 54, S. 279–283.
- HEINIMANN, H. (1999): Ground-based Harvesting Technologies for Steep Slopes. In: Proceedings of the International Mountain Logging and 10th Pacific Northwest Skyline Symposium, Jg. 1999.
- HERZOG, K. (2006): Entwicklung des Hangforwarders FC 200. Zumholz, Schweiz. Persönliches Gespräch im Rahmen einer Betriebsbesichtigung.
- HILDEBRAND, E. E. (1986): Der Einfluss der Strukturschädigungen von Feinlehmen auf die Wurzelentwicklung zweier Fichtenklone. In: Mitteilungen des Vereins für forstliche Standortkunde und Forstpflanzenzüchtung, H. 32, S. 50–56.
- HILDEBRAND, E. E. (2008): Lässt sich das "Großraumexperiment Waldbodenverformung" stoppen. In: AFZ - Der Wald, Jg. 63, H. 6, S. 291–293.
- HILDEBRAND, E. E.; WIEBEL, M. (1982): Der Einfluß der Befahrung auf die Qualität von Forststandorten, dargestellt an bodenphysikalischen Kenngrößen. In: Allgemeine Forst und Jagdzeitung, Jg. 153, H. 1+2, S. 24–34.
- HITTENBECK, J. (2004): Zugkraft- und Schlupfmessung an einem Forwarder. unter besonderer Berücksichtigung von Aspekten der Bodenverträglichkeit in Fichtendurchforstungen. Masterarbeit. Georg-August Universität Göttingen (68 S.).
- HITTENBECK, J. (2007a): Limits of Wheelbased Timber Harvesting in Inclined Areas. In: Institute of Forest Engineering, University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna (Hg.): Austro 2007/FORMEC 2007. Meeting the Needs of Tomorrow's Forests: New Developments in Forest Engineering. Proceedings CD-Rom. Wien.

- HITTENBECK, J. (2007b): Messung des Traktionsbeiwertes an Raupenfahrwerken. KWF-Posterschau; Austro-Foma 2007. Stift Heiligenkreuz, 09.-11.10.2007.
- HITTENBECK, J. (2008): Grenzen beim Forstmaschineneinsatz in Hanglagen. In: Spiecker, Heinrich; von Teufel, Konstantin (Hg.): Forstwissenschaftliche Tagung 2008. Ressourcenknappheit und Klimaänderung: Herausforderungen für die Forstwissenschaft. Freiburg im Breisgau, S. 57.
- HOEPKE, E.; APPEL, W. (2002): Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen, Systeme, Komponenten. 2., überarb. Aufl. Braunschweig: Vieweg (ATZ/MTZ-Fachbuch).
- HOFFMANN, K. (1987): Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen. HBM, Darmstadt. Darmstadt. (293 S.).
- HOLM, C (1972): Das Verhalten von Reifen beim mehrmaligen Überfahren einer Spur auf nachgiebigem Boden und der Einfluß auf die Konzeption mehrachsiger Fahrzeuge. Dissertation TU München. Düsseldorf: VDI-Verlag (Verein Deutscher Ingenieure: Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften).
- HOLM, C. (1969): Das Verhalten von Reifen beim mehrmaligen Überfahren einer Spur. In: The International Society for Terrain-Vehicle-Systems (Hg.): Proceedings of the 3rd International Conference, S. 96–123.
- HORN, R.; VOSSBRINK, J.; BECKER, S. (2004): Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. Soil Physical Quality. In: Soil and Tillage Research, Jg. 79, H. 2, S. 207–219.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2006): Machinery for forestry - Winches - Dimensions, performance and safety; ISO 19472:2006/Cor 1:2006, Genf.
- JACKE, H. (1989): Hohe Zugkräfte von Maschinen und Bodenschonung im Forsteinsatz durch richtige Wahl der Bereifung. In: Forst und Technik, H. 10+11, S. 2–9.
- JACKE, H. (1999): Ökocontrolling im Maschineneinsatz - oder: Wie man Leistung steigert, ohne der Umwelt zu schaden. In: Forsttechnische Informationen, H. 5+6, S. 31–34.
- JACKE, H. (2007): Halbherzige "Bändermänner". In: Forst und Technik, H. 8, S. 22-23.
- JACKE, H.; DREWES, D. (2004): Kräfte, Schlupf und Neigungen. Ein Beitrag zur Terramechanik forstlicher Arbeitsmaschinen. In: Forst und Holz, Jg. 59, H. 6, S. 259–262.
- JACKE, H.; DREWES, D.; HITTENBECK, J. (2004): Ökologische und ökonomische Optimierungsansätze des Tragschleppereinsatzes in Fichtenbeständen. Zugkraftentwicklung auf reisigbewehrten Rückegassen und gewachsenem Boden bei variierenden Reifeninnendrucken. In: IFA-Mitteilungen (37 S.).
- JACKE, H.; DREWES, D.; HITTENBECK, J. (2005): Erfassung des Treibstoffverbrauchs bei der hochmechanisierten Nadelholzdurchforstung. Eine Feldstudie mit ausgewählten selbstfahrenden Arbeitsmaschinen der Niedersächsischen Landesforstverwaltung. In: IFA-Mitteilungen (47 S.).
- JACKE, H.; EBEL, A. (2006a): PrAllCon: Neues über Reifen im Forst. Ziele und Methodik eines außergewöhnlichen Projektes: Druckverteilung unter Forstreifen. In: Forst und Technik, H. 1, S. 14–20.
- JACKE, H.; EBEL, A. (2006b): PrAllCon: Neues über Reifen im Forst. Reifen als elastische Feder-Masse-Systeme. In: Forst und Technik, H. 2, S. 10–15.
- JACKE, H.; EBEL, A. (2006c): PrAllCon: Neues über Forstreifen. Zur Druckverteilung auf hartem Untergrund. In: Forst und Technik, H. 3, S. 10–15.
- JACKE, H.; EBEL, A. (2006d): PrAllCon: Neues über Reifen im Forst. Zur Druckverteilung auf weichem Untergrund. In: Forst und Technik, H. 4, S. 10–15.
- JACKE, H.; EBEL, A. (2006e): PrAllCon: Neues über Reifen im Forst. Wasser statt Luft: Zur Flüssigkeitsbefüllung von Reifen. In: Forst und Technik, H. 5, S. 20–27.
- JACKE, H.; EBEL, A. (2006f): PrAllCon: Neues über Reifen im Forst. (Vorläufige) Konsequenzen für die Praxis. In: Forst und Technik, H. 6, S. 14–21.
- JACKE, H.; HITTENBECK, J. (2009): Kletterkünstler. Zwischen Maximum und Optimum: Zum Zugkraftspektrum von Kettenfahrwerken. In: Forst und Technik, H. 5, S. 22–26.
- JENANE, C.; BASHFORD, L. L. (2000): SW Soil and Water: Tractive Performance of a Mechanical Front-Wheel Assist Tractor as related to Forward Speeds. In: Journal of Agricultural Engineering Research, Jg. 77, H. 2, S. 221–226.

- JENANE, C.; BASHFORTH, L. L.; MONROE, G. (1996): Reduction of Fuel Consumption Through Improved Tractive Performance. In: Journal of Agricultural Engineering Research, Jg. 64, S. 131–138.
- JOINT COMMITTEE (1971): Symposium on forest operations in mountainous regions. Technical Report. Herausgegeben von Joint FAO/ECE/ILO Committee on Forest Working Technics and Training of Forest Workers. 31.August bis 11.September in Krasnodar (USSR).
- JÖNSSON, A. (2007): Holzindustrie will Vorrang vor energetischer Nutzung. Rohholzmanagement. In: Forst und Technik, H. 5, S. 20–24.
- JÖNSSON, A. (2008): Innovation als Antrieb: Neuenkirchner Achsenfabrik AG. In: Forst und Technik, H. 6, S. 22–24.
- KARAFIATH, LESLIE L. (1986): Tire-soil interaction model for turning (steered) tires. In: Journal of Terramechanics, Jg. 23, H. 3-4, S. 153–169.
- 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. In: Soil and Tillage Research, Jg. 68, H. 1, S. 39–47.
- KLECKERS, T.; GÜNTHER, B. (2007): Optische und elektrische Dehnungsmessstreifen: Ein Vergleich. HBM, Darmstadt.
- KOMANDI, G. (1975): Determination of adhesive parameters characterizing the interaction of pneumatic tires and concrete pavement from pull-slip curves. In: Journal of Terramechanics, Jg. 12, H. 3-4, S. 109–117.
- KORLATH, G. (2007): Mobility analysis of off-road vehicles: Benefits for development, procurement and operation. In: Journal of Terramechanics, Jg. 44, S. 383–393.
- KORTEN, S.; MATTHIES, D. (2003): Raupenlaufwerke am Steilhang. Bodenschonend, aber wurzelschädigend. In: AFZ - Der Wald, Jg. 58, H. 17, S. 846.
- KOŠIR, B.; MARENČE, J.; JEJČIČ, V.; TOMAZ, P. (2005): Determining Technical Parameters in Tractor Skidding - Basis for the Choice of Tractor. In: FORMEC 2005, S. 43–55.
- KREMER, J.; UHL, E.; OHRNER, G.; MATTHIES, D.; GANTER, C. (2005): Besserer Boden- und Bestandesschutz beim Einsatz von Raupenharvestern. Kunststoffketten aus "Felsatec" im Direktvergleich mit Stahlsteg-Ketten. In: Allgemeine Forst Zeitschrift, Jg. 60, S. 729–731.
- KREMER, J.; SCHARDT, M.; BORCHERT, H.; MATTHIES, D.; GANTER, C. (2007): Bogiebänder im Direktvergleich mit Reifen. In: Forst und Technik, H. 1, S. 6–11.
- KREMER, J.; MATTHIES, D.; WOLF, B.; OHRNER, G.; UHL, E. (2003): Bodenstrukturveränderungen und Wurzelverletzungen. Rad- gegen Raupenfahrwerk bei der Holzernte. In: AFZ - Der Wald, H. 17, S. 847–850.
- KUNZE, G.; GÖHRING, H.; JACOB, K.; SCHEFFLER, M. (2002): Baumaschinen. Erdbau- und Tagebaumaschinen ; mit 664 Abbildungen und 147 Tabellen. 1. Aufl. Braunschweig: Vieweg (Fördertechnik und Baumaschinen).
- KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTTECHNIK E.V. (2009): Drastischer Einbruch. Forstmaschinen-Verkaufsstatistik 2008 des KWF. In: Forst und Technik, H. 5, S. 5.
- KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTTECHNIK E.V. (1999): Prüfgrundlage zur FPA-Prüfung - Tragschlepper. Groß-Umstadt. (55 S.).
- KUTZBACH, H. D. (1982): Ein Beitrag zur Fahrmechanik des Ackerschleppers. Reifenschlupf, Schleppermasse, und Flächenleistung. In: Grundlagen der Landtechnik, Jg. 32, H. 2, S. 41–48.
- LACKNER, C. (1999): Bergbiber. Bindeglied zwischen Forst und Verarbeitung. In: Arbeit im Wald, H. 5, S. 12 f.
- LAUER, M. (2008): Die Power auf der Rolle. Mit einem Leistungsprüfstand kann man Tuningmaßnahmen belegen und "Testfahrten" durchführen. Online verfügbar unter <http://www.kfz-betrieb.vogel.de/service/austruestung/articles/148442/>, zuletzt aktualisiert am 29.05.2008, zuletzt geprüft am 17.03.2009.
- LEE, D. R.; KIM, K. U. (1997): Effect of inflation pressure on tractive performance of bias-ply tires. In: Journal of Terramechanics, Jg. 34, H. 3, S. 187–208.

- LEUTZ, R.; SCHAAK, H.; WIEBEL, M. (1980): Oberflächenverdichtung bei Parabraunerden aus Lösslehm nach Einsatz schwerer Holzbringungsmaschinen. In: Mitteilungen des Vereins für forstliche Standortkunde und Forstpflanzenzüchtung, H. 28, S. 11–20.
- LI, LIN; SANDU, C. (2007): On the impact of cargo weight, vehicle parameters, and terrain characteristics on the prediction of traction for off-road vehicles. In: Journal of Terramechanics, Jg. 44, S. 221–238.
- LOBODA, S. (2005): Forum "Resource Holz". In: Forst und Technik, H. 3, S. 20–22.
- LÖFGREN, B.; LANDSTRÖM, M.; NORDÉN, B. (1997): CTI for off-road machines in forestry. In: Skog Forsk Results, H. 1, (4 S.).
- LWF (2004): Holzernte in steilen Hanglagen. Merkblatt 13. In: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, H. 4 (4 S.).
- MACLAURIN, B. (2007): Comparing the NRMM (VCI), MMP and VLCl traction models. In: Journal of Terramechanics, Jg. 44, H. 1, S. 43–51.
- MACMILLAN, R. H. (2003a): Locally Made Equipment for Teaching and Research in Agricultural Engineering. Animal / Tractor Dynamometer. Manual No. 2.1.
- MACMILLAN, R. H. (2003b): Locally Made Equipment for Teaching and Research in Agricultural Engineering. Animal / Tractor Dynamometer. Manual No. 2.2.
- MACMILLAN, R. H. (2003c): The Mechanics of Tractor - Implement Performance. Theorie and Worked Examples. Chapter 4: Tractor Performance on Soft Soil - Theoretical. Unveröffentlichtes Manuskript, 2003, Melbourne.
- MAHLER, G.; PFEIL, C. (1998): 10 Jahre Vollerntetechnik - Die beispiellose Erfolgsgeschichte einer Forstmaschine. In: AFZ - Der Wald, Jg. 53, H. 26, S. 1570–1571.
- MATTHIES, D.; KREMER, J. (1999): Bodenmechanische und bodenphysikalische Ergebnisse im Rahmen des "Informationssystems zum bodenverträglichen Forstmaschineneinsatz. In: Forsttechnische Informationen, H. 5+6, S. 34-35.
- MATTHIES, D.; WEIXLER, H.; HESS, U. (1995): Befahrungsbedingte Strukturveränderungen von Waldböden. In: AFZ - Der Wald, Jg. 50, H. 22, S. 1218–1221.
- MATTHIES, D.; ZIESAK, M. (2001): Untersuchungen zur last- und innendruckabhängigen Aufstandsfläche von Forstspezialreifen. In: Forsttechnische Informationen, H. 9+10, S. 104–110.
- MENG, W. (1978): Baumverletzungen durch Transportvorgänge bei der Holzernte. Ausmaß und Verteilung, Folgeschäden am Holz und Versuch ihrer Bewertung. Dissertation Uni Freiburg. Freiburg im Breisgau (Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, 53).
- MEYER, H.; KLIEFOTH, F. (1935): Versuche über die Haftfähigkeit der Schlepperluftreifen auf schwerem Boden. In: Technik in der Landwirtschaft, Jg. 16, S. 317–321 (vgl. Bock, 1952).
- MEYER, H.; KLIEFOTH, F. (1936): Versuche über die Haftfähigkeit der Schlepperluftreifen auf schwerem Boden. In: Technik in der Landwirtschaft, Jg. 17, S. 8–10 (vgl. Bock, 1952).
- MICHAILOFF, I. (1943): Zahlenmäßiges Verfahren für die Ausführung der Bestandeshöhenkurve. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt und Tharandter Jahrbuch, H. 6, S. 273–279.
- MOORE, D. F. (1975): The friction of pneumatic tyres. In: Buchbeitrag.
- MÜHLHAUSEN, C. (2008): Die Antwort auf den Steilhang. Niedersächsische Landesforsten setzen im Harz auf Seilwindenharvester. In: Forst und Holz, Jg. 63, H. 9, S. 45-46.
- MÜLLER, J. (2006): Hydraulikdrücke beim Fährantrieb des Ponsse S10 - im Rahmen einer Fehlerdiagnose. Telefonisch an Jörg Hittenbeck.
- NARJES, H.-J. (1990): Aus der Sicht niedersächsischer Lohnunternehmer. Erfahrungen mit Vollerntern. In: Forst und Technik, S. 25–26.
- NICK, L. (2005): Erster KWF-geprüfter Hangforwarder Forcar FC 200. In: Forsttechnische Informationen, H. 8+9, S. 99-100.
- NICK, L. (2007): Maschinenstatistik 2006. In: Forsttechnische Informationen, H. 11+12, S. 153–155.

- NICK, L. (2008): Forstmaschinenstatistik 2007 - noch einmal ein Erfolgjahr. In: Forsttechnische Informationen, H. 11+12, S. 117–119.
- NICK, L.; HOFMANN, R. (2005a): Deutliche Zuwächse im Neumaschinengeschäft bei Vollerthern und Tragschleppern. In: Forsttechnische Informationen, H. 8+9, S. 97 f.
- NICK, L.; HOFMANN, R. (2005b): Deutlich mehr neue Vollerther und Tragschlepper verkauft. In: Allgemeine Forstzeitschrift, H. 18, S. 960-961.
- O'BRIEN, J. P. (1991): Worn drive tire traction performance. Herausgegeben von ASAE. ASAE. St Joseph. (ASAE Paper, 91-1586).
- OHRNER, G.; MATTHIES, D.; KREMER, J.; KAISERAUER, J.; WOLF, B.; UHL, E.; BLASCHKE, M. (2003): Vergleichende Studie zur Auswirkung von Rad- und Raupenfahrwerken auf das Wurzelsystem (Kuratoriumsprojekt A 34). Bayrische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft (138 S.).
- OKELLO, J. A. (1994): Prediction and Experimental Validation of the Field Tractive Performance of a Rubber Track Unit. In: Journal of Agricultural Engineering Research, Jg. 59, H. 3, S. 163–171.
- PAMPEL, W. (1982): Holztransport. 1. Aufl. Unter Mitarbeit von P. Hascke und Gaumitz. B. Berlin: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag.
- PRÖLL, W. (2005): Forwarder mit Seilwinde. In: Arbeit im Wald, Jg. 116, H. 4+5.
- PRÖLL, W.; KÖRNER, H.; PÖHLER, K. (2003): Höchstgefährliches Verfahren. In: Forst und Technik, H. 12, S. 20–21.
- PYTKA, J.; DABROWSKI, J.; ZAJAC, M.; TARKOWSKI, P. (2006): Effects of reduced inflation pressure and vehicle loading on off-road traction and soil stress and deformation state. In: Journal of Terramechanics, S. 469–485.
- PYTKA, J.; KONSTANKIEWICZ, K. (2002): A new optical method for soil stress and strain investigation. In: Soil and Tillage Research, Jg. 65, H. 2, S. 243–251.
- RADEMACHER, J. (2000): Beurteilung von Bodenschonung und Zugkraft moderner Traktor-Bereifung. In: Grundlagen der Landtechnik, Jg. 55, H. 5, S. 376–377.
- RADEMACHER, J. (1999): Beurteilung von Bodenschonung und Zugkraft moderner Schlepper-Bereifung. Diplomarbeit, Christian-Albrechts-Universität Kiel (84 S.).
- RAPER, R. L.; BAILEY, A. C.; BURT, E. C.; WAY, T. R.; LIBERATI, P. (1995): The effects of reduced inflation pressure on soil-tire interface stresses and soil strength. In: Journal of Terramechanics, Jg. 32, H. 1, S. 43–51.
- REMPFER, M. (1998): Richtig Druck machen. Den Reifenluftdruck anzupassen, heißt Reserven zu nutzen. In: Grundlagen der Landtechnik, Jg. 53, Sonderheft, S. 210–211.
- RENIUS, K. T. (1987): Traktoren. Technik und ihre Anwendung. 2., durchges. Aufl. München: BLV-Verl.-Ges. [u.a.] (Wissen für die Praxis).
- RICHTER, P. (2008): Bogiebänder für Forstmaschinen. Marktübersicht. In: Forst und Technik, H. 7, S. 30–34.
- SAARILAHTI, M. (2002a): Modelling of the Wheel and Tyre. 2. Tyre Stiffness and Deflection. Survey on Tyre Deflection Models for Studying the Mobility of Forest Tractors. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management. Helsinki.
- SAARILAHTI, M. (2002b): Simple Forwarder Model. For Estimation the Ecoefficiency of Timber Transport. Manual 2. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management. Helsinki.
- SAARILAHTI, M. (2002c): Evaluation of the WES-Method in Assessing the Trafficability of Terrain and the Mobility of Forest Tractors. Comparison of the different WES-Models. Appendix Report No 3. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management. Helsinki.
- SAARILATHI, M.; ALA-ILOMÄKI, J. (1997): Measurement and Modelling of Wheel Slip in Forwarding on Moraine Forest Floor. In: Scandinavian Journal of Forest Research, H. 12, S. 316–319.
- SASS, F.; BOUCHÉ, C.; LEITNER, A. (1970): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. (erster Band) 13. vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (959 S.).
- SAUTER, U. H.; MEHLIN, I.; GRAMMEL, R. (1998): Vollmechanisierte Holzernte am Steilhang mit Vollerthertechnik. In: Allgemeine Forst Zeitschrift, Jg. 53, S. 722–724.

- SCHACK-KIRCHNER, H.; HILDEBRAND, E. E. (2009): Wie lässt sich das "Verformungsexperiment" in unseren Waldböden stoppen. In: Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Universität Freiburg und Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hg.): Walderschließung und Bodenschutz. Bodenverformung - Erosion - Hochwasserschutz. Freiburg im Breisgau: Eigenverlag der FVA (Freiburger Forstliche Forschung, 79), S. 1–10.
- SCHACK-KIRCHNER, H.; HILDEBRAND, E. E.; WILPERT, K. v. (1993): Bodensauerstoffhaushalt unter Fahrspuren - Einsatz eines Simulationsmodells. In: Allgemeine Forstzeitschrift, H. 3, S. 118–121.
- SCHÄFER, T.; SOHNS, D. (1993): Minderung der Bodenverdichtung durch eine Reisigauflage. In: Allgemeine Forst Zeitschrift, Jg. 48, H. 9, S. 452–455.
- SCHARDT, M.; KREMER, J.; BORCHERT, H.; MATTHIES, D. (2007): Wurzelschutz beim Einsatz von Forwardern. In: Forst und Technik, H. 2, S. 6–11.
- SCHIEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. 100 Tabellen. 14., neu bearb. und erw. Aufl. Enke-Verlag Stuttgart.
- SCHNAUFER, A.; KUTZBACH, H. D. (1998): Variierter Reifeninnendruck. Einfluß auf die Seitenführungskraft von Traktorreifen. In: Grundlagen der Landtechnik, Jg. 53, H. 2, S. 78–79.
- SCHREIBER, M.; KUTZBACH, H. D. (2007): Comparison of different zero-slip definitions and a proposal to standardize tire traction performance. In: Journal of Terramechanics, Jg. 44, S. 75–79.
- SCHULZE, A. (1988): Theorie des Militärkraftfahrzeugs. 1. Aufl. Berlin: Militärverl. d. Dt. Demokrat. Republik.
- SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W.; PAINTER, D.J. (1981): Compaction by agricultural vehicles: A review II. Compaction under tyres and other running gear. In: Soil and Tillage Research, Jg. 1, S. 373–400.
- SÖHNE, W. (1952a): Die Kraftübertragung zwischen Schlepperreifen und Ackerboden. In: Grundlagen der Landtechnik, H. 3, S. 75–87.
- SÖHNE, W. (1952b): Die Verformbarkeit des Ackerbodens. In: Kloth, W. (Hg.): 10. Konstrukteurheft. Vorträge auf der 10. Tagung der Landmaschinen-Konstrukteure. Düsseldorf: VDI-Verlag (Grundlagen der Landtechnik, 3), S. 51–59.
- SÖHNE, W. (1970): Wechselbeziehungen zwischen Schlepperleistung, Reifenabmessungen und Ackerboden. In: Grundlagen der Landtechnik, Jg. 20, H. 10, S. 306–312.
- SÖHNE, W. (1976): Terramechanics and its influence on the concepts of tractors, tractor power development, and energy consumption. In: Journal of Terramechanics, Jg. 13, H. 1, S. 27–43.
- SÖHNE, W.; BOLLING, I. (1981): Der Einfluß der Lastverteilung auf die Triebkraft-Schlupf-Kurve von Acker-schleppern. In: Grundlagen der Landtechnik, Jg. 31, H. 3, S. 81–85.
- SOMMER, C.; WALTER, K.; LEBERT, M.; JAKLINSKI, L.; JASINSKI, B. (2001): Effiziente und bodenschonende Triebkraftübertragung vom Reifen zum Boden. In: Grundlagen der Landtechnik, Jg. 56, H. 5, S. 316–317.
- SONNEN, F. -J (1970): Über den Einfluß von Form und Länge der Aufstandsfläche auf die Zugfähigkeit und den Rollwiderstand von AS-Reifen. In: Wissenschaftliche Mitteilungen der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode, (176 S.).
- SOPPA, R. (2001): Herab aus steiler Höh! In: Forst und Technik, H. 12, S. 4-5.
- SPRENGER, A. (2001): Nutzung des Bergwaldes. In: Arbeit im Wald, H. 3, S. 12-13.
- STAMPFER, K. (2002): Optimierung von Holzertesystemen im Gebirge. Habilitation, Universität für Bodenkultur Wien (81 S.).
- STAMPFER, K.; STEINMÜLLER, T. (2004): Leistungsdaten Valmet 911.1 X3 M. Endbericht. Universität für Bodenkultur Wien (12 S.).
- STAMPFER, K.; STEINMÜLLER, T.; SVATON, R. (2001): Grenzen der Steigfähigkeit. In: Arbeit im Wald, H. 3, S. 1–3.
- STEINER, M. (1979): Analyse, Synthese und Berechnungsmethoden der Triebkraft-Schlupf-Kurve von Luftreifen auf nachgiebigem Boden. Dissertation. TU München.
- STEINKAMPF, H. (1971): Zur Methodik der Rollradien- und Radschlupfmessung. In: Grundlagen der Landtechnik, Jg. 21, H. 2, S. 40–44.

- STEINKAMPF, H. (1975): Ermittlung von Reifenkennlinien und Gerätezugleistungen für Ackerschlepper. (Landbauforschung Braunschweig-Völkenrode).
- STOILOV, S. (2007): Improvement of wheel sidder tractive performance by tire inflation pressure and tire chains. In: Croatian Journal of Forest Engineering, Jg. 28, H. 2, S. 137–144.
- STUHLMANN, C.; FINDEISEN, E. (2009): Flexibel und pfleglich ernten im Hangübergangsgelände mittelsteiler Lagen. In: Forst und Holz, Jg. 64, H. 3, S. 40–51.
- TAYLOR, J. H.; BURT, E. C. (1987): Total axle load effects on soil compaction. In: Journal of Terramechanics, Jg. 24, H. 3, S. 179–186.
- TEPPE, R.; DILLING, H.; BEESE, F. (2003): Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. In: Journal of Plant Nutrifcation and Soil Schience, S. 111–119.
- UMEG, 2002: Umweltinformationen Boden-Wasser-Pflanze, Sickerwasserprobennahme: Messstellenausbau. UMEG Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit, Karlsruhe.
- UPADHYAYA, S. K.; WULFSOHN, D.; JUBBAL, G. (1989): Traction prediction equations for radial ply tyres. In: Journal of Terramechanics, Jg. 26, H. 2, S. 149–175.
- US-ARMY (1994): Planning and Design of Roads, Airfields, and Heliports in the Theater of Operations. Road Design. FM 5-430-00-1; AFJPAM 32-8013, Vol I. Unter Mitarbeit von Department of the Army und Department of the Air Force. Herausgegeben von Headquarters. US-Army. Washington DC. (Field Manual, 5-430-00-1).
- VAN DEN AKKER, J. J. H. (2004): SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. Advances in Soil Structure Research. In: Soil and Tillage Research, Jg. 79, H. 1, S. 113–127.
- VAN DEN AKKER, J. J. H.; ARVIDSSON, J.; HORN, R. (2003): Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. Experiences with the Impact and Prevention of Subsoil Compaction in the European Union. In: Soil and Tillage Research, Jg. 73, H. 1-2, S. 1–8.
- VECHINSKI, C. R.; JOHNSON, C. E.; RAPER, R. L.; McDONALD, T. P. (1999): Forestry Tire Tractive Performance: New, Worn, and with Chains. In: Applied Engineering in Agriculture, Jg. 35, S. 263–266.
- VILKKO, J. (1986): Metsätraktorin suokelpoisuuden parantaminen. Metsähallituksen kehittämisjaosto, Hirvas. Koeselostus 237. (27 S.), (vgl. Saariathi und Ala Ilomäki, 1997).
- WALCZYKOVA, M.; WALCZYK, J.; KORMANEK, M. (2002): Determination of Forest Soil Traction Parameters. In: Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, H. Forestry Volume 5, S. 11 S.
- WANJII, S.; HIROMA, T.; OTA, Y.; KATAOKA, T. (1997): Prediction of wheel performance by analysis of normal and tangential stress distributions under the wheel-soil interface. In: Journal of Terramechanics, Jg. 34, H. 3, S. 165–186.
- WEINHOLD, H. (2001): Reifen und Fahrwerk. Die Problematik der elektronischen Aufladung sowie Traktionsmessungen an Reifen für Flurförderfahrzeuge. In: 11. Heidelberger Tagung der Flurförderzeugbetreiber. Tagung Heidelberg, 13. und 14. März 2001. Düsseldorf: VDI-Verl.
- WEISE, G. (2002): Einfluss des Reifeninnendrucks auf die Zugkraftübertragung. Der richtige Reifeninnendruck bringt ökologische und ökonomische Vorteile. In: Forsttechnische Informationen, H. 9, S. 110–111.
- WEISE, G. (2003): Reifendruckregelanlage für Forstmaschinen. Das KWF hat die Reifendruckregelanlage STIS der Firma Pösges und Tigges in einem KWF-Test auf technische Einsatzfähigkeit in einer Forstmaschine geprüft. In: Forsttechnische Informationen, H. 12, S. 143–146.
- WEISE, G. (2004): Seilgestützter Forstmaschineneinsatz am Hang. Einige Betrachtungen zum Abfangen des Hangabtriebs durch ein Stützseil. In: Forsttechnische Informationen, H. 9+10, S. 113–116.
- WEISE, G.; JIRIKOWSKI, W. (2008a): Zugkraft und Steigfähigkeit von Raupenlaufwerken (Teil 1). In: Forsttechnische Informationen, H. 3+4, S. 29–31.
- WEISE, G.; JIRIKOWSKI, W. (2008b): Zugkraft und Steigfähigkeit von Raupenlaufwerken (Teil 2). In: Forsttechnische Informationen, H. 5+6, S. 73–75.

- WEISSBACH, M.; WINTER, K. (1996): Großtraktoren und Raupe im Vergleich. In: Grundlagen der Landtechnik, Jg. 51, H. 2, S. 78–79.
- WIERMANN, C.; WERNER, D.; HORN, R.; ROSTEK, J.; WERNER, B. (2000): Stress/strain processes in a structured unsaturated silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. In: Soil and Tillage Research, Jg. 53, H. 2, S. 117–128.
- WILPERT, K. v.; SCHÄFER, J. (2006): Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics. A preliminary study. In: European Journal of Forest Research, Jg. 125, S. 129–138.
- WIPPERMANN, D. (2000): Einsatz von Raupenbändern bei Forstmaschinen. In: Forst und Technik, H. 9, S. 4–6.
- WSL (2003): Geländegängigkeit. Herausgegeben von Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Online verfügbar unter www.wsl.ch/forest/manwanu/holzernte/technologie-de.ehtml, zuletzt aktualisiert am 4. März 2003, zuletzt geprüft am 04. April 2003.
- WUSCHEK, A. (1966): Schlepper und Landmaschinen. Ein Praxisbuch. München, Basel, Wien: BLV Bayerischer Landwirtschaftsverlag (168 S.).
- YAHYA, A.; ZOHADIE, M.; AHMAD, D.; ELWALEED, A. K.; KHEIRALLA, A. F. (2007): UPM indoor tyre traction testing facility. In: Journal of Terramechanics, Jg. 44, S. 293–301.
- YONG, R. N.; FATTAH, E. A.; BOONSINSUK, P. (1978): Analysis and prediction of tyre-soil interaction and performance using finite elements. In: Journal of Terramechanics, Jg. 15, H. 1, S. 43–63.
- YOSHIDA, K.; HAMANO, H. (2002): Motion Dynamics and Control of a Planetary Rover With Slip-Based Traction Model. Tohoku University. Sendai, Japan.
- ZANDER, J.; AMMER, U.; BREITSAMETER, J. (1987): Experimentelle Untersuchungen über den Einfluß des Befahrens auf die Oberbodenverdichtung.
- ZIESAK, M. (2004): Entwicklung eines Informationssystems zum bodenschonenden Forstmaschineneinsatz. Dissertation. TU München ().
- ZOMOTOR, A. (1991): Fahrverhalten. Kräfte am Fahrzeug, Bremsverhalten, Lenkverhalten, Testverfahren, Meßtechnik, Bewertungsmethoden, Versuchseinrichtungen, aktive Sicherheit, Unfallverhütung. 2., aktualisierte Aufl. Würzburg: Vogel.
- ZOZ, F. M.; GRISSO, R. D. (2003): Traction and Tractor Performance. ASAE. St Joseph. (ASAE Distinguished Lecture Series).
- ZOZ, F. M.; TURNER, R. J. (1994): Effect of "Correct" Pressure on Tractive Efficiency of Radial Ply Tires. ASAE. St Joseph. (94-1051).

10 Anhang

Kapitel 3

Tabelle III, 1: *Versuchsbestände in der Revierförsterei Reinhausen im Niedersächsischen Forstamt Reinhausen*

Abt.	U.-Abt.	Bestockung	dom. Bodenarten- gruppe	dom. Humus- form	Anzahl Versuchsgassen
12	e1	Fichte-Douglasie	Lehmschluffe	Moder	1
13	b1	Buche-Fichte	Lehmschluffe	Moder	1
14	b1	Buche	Lehmsande	Moder	9
16	b1	Fichte-Buche-Lärche (Kiefer)	Normallehme	mullartiger Moder	5
17	b1	Buche (Fichte)	Lehmsande	F-Mull	7
34	b	Fichte-Kiefer-Lärche	Lehmsande	Moder	1
36	a	Fichte-Buche	Lehmschluffe	mullartiger Moder	1
40	a	Buche	Lehmschluffe	F-Mull	1

Tabelle III, 2: *Versuchsbestände in der Revierförsterei Goseplack im Niedersächsischen Forstamt Münden*

Abt.	U.-Abt.	Bestockung	dom. Bodenartarten- gruppe	dom. Humus- form	Anzahl Versuchsgassen
2004	b2	Fichte	Lehmsande	Moder	6
2005	b	Fichte	Sandlehme	Moder	3
2007	a	Fichte-Buche	Lehmschluffe	Moder	1
2008	b1	Eiche-Buche	Sandlehme	mullartiger Moder	1

Tabelle III, 3: *Versuchsbestände in der Revierförsterei Bursfelde im Niedersächsischen Forstamt Münden*

Abt.	U.-Abt.	Bestockung	dom. Bodenarten- gruppe	dom. Humusform	Anzahl Versuchsgassen
102	a	Eiche	Lehmsande	Moder	1
109	b	Buche	Lehmsande	mullartiger Moder	1
129	a	Fichte-Buche-Eiche-Lärche	Lehmsande	Rohhumus	3
129	b	Buche	Normallehme	Moder	3

Tabelle III, 4: Versuchsbestände in der Revierförsterei Kapellenfleck im Niedersächsischen Forstamt Lauterberg

Abt.	U.-Abt.	Bestockung	dom. Bodenarten- gruppe	dom. Humusform	Anzahl Versuchsgassen
2113	a1	Fichte	Normallehme	Grass-Wurzelfilz- Moder	3
2125	a1	Fichte	Normallehme	rohhumusartiger Moder	3
2126	a1	Fichte	Normallehme	rohhumusartiger Moder	2
2129	a1	Fichte	Normallehme	rohhumusartiger Moder	7
2130	a1	Fichte	Normallehme	Moder	1



Abbildung III, 1: Räder der vorderen Bogie-Achse mit gebrauchtem Reifen (Nokian TRS LS-2) der Dimension 600/50 – 22,5



Abbildung III, 2: Räder der hinteren Bogie-Achse mit gebrauchtem Reifen (Nokian TRS LS-2) der Dimension 700/45 – 22,5



Abbildung III, 3: Rad für die Montage auf der vorderen Bogie-Achse mit der Dimension 600/50 – 22,5 mit neuem Reifen (Trelleborg T 428)



Abbildung III, 4: Rad für die Montage auf der hinteren Bogie-Achse mit der Dimension 710/40 – 22,5 mit neuem Reifen (Trelleborg T428)

Tabelle III, 5: Abmessungen und Gebrauchsspuren der eingesetzten Rädersatz (jeweils gemessene Durchschnittswerte der vier Reifen einer Bogie-Achse)

Reifen	Reifenbreite (mm)	Reifenhöhe (mm)	Messpunkt in Laufrichtung des Reifens	Stollenlänge (mm)	Stollenzwischenraum (mm)	Profiltiefe (mm)	Mittlere Profiltiefe (mm)	Profiltiefe im Neuzustand (Herstellerangabe in mm)	Profiltiefe (in % des Neuzustands)
Gebrauchte Reifen für die Konfigurationen (0, 1, 3, 4, 5, 10, 11, 15)									
Nokian 600/50-22, 5 TRS LS-2	606,8	256,0	Links	72,8	132,5	26,3	26,8	42	64
			Mittel	58,3	45,0	25,8			
			Rechts	66,8	122,5	28,3			
Nokian 700/45-22, 5 TRS LS-2	701,8	263,0	Links	64,0	136,5	31,8	31,6	42	75
			Mittel	67,5	42,8	31,3			
			Rechts	60,0	134,3	31,8			
Neue Reifen für die Konfigurationen (2, 6, 12, 16)									
Trelleborg 600/50-22, 5 T 428	619,5	283,0	Links	71,3	111,0	35,5	37,2	35	106
			Mittel	68,5	71,0	37,3			
			Rechts	77,3	127,0	38,8			
Trelleborg 710/40-22, 5 T 428	730,8	275,0	Links	77,5	132,3	36,3	35,1	35	100
			Mittel	76,8	95,8	33,3			
			Rechts	75,8	128,0	35,8			

Kapitel 4

Tabelle IV, 1: Radumfänge für die verschiedenen Maschinenkonfigurationen

Konfiguration	Radumfang [cm]
<i>Konfiguration 0 (gebr. Reifen 2,7 bar)</i>	334,65
<i>Konfiguration 1 (mit Ketten und Bändern)</i>	334,65
<i>Konfiguration 2 (neue Reifen 2,7 bar)</i>	345,00
<i>Konfiguration 3 (mit Ketten)</i>	334,65
<i>Konfiguration 4 (mit Bändern)</i>	327,75
<i>Konfiguration 5 (gebr. Reifen 1,5 bar)</i>	327,75
<i>Konfiguration 6 (neue Reifen 1,5 bar)</i>	338,10
<i>Konfiguration 10 (gebr. Reifen 2,7 bar, beladen)</i>	324,30
<i>Konfiguration 11 (mit Ketten und Bändern, beladen)</i>	327,75
<i>Konfiguration 12 (neue Reifen 2,7 bar, beladen)</i>	331,20
<i>Konfiguration 15 (gebr. Reifen 1,5 bar, beladen)</i>	324,30
<i>Konfiguration 16 (neue Reifen 1,5 bar, beladen)</i>	331,20

Kapitel 5

Tabelle V, 1: Bedeutung der verschiedenen Maschinekonfigurationen für die Versuchsserien

Maschinenkonfiguration (Variable: Konfig)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien	
	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)
Konfiguration 0 (gebrauchte Reifen mit 2,7 bar)	13	22,8	7	22,6	20	22,7
Konfiguration 1 (Ketten und Bänder; 2,7 bar)	5	8,8	3	9,7	8	9,1
Konfiguration 2 (Neureifen; 2,7 bar)	8	14,0	6	19,4	14	15,9
Konfiguration 3 (Ketten; 2,7 bar)	1	1,8	0	0	1	1,1
Konfiguration 4 (Bändern; 2,7 bar)	7	12,3	1	3,2	8	9,1
Konfiguration 5 (gebrauchte Reifen; 1,5 bar)	7	12,3	4	12,9	11	12,5
Konfiguration 6 (Neureifen; 1,5 bar)	6	10,5	2	6,5	8	9,1
Konfiguration 10 (gebrauchte Reifen mit Beladung; 2,7 bar)	1	1,8	2	6,5	3	3,4
Konfiguration 11 (Ketten und Bänder mit Beladung; 2,7 bar)	0	0	1	3,2	1	1,1
Konfiguration 12 (Neureifen mit Beladung; 2,7 bar)	2	3,5	2	6,5	4	4,5
Konfiguration 15 (gebrauchte Reifen mit Beladung; 1,5 bar)	2	3,5	1	3,2	3	3,4
Konfiguration 16 (Neureifen mit Beladung; 1,5 bar)	5	8,8	2	6,5	7	8,0
Gesamt	57	100	31	100	88	100

Tabelle V, 2: Bedeutung der zwei unterschiedlichen Rädersatzes für die Versuchsserien

montierte Reifen (Variable: Reifen)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien	
	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)
gebrauchte Reifen (Variableneintrag „0“)	36	63,2	19	61,3	55	62,5
Neureifen (Variableneintrag „1“)	21	36,8	12	38,7	33	37,5
Gesamt	57	100	31	100	88	100

Tabelle V, 3: Bedeutung der zwei Reifeninnendruckstufen für die Versuchsserien

Reifeninnendruck (Variable: Druck)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien	
	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)
Standardinnendruck (2,7 bar)	37	64,9	22	71,0	59	67,0
reduzierter Innendruck (1,5 bar)	20	35,1	9	29	29	33,0
Gesamt	57	100	31	100	88	100

Tabelle V, 4: Bedeutung der Gleitschutzkettenmontage für die Versuchsserien

Kettenmontage (Variable: Ketten)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien	
	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)
ohne Gleitschutzketten (Variableneintrag „0“)	51	89,5	27	87,1	78	88,6
mit Gleitschutzketten (Variableneintrag „1“)	6	10,5	4	12,9	10	11,4
Gesamt	57	100	31	100	88	100

Tabelle V, 5: Bedeutung der Bändermontage für die Versuchsserien

Bändermontage (Variable: Baender)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien	
	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)
ohne Bänder (Variableneintrag „0“)	45	78,9	26	83,9	71	80,7
mit Bändern (Variableneintrag „1“)	12	21,1	5	16,1	17	19,3
Gesamt	57	100	31	100	88	100

Tabelle V, 6: Bedeutung unterschiedlicher Beladungszustände für die Versuchsserien

Beladungszustände (Variable: Beladung)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien	
	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)
unbeladen	47	82,5	23	74,2	70	79,5
1.350 kg	1	1,8	0	0	1	1,1
4.000 kg	2	3,5	3	9,7	5	5,7
4.650 kg	1	1,8	1	3,2	2	2,3
4.850 kg	2	3,5	2	6,5	4	4,5
6.000 kg	3	5,3	0	0	3	3,4
6.100 kg	0	0	1	3,2	1	1,1
7.700 kg	0	0	1	3,2	1	1,1
8.100 kg	1	1,8	0	0	1	1,1
Gesamt	57	100	31	100	88	100

Tabelle V, 7: Verteilung der Versuchsserien auf unterschiedliche Geländeneigungen

Steigungsbereiche (Variable: Steigung)	Versuchsserien	
	(absolut)	(%)
Traktionsmessungen		
-6,0 bis -1,0	29	50,8
0	8	14,0
1,0 bis 8,0	20	35,1
Gesamt	57	100
Hangmessungen		
10,0 bis 19,0	7	22,6
20,0 bis 29,0	16	51,6
30,0 bis 39,0	7	22,6
40,0	1	3,2
Gesamt	31	100

Tabelle V, 8: Bedeutung einer auffälligen Querneigung für die Versuchsserien

Querneigung (Variable: Querneigung)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien	
	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)
ohne erkennbare Querneigung (Variableneintrag „0“)	46	80,7	31	100,0	77	87,5
mit deutlicher Querneigung (Variableneintrag „1“)	11	19,3	0	0	11	12,5
Gesamt	57	100	31	100	88	100

Tabelle V, 9: Verteilung der Versuchsserien und Versuchsgassen auf unterschiedliche Bestockungen der Bestände

Hauptbaumart (Variable: Baumart)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien		Versuchsgassen	
	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)
unbestockt (Eintrag < 10)	0	0	5	16,1	5	5,7	4	6,7
Fichte (Eintrag 10 bis 19)	31	54,4	8	25,8	39	44,3	31	51,7
Buche (Eintrag 20 bis 29)	22	38,6	18	58,1	40	45,5	22	36,7
Eiche (Eintrag 30 bis 39)	3	5,3	0	0	3	3,4	2	3,3
Lärche (Eintrag 40 bis 49)	1	1,8	0	0	1	1,1	1	1,7
Gesamt	57	100	31	100	88	100	60	100

Tabelle V, 10: Verteilung der Versuchsserien und Versuchsgassen auf unterschiedliche Rückegassenzustände

Gassenzustand (Variable: Gasse)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien		Versuchsgassen	
	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)
ohne Reisig (Eintrag „0“)	3	5,3	6	19,4	9	10,2	7	11,7
Reisig und Humusaufgabe (Eintrag „1“)	49	86,0	22	71,0	71	80,7	45	75,0
mit besonderem Bewuchs (Eintrag „2“)	1	1,8	0	0	1	1,1	1	1,7
stärkere Altreisigaufgabe (Eintrag „4“)	4	7,0	3	9,7	7	8,0	7	11,7
Gesamt	57	100	31	100	88	100	60	100

Tabelle V,11: Bedeutung besonderer Versuchsbedingungen für die Versuchsserien

Besonderheiten (Variable: Auswahl)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien	
	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)
ohne Besonderheiten (Eintrag „0“)	42	73,7	21	67,7	63	71,6
Schlaglöcher (Eintrag „11“)	1	1,8	0	0	1	1,1
dehnende Angelsehne (Eintrag „13“)	0	0	1	3,2	1	1,1
Pfützen (Eintrag „15“)	1	1,8	0	0	1	1,1
Befahrungsgrenze (Eintrag „31“)	0	0	6	19,4	6	6,8
Wassergehalts-änderungen (Eintrag „32“)	6	10,5	0	0	6	6,8
Rückeweg (Eintrag „33“)	1	1,8	3	9,7	4	4,5
Skelettgehalt höher eingeschätzt (Eintrag „36“)	1	1,8	0	0	1	1,1
Dyneema Seil (Eintrag „37“)	5	8,8	0	0	5	5,7
Gesamt	57	100	31	100	88	100

Tabelle V, 12: Bedeutung unterschiedlicher Bodenwassergehalte während der Versuchsserien

Bodenwassergehalt (Variable: Feuchte)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien	
	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)
unter 20 %	1	1,8	0	0	1	1,1
20 % bis 30 %	12	21,1	6	19,4	18	20,5
30 % bis 40 %	23	40,4	22	71,0	45	51,1
40 % bis 50 %	15	26,3	2	6,5	17	19,3
über 50 %	1	1,8	0	0	1	1,1
fehlende Angaben (Eintrag „999“)	5	8,8	1	3,2	6	6,8
Gesamt	57	100	31	100	88	100

Tabelle V, 13: Bedeutung der Bodenarten (Erhebung im Rahmen der Standortaufnahme) für die Versuchsserien und Versuchsgassen

Bodenart (Variable: Bodenart)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien		Versuchsgassen	
	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)
schwach lehmiger Sand (SI2) (Eintrag „1“)	6	10,5	0	0	6	6,8	5	8,3
(mittel) lehmiger Sand (SI3) (Eintrag „2“)	15	26,3	13	41,9	28	31,8	18	30,0
stark lehmiger Sand (SI4) (Eintrag „3“)	6	10,5	3	9,7	9	29,0	6	10,0
mittel sandiger Lehm (Ls3) (Eintrag „4“)	2	3,5	4	12,9	6	6,8	3	5,0
schwach sandiger Lehm (Ls2) (Eintrag „5“)	6	10,5	8	25,8	14	15,9	11	18,3
schwach toniger Lehm (Lt2) (Eintrag „6“)	1	1,8	1	3,2	2	2,3	2	3,3
sandig lehmiger Schluff (UIs) (Eintrag „7“)	4	7,0	2	6,5	6	6,8	3	5,0
schwach toniger Schluff (Ut2) (Eintrag „8“)	8	14,0	0	0	8	9,1	4	6,7
(mittel) toniger Schluff (Ut3) (Eintrag „9“)	3	5,3	0	0	3	3,4	3	5,0
stark toniger Schluff (Ut4) (Eintrag „10“)	4	7,0	0	0	4	4,5	3	5,0
Wiegerson-Sand (Eintrag „11“)	1	1,8	0	0	1	1,1	1	1,7
Wiegerson-Ton (Eintrag „12“)	1	1,8	0	0	1	1,1	1	1,7
Gesamt	57	100	31	100	88	100	60	100

Tabelle V, 14: Bedeutung unterschiedlicher Skelettgehalte im Oberboden für die Versuchsserien sowie bezogen auf die Versuchsgassen

Skelettgehalt (Variable: Skelettanteil)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien		Versuchsgassen	
	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)
skelettfrei	33	57,9	18	58,1	51	58,0	28	46,7
0 % bis 5 %	7	12,3	5	8,8	12	13,6	11	18,3
5 % bis 10 %	10	17,5	2	6,5	12	13,6	10	16,7
10 % bis 15 %	2	3,5	3	9,7	5	5,7	4	6,7
20 % bis 25 %	1	1,8	2	6,5	3	3,4	2	3,3
35 % bis 40 %	0	0	1	3,2	1	1,1	1	1,7
fehlende Angaben (Eintrag „999“)	4	7,0	0	0	4	4,5	4	6,7
Gesamt	57	100	31	100	88	100	60	100

Tabelle V, 15: Bedeutung unterschiedlicher Humusvorkommensklassen für die Versuchsserien und Versuchsgassen

Humusvorkommen (Variable: Humusvork)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien		Versuchsgassen	
	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)	(absolut)	(%)
ohne Humusauf- lage (Eintrag „0“)	0	0	6	19,4	6	6,8	4	6,7
geringe Humusauf- lage (Eintrag „1“)	4	7,0	0	0	4	4,5	4	6,7
übliche Humusauf- lage (Eintrag „2“)	49	86,0	25	80,6	74	84,1	48	80,0
fehlende Angaben (Eintrag „999“)	4	7,0	0	0	4	4,5	4	6,7
Gesamt	57	100	31	100	88	100	60	100

Tabelle V, 16: Bedeutung unterschiedlicher Humusformen (Erhebung im Rahmen der Standortaufnahme) für die Versuchsserien und Versuchsgassen

Humusform (Variable: Humusform)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien		Versuchsgassen	
	(N = Anzahl)	(%)	(N = Anzahl)	(%)	(N = Anzahl)	(%)	(N = Anzahl)	(%)
F-Mull (Eintrag „1“)	11	19,3	9	29,0	20	22,7	9	15,0
mullartiger Moder (Eintrag „2“)	3	5,3	5	16,1	8	9,1	5	8,3
Moder (Eintrag „3“)	32	56,1	10	32,3	42	47,7	30	50,0
Grass-Wurzelfilz-Moder (Eintrag „4“)	0	0	2	6,5	2	2,3	2	3,3
rohhumusartiger Moder (Eintrag „5“)	3	5,3	5	16,1	8	9,1	6	10,0
Rohhumus (Eintrag „6“)	4	7,0	0	0	4	4,5	4	6,7
fehlende Angaben (Eintrag „999“)	4	7,0	0	0	4	4,5	4	6,7
Gesamt	57	100	31	100	88	100	60	100

Tabelle V, 17: Bedeutung unterschiedlicher Scherfestigkeitsklassen (Erhebung im Rahmen der Standortaufnahme) für die Versuchsserien und Versuchsgassen

Scherfestigkeit (Variable: SF_allg)	Traktionsmessungen		Hangmessungen		Versuchsserien		Versuchsgassen	
	(N = Anzahl)	(%)	(N = Anzahl)	(%)	(N = Anzahl)	(%)	(N = Anzahl)	(%)
0 bis 50 kPa	1	1,8	0	0	1	1,1	1	1,7
50 bis 100 kPa	13	22,8	12	38,7	25	28,4	16	26,7
100 bis 150 kPa	26	45,6	14	45,2	40	45,5	24	40,0
150 bis 200 kPa	9	15,8	2	6,5	11	12,5	9	15,0
200 bis 250 kPa	3	5,3	0	0	3	3,4	3	5,0
250 bis 300 kPa	1	1,8	0	0	1	1,1	1	1,7
fehlende Angaben (Eintrag „999“)	4	7,0	3	9,7	7	8,0	6	10,0
Gesamt	57	100	31	100	88	100	60	100

Tabelle V, 18: Bedeutung der drei Korngrößenfraktionen

Anteil der Korngrößenfraktion	Sand		Schluff		Ton	
	(N = Anzahl)	(%)	(N = Anzahl)	(%)	(N = Anzahl)	(%)
bis 10 %	5	13,9	0	0	10	27,8
10 % bis 20 %	11	30,6	2	5,6	13	36,1
20 % bis 30 %	6	16,7	0	0	10	27,8
30 % bis 40 %	3	8,3	5	13,9	3	8,3
40 % bis 50 %	5	13,9	6	16,7	0	0
50 % bis 60 %	4	11,1	6	16,7	0	0
60 % bis 70 %	1	2,8	12	33,3	0	0
70 % bis 80 %	1	2,8	4	11,1	0	0
80 % bis 90 %	0	0	1	2,8	0	0
Anzahl	36		36		36	
Mittelwert	29,3		54,4		16,2	
Standardabweichung	18,96		15,79		7,82	

Tabelle V, 19: Bedeutung der Lagerungsdichteklassen nach TEPPE ET AL. (2003) für drei unterschiedliche Bereich der Rückegassen

Lagerungsdichteklasse	Spur		Mitte		Bestand	
	(N = Anzahl)	(%)	(N = Anzahl)	(%)	(N = Anzahl)	(%)
< 1 g/cm ³	7	15,9	17	39,5	20	46,5
1 bis 1,25 g/cm ³	8	18,2	9	20,9	18	41,9
1,25 bis 1,45 g/cm ³	14	31,8	8	18,6	4	9,3
1,45 bis 1,65 g/cm ³	12	27,3	7	16,3	1	2,3
> 1,65 g/cm ³	3	6,8	2	4,7	0	0
Anzahl	44		43		43	
Mittelwert	1,30		1,10		1,01	
Standardabweichung	0,32		0,36		0,22	

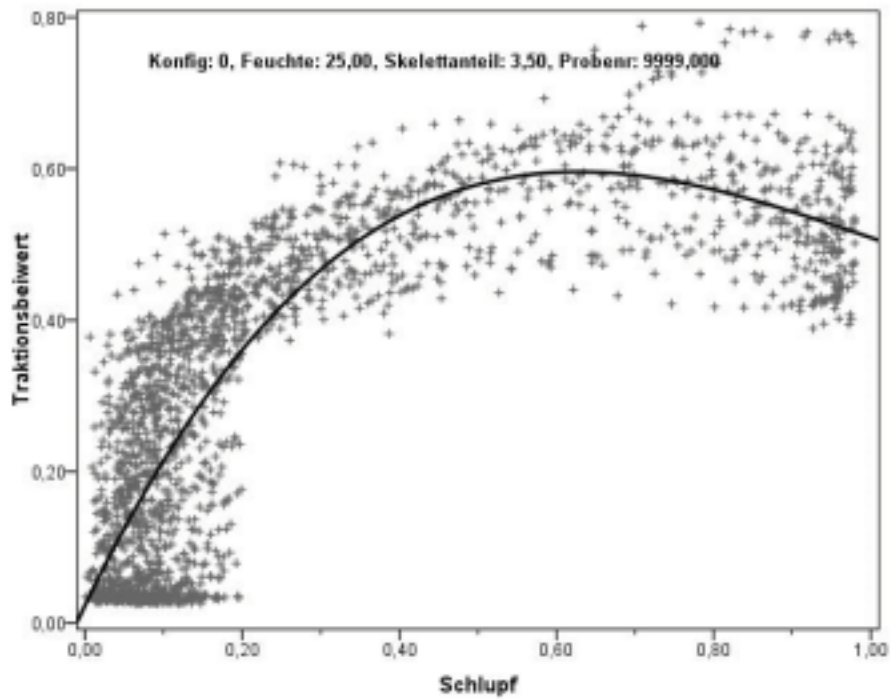


Abbildung V, 1: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei 25,0 % Bodenwassergehalt

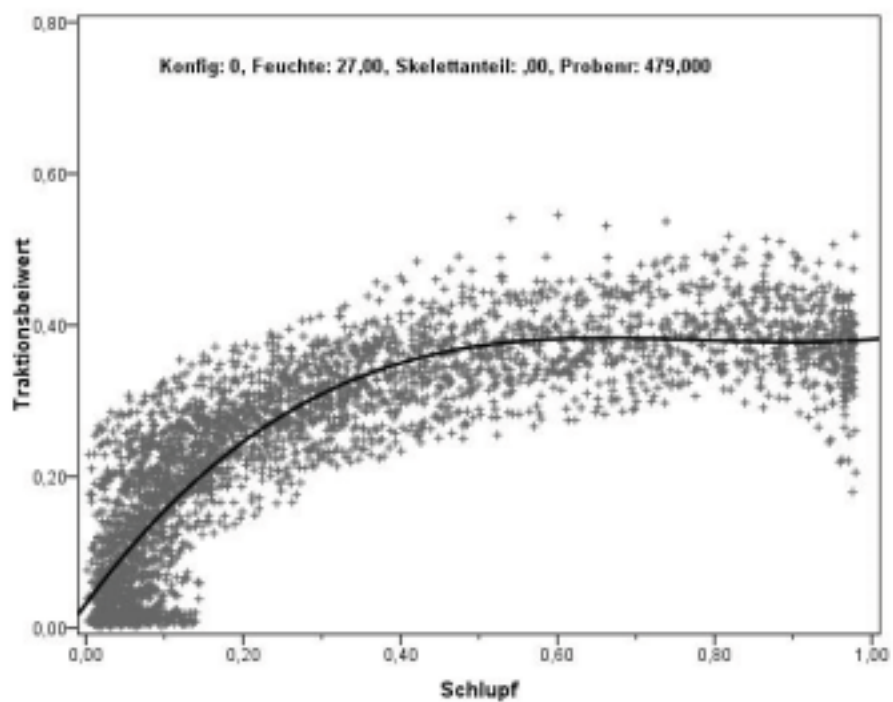


Abbildung V, 2: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei 27,0 % Bodenwassergehalt

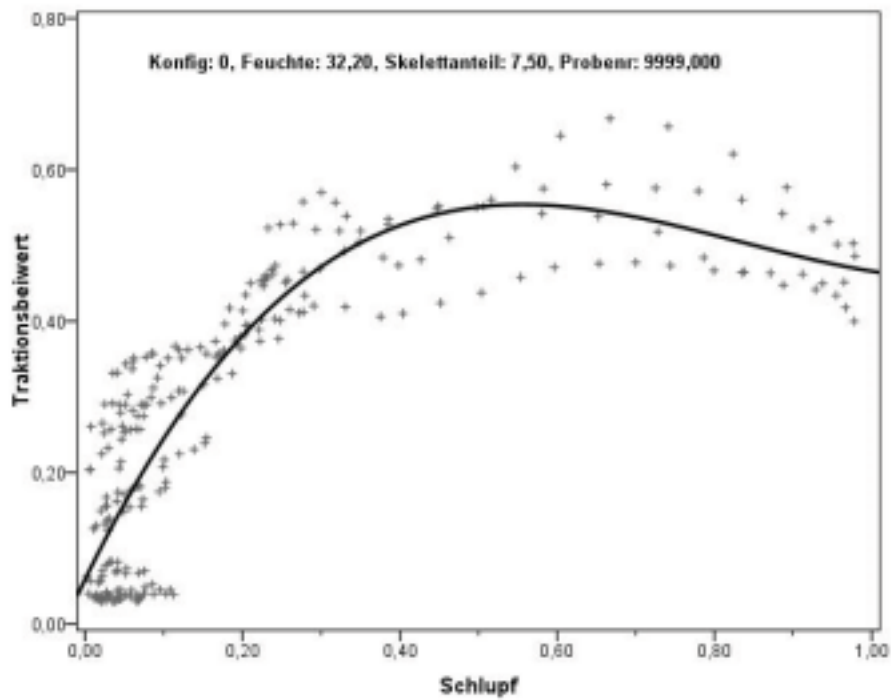


Abbildung V, 3: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei 32,2 % Bodenwassergehalt

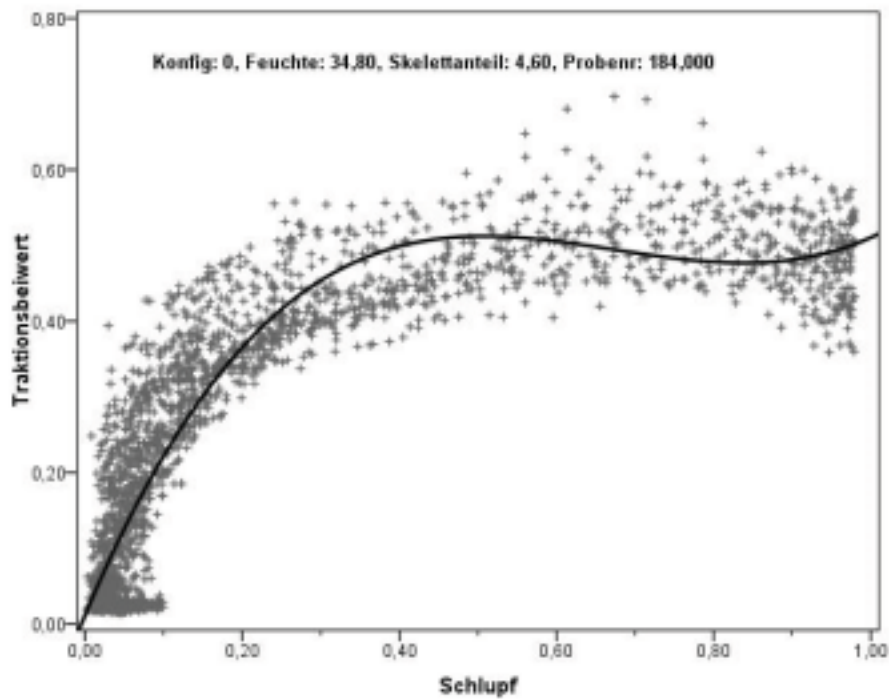


Abbildung V, 4: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei 34,8 % Bodenwassergehalt

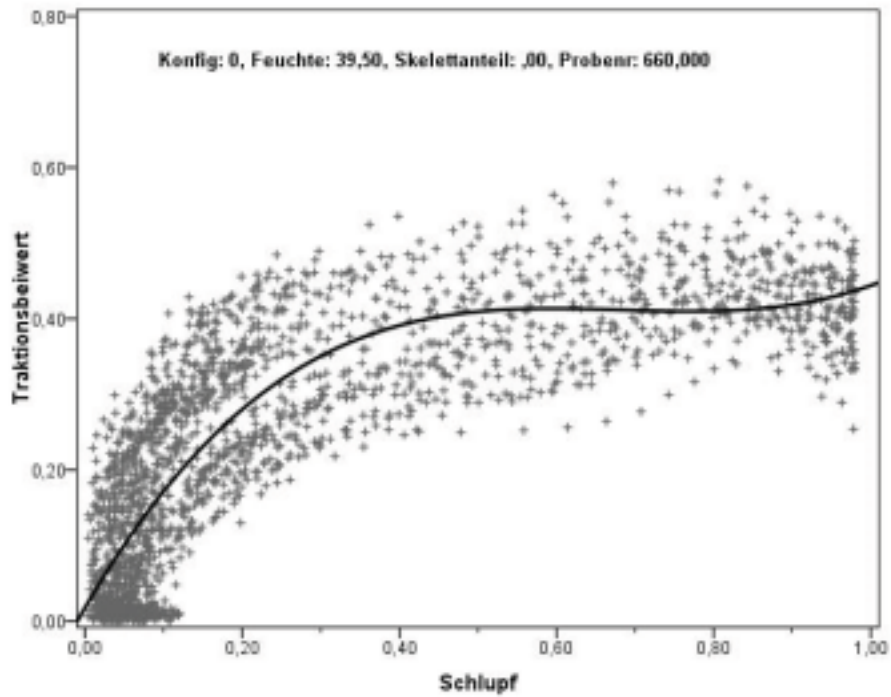


Abbildung V, 5: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei 39,5 % Bodenwassergehalt

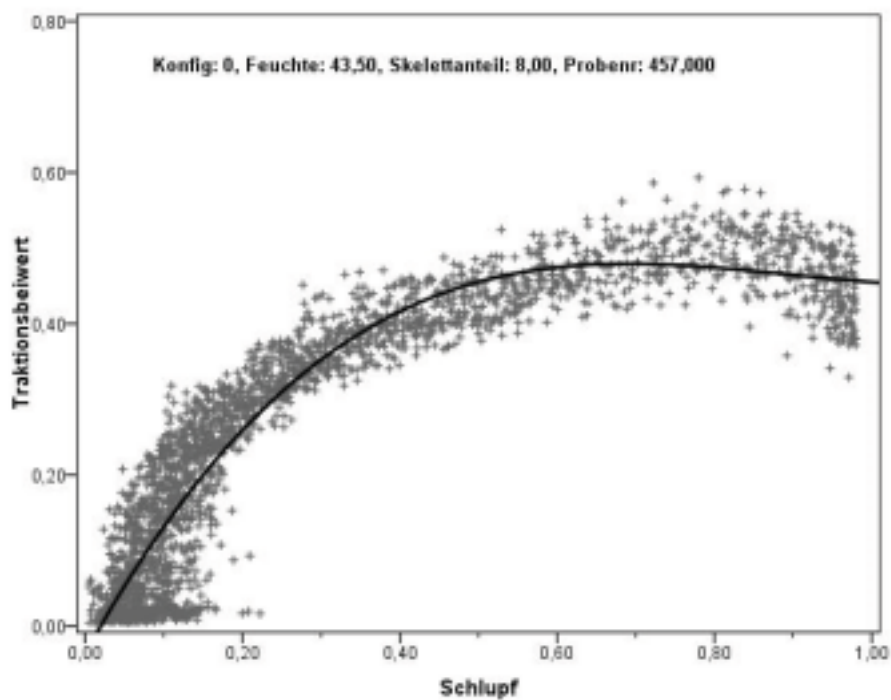


Abbildung V, 6: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei 43,5 % Bodenwassergehalt

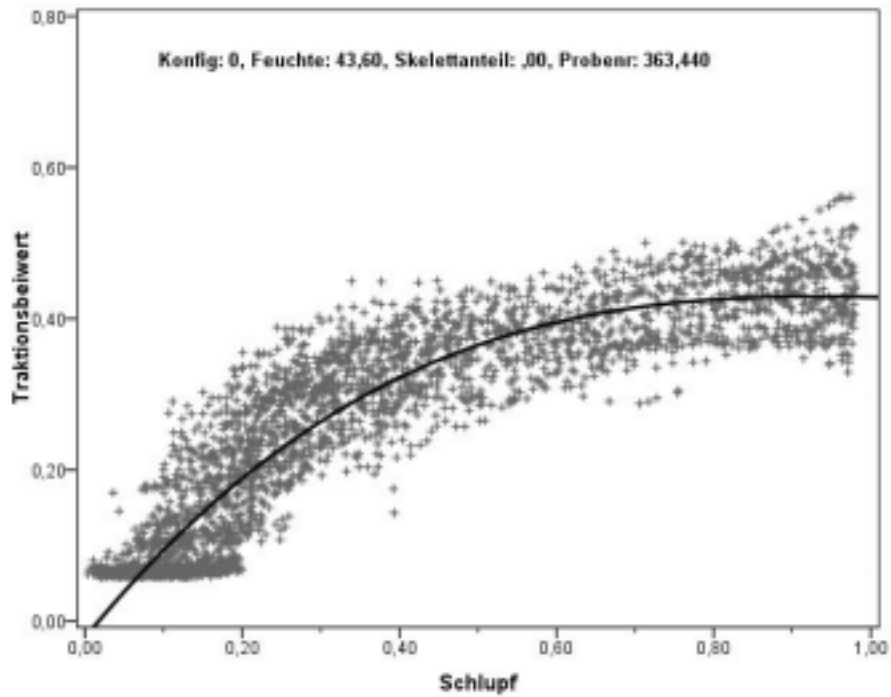


Abbildung V, 7: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei 43,6 % Bodenwassergehalt

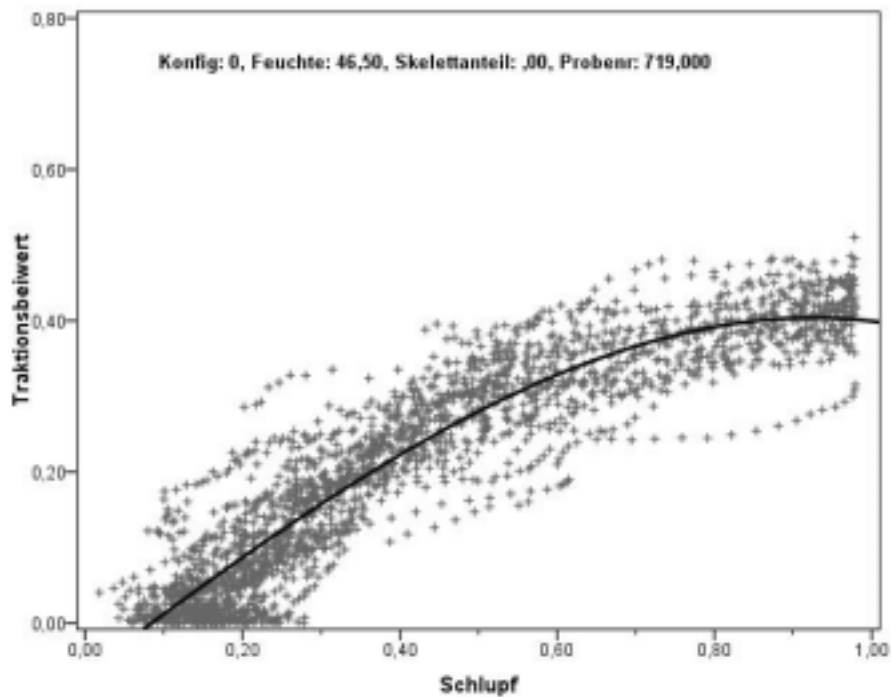


Abbildung V, 8: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei 46,5 % Bodenwassergehalt

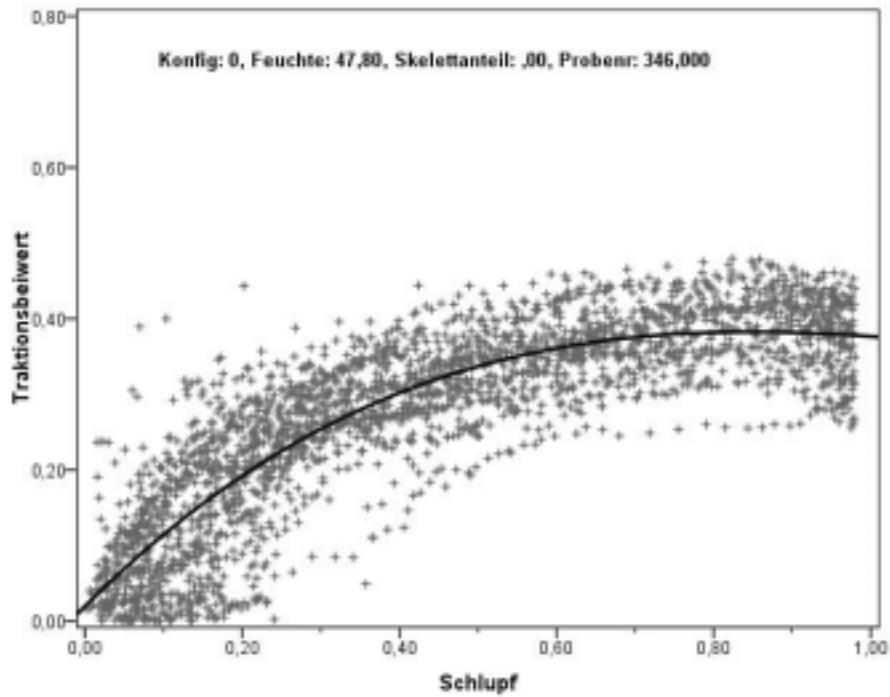


Abbildung V, 9: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei 47,8 % Bodenwassergehalt

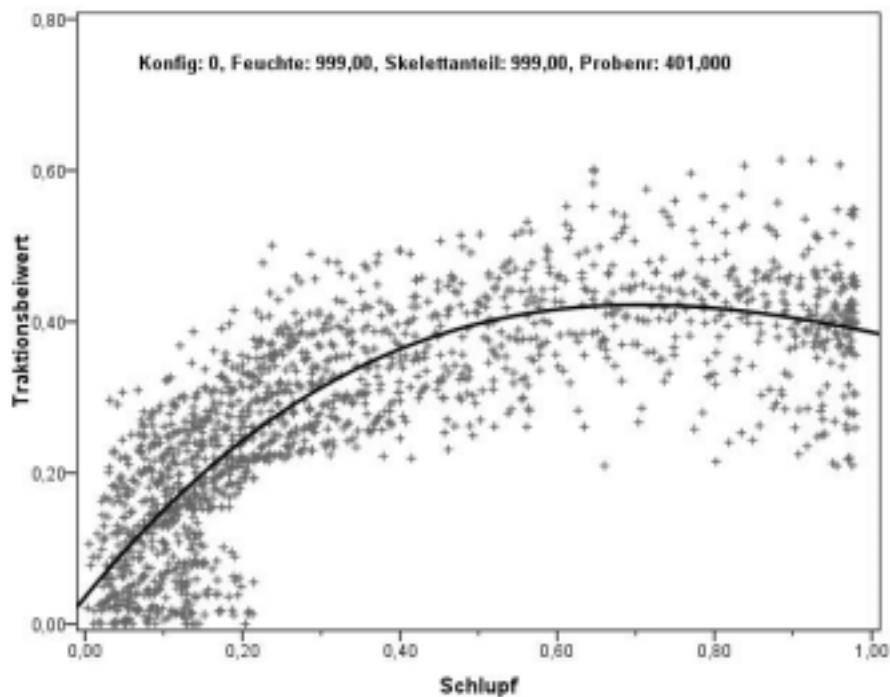


Abbildung V, 10: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei unbekanntem Bodenwassergehalt

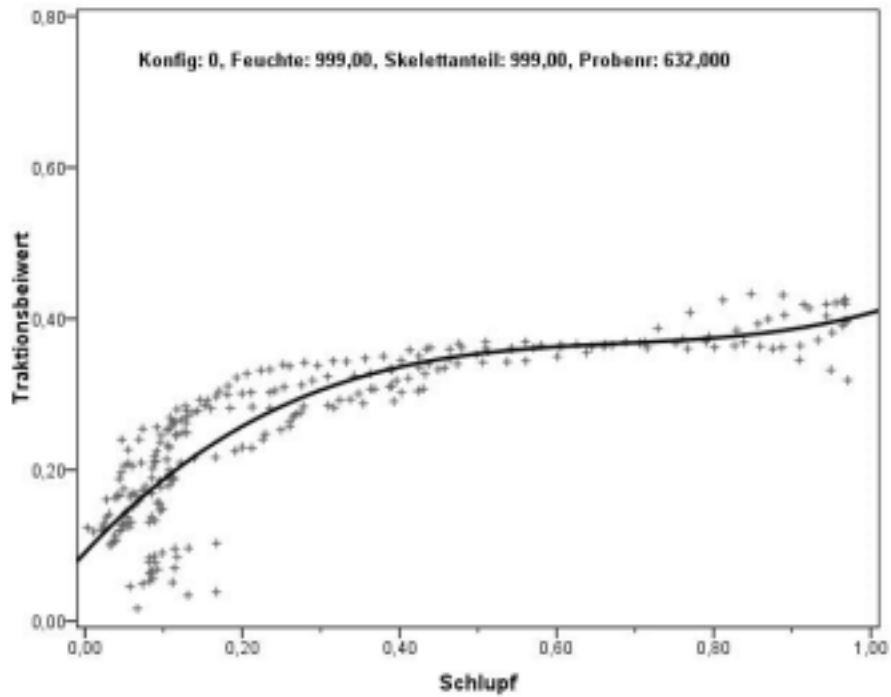


Abbildung V, 11: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei unbekanntem Bodenwassergehalt

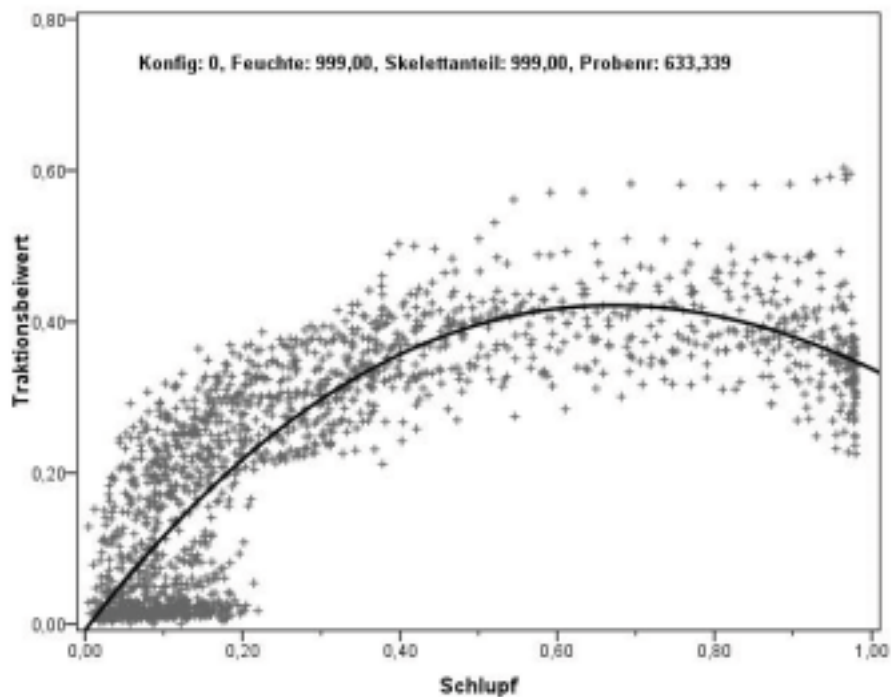


Abbildung V, 12: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei unbekanntem Bodenwassergehalt

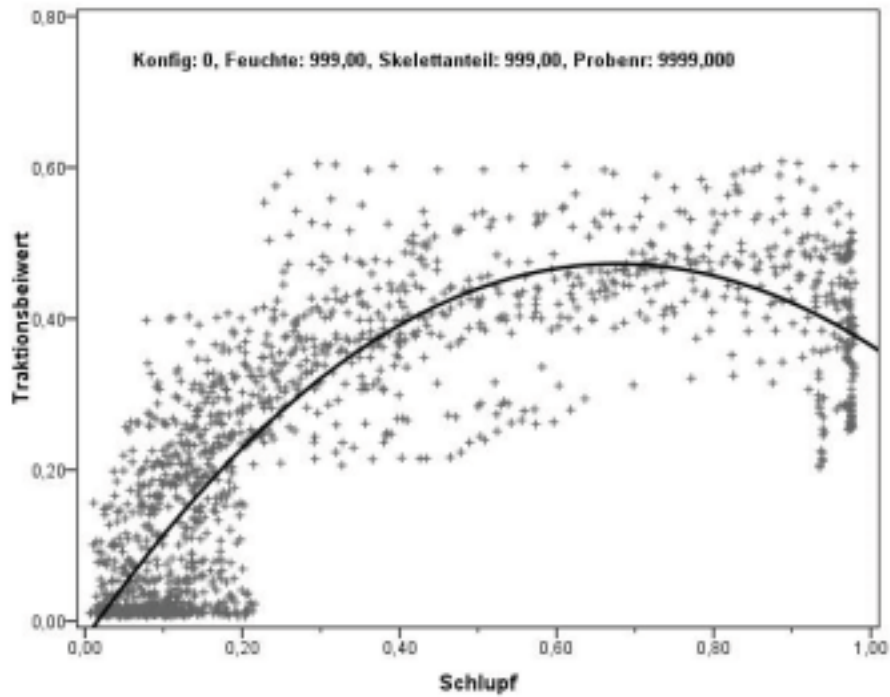


Abbildung V, 13: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 0 bei 43,5 % Bodenwassergehalt

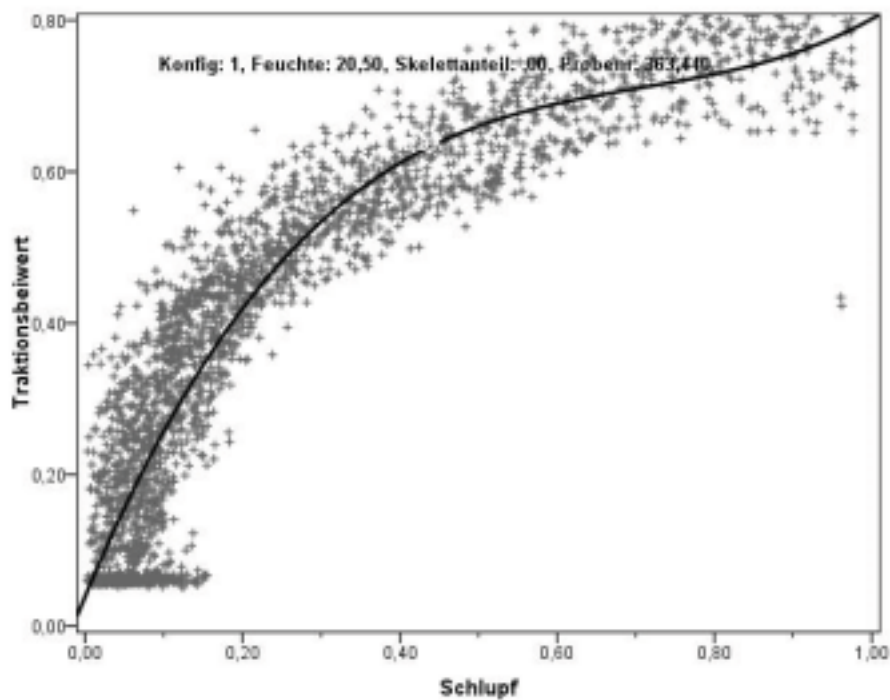


Abbildung V, 14: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 1 bei 20,5 % Bodenwassergehalt

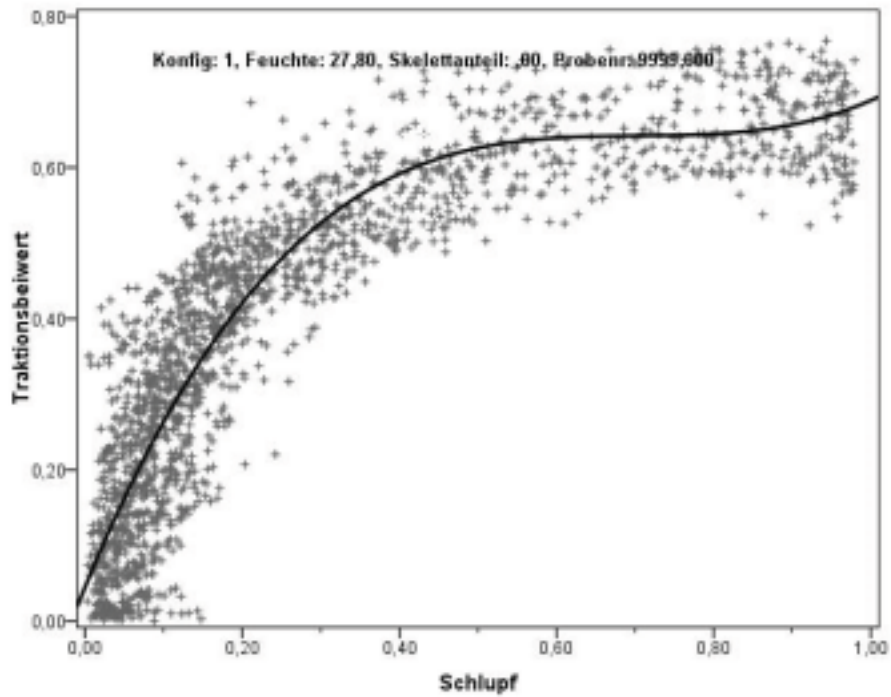


Abbildung V, 15: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 1 bei 27,8 % Bodenwassergehalt

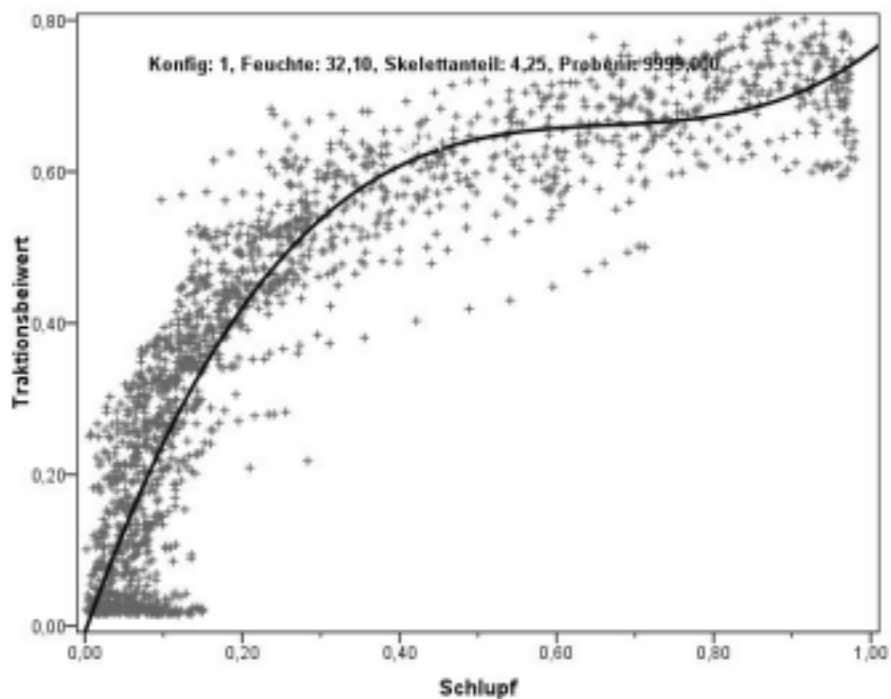


Abbildung V, 16: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 1 bei 32,1 % Bodenwassergehalt

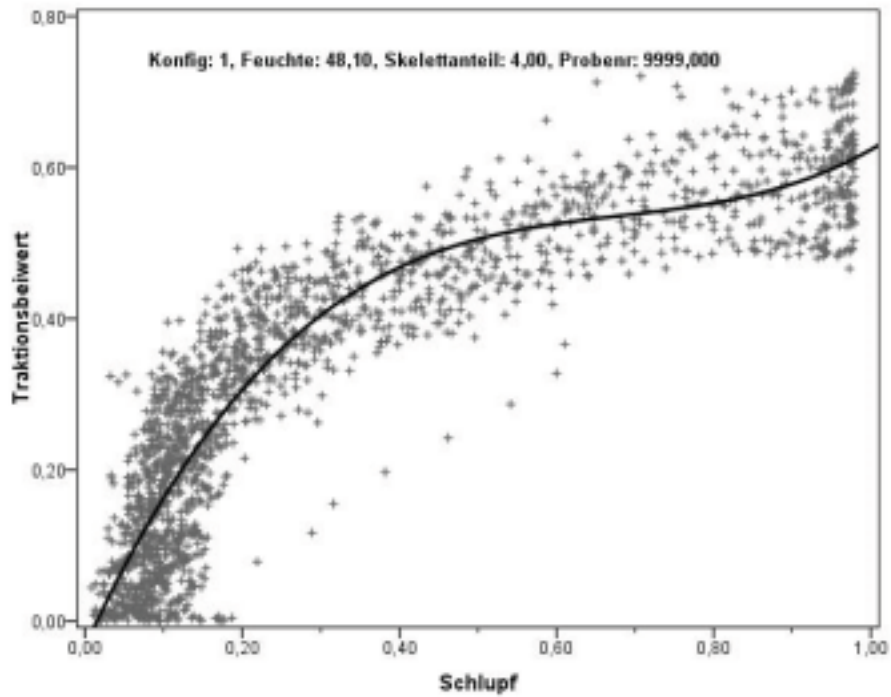


Abbildung V, 17: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 1 bei 48,1 % Bodenwassergehalt

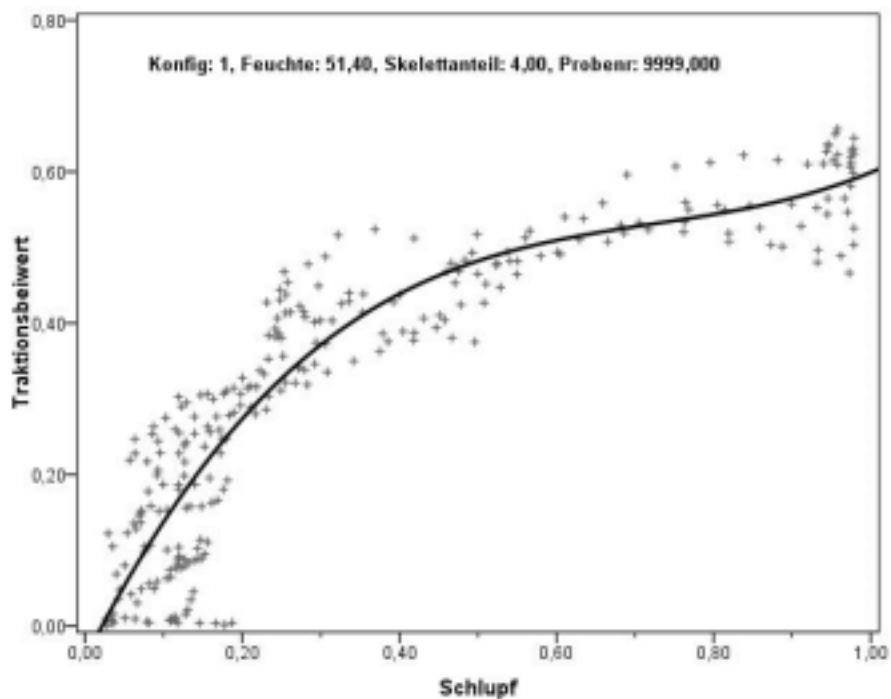


Abbildung V, 18: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 1 bei 51,0 % Bodenwassergehalt

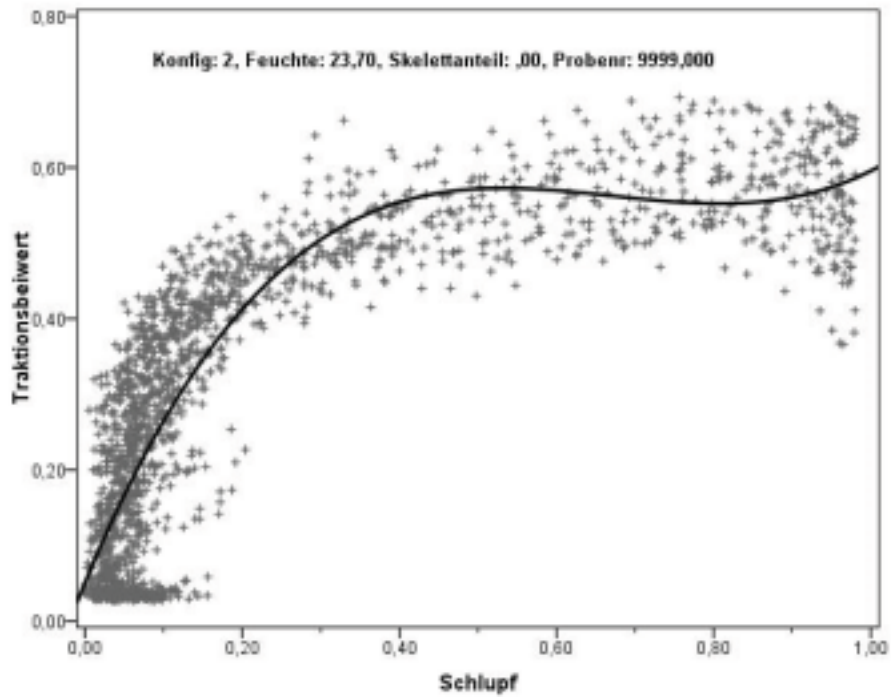


Abbildung V, 19: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 2 bei 23,7 % Bodenwassergehalt

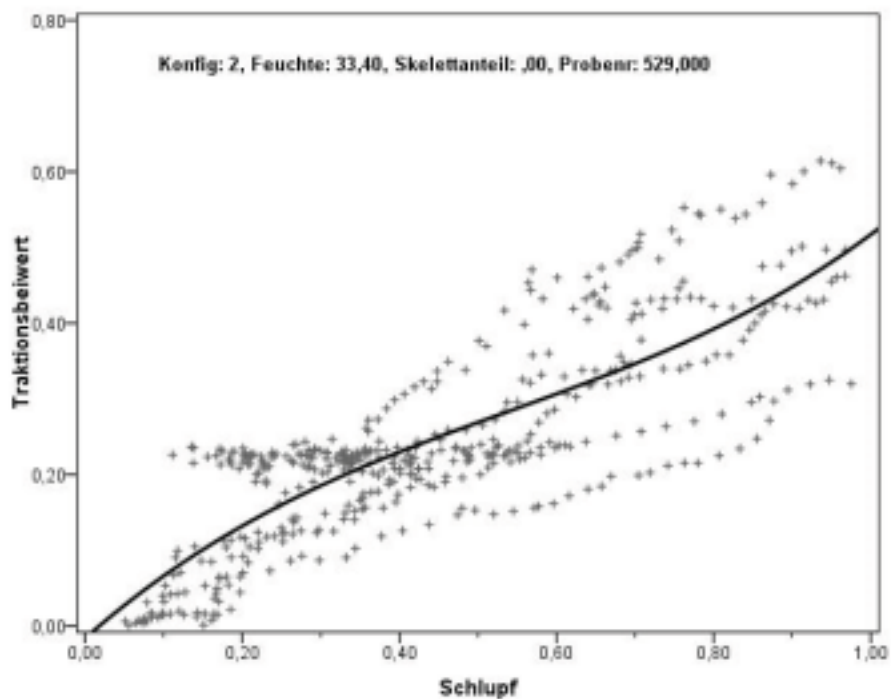


Abbildung V, 20: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 2 bei 33,4 % Bodenwassergehalt

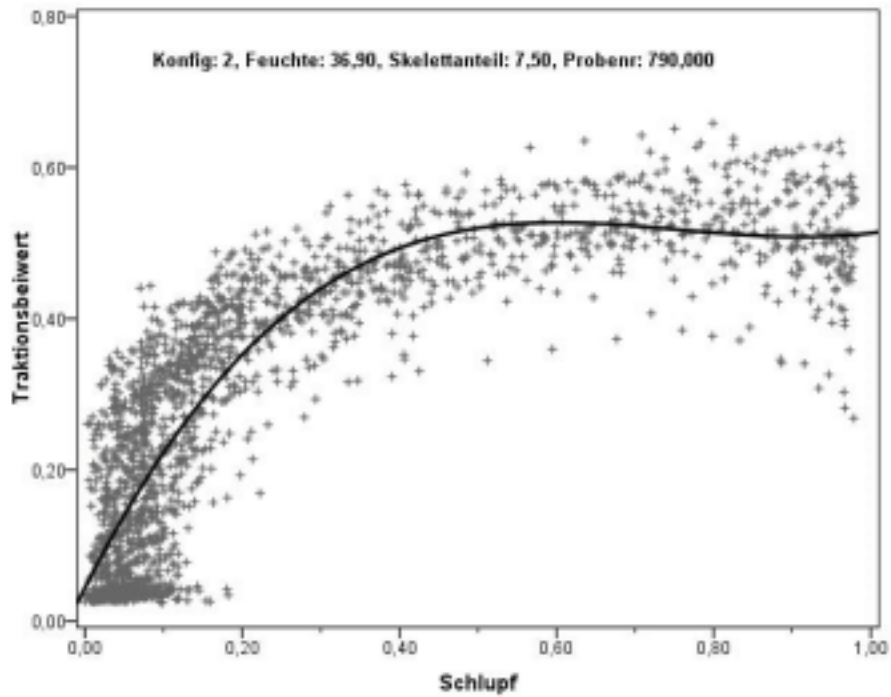


Abbildung V, 21: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 2 bei 36,9 % Bodenwassergehalt

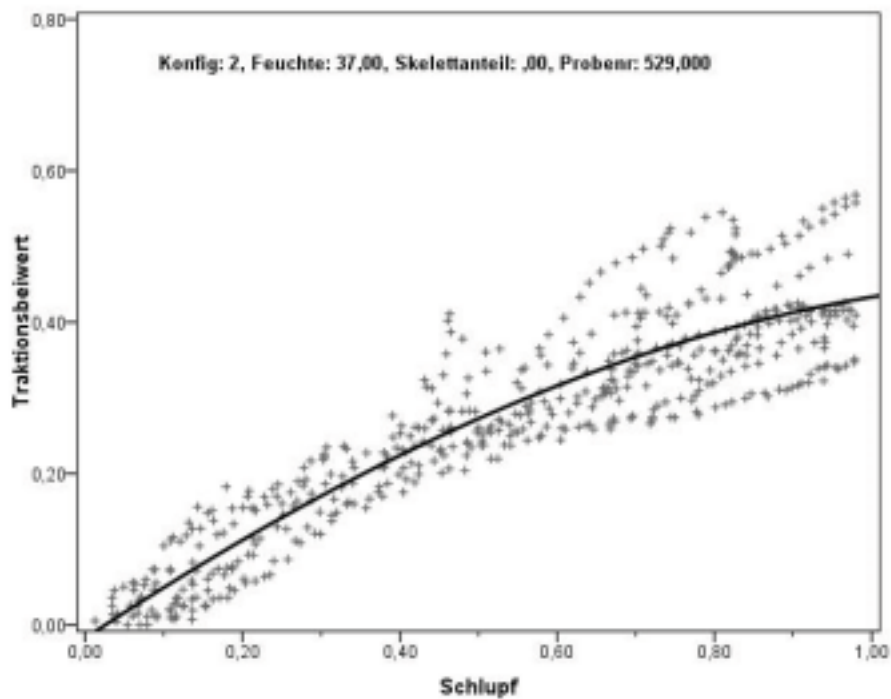


Abbildung V, 22: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 2 bei 37,0 % Bodenwassergehalt

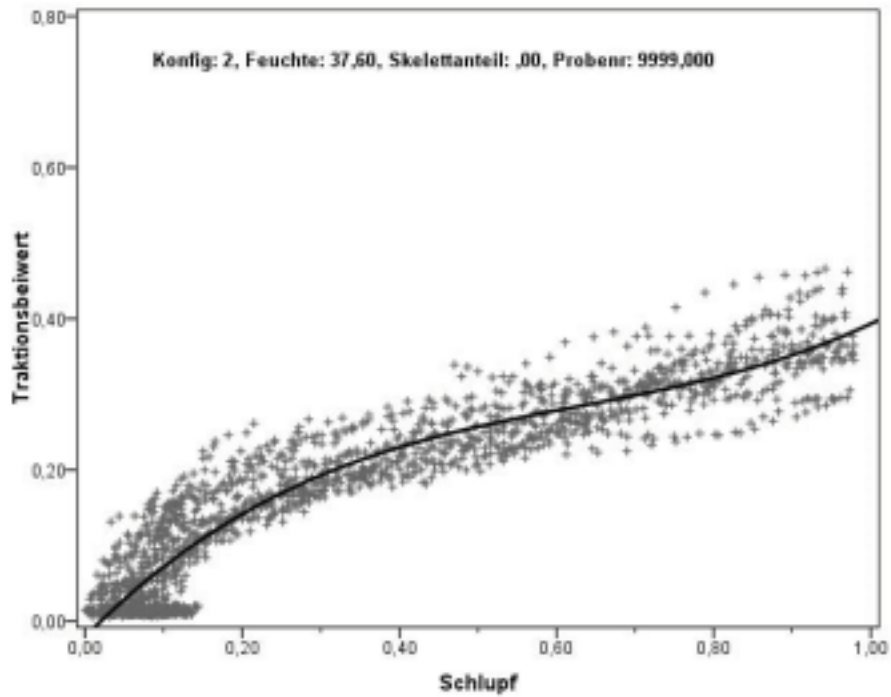


Abbildung V, 23: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 2 bei 37,6 % Bodenwassergehalt

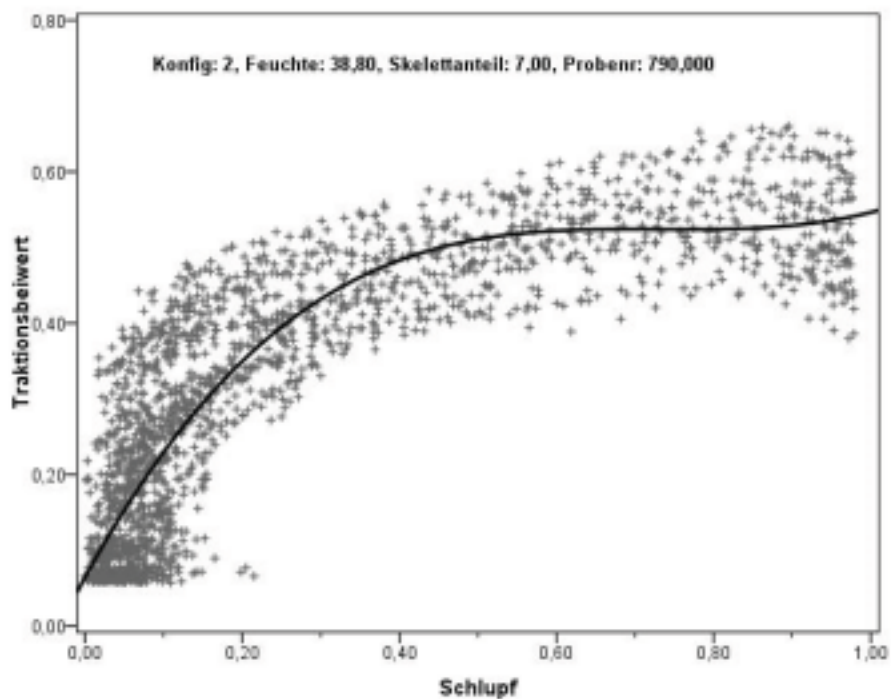


Abbildung V, 24: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 2 bei 38,8 % Bodenwassergehalt

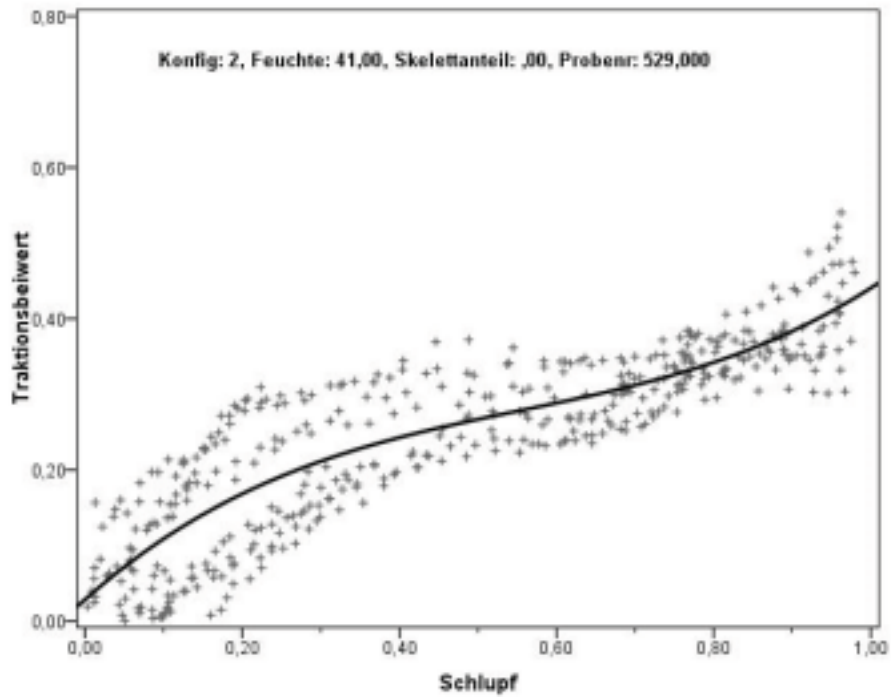


Abbildung V, 25: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 2 bei 41,0 % Bodenwassergehalt

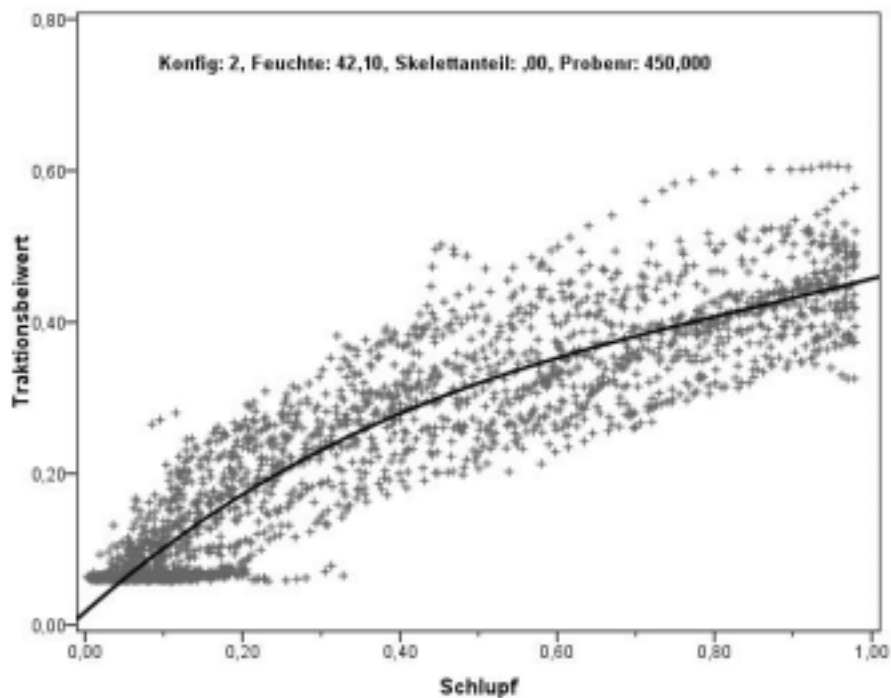


Abbildung V, 26: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 2 bei 42,1 % Bodenwassergehalt

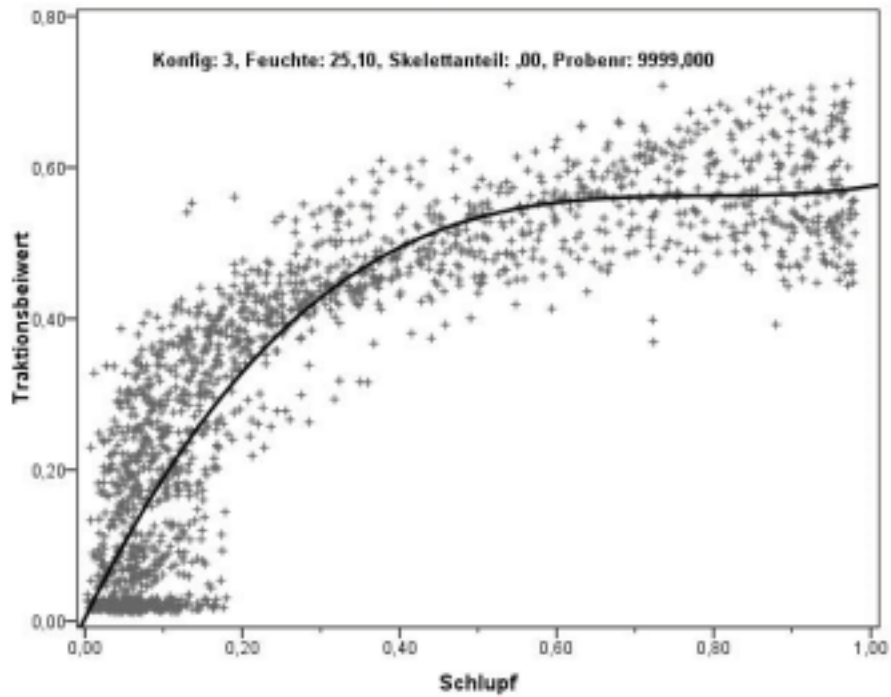


Abbildung V, 27: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 3 bei 25,1 % Bodenwassergehalt

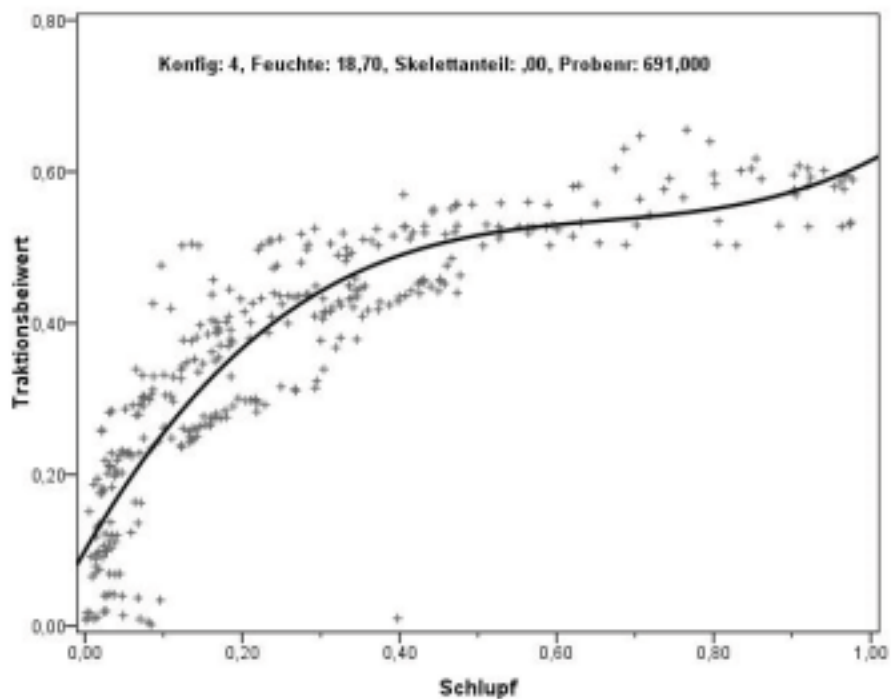


Abbildung V, 28: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 4 bei 18,7 % Bodenwassergehalt

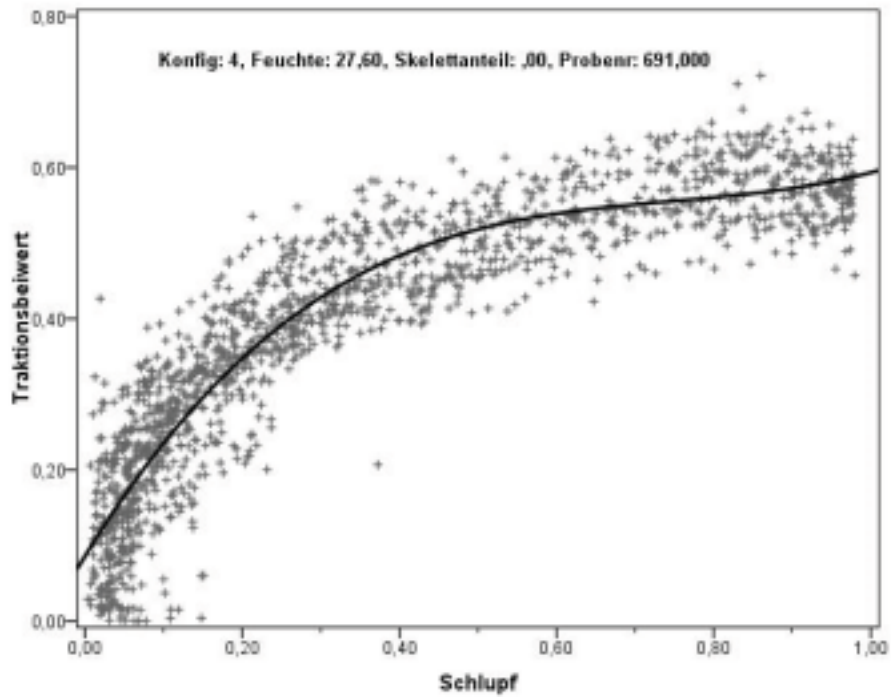


Abbildung V, 29: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 4 bei 27,6 % Bodenwassergehalt

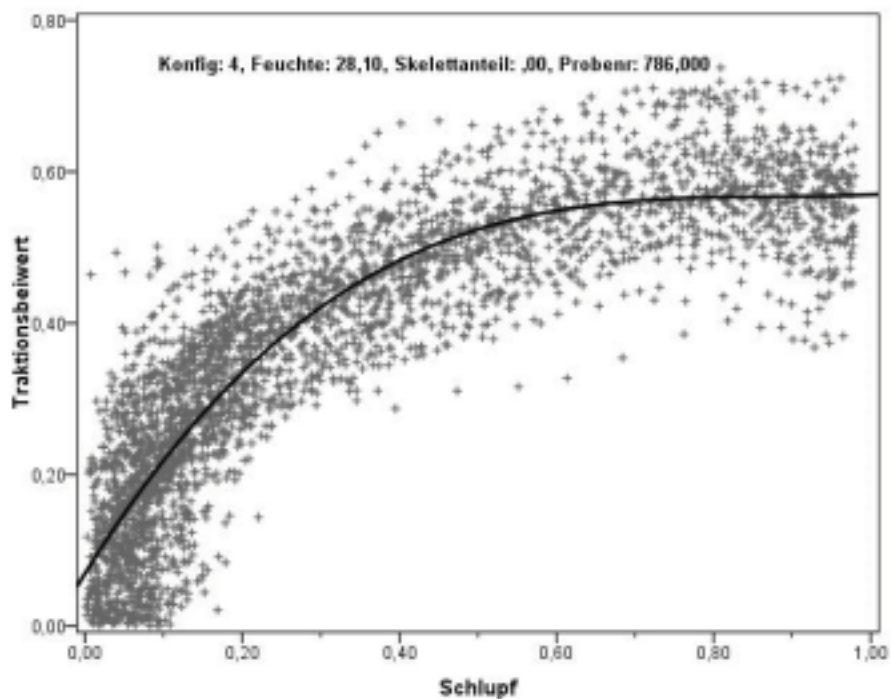


Abbildung V, 30: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 4 bei 28,1 % Bodenwassergehalt

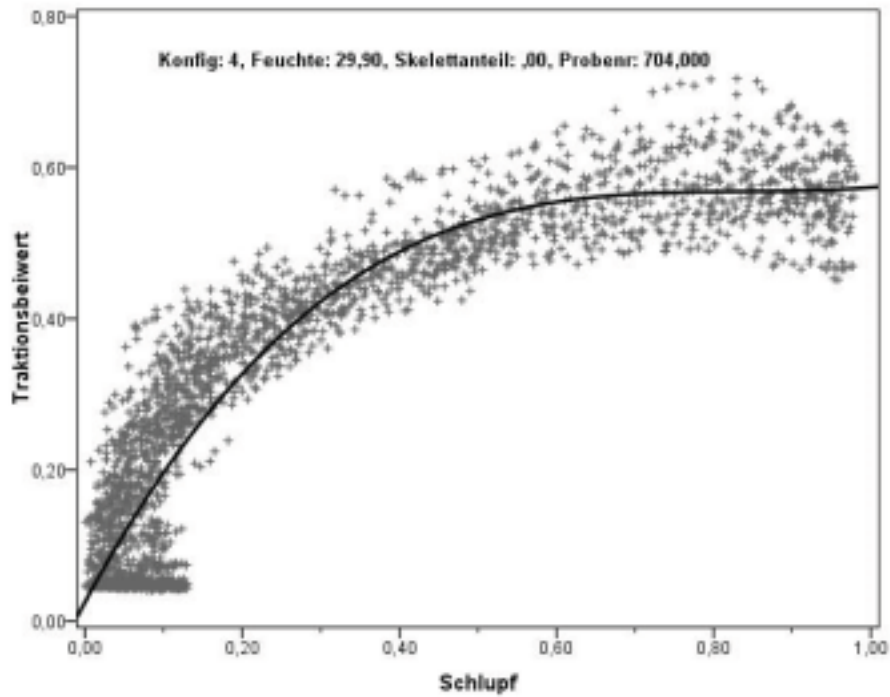


Abbildung V, 31: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 4 bei 29,9 % Bodenwassergehalt

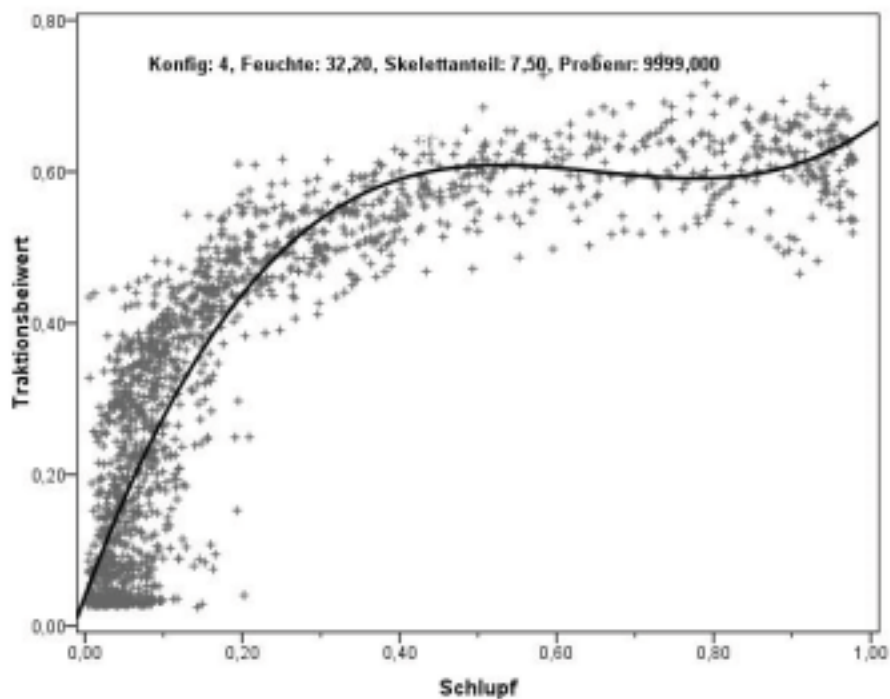


Abbildung V, 32: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 4 bei 32,2 % Bodenwassergehalt

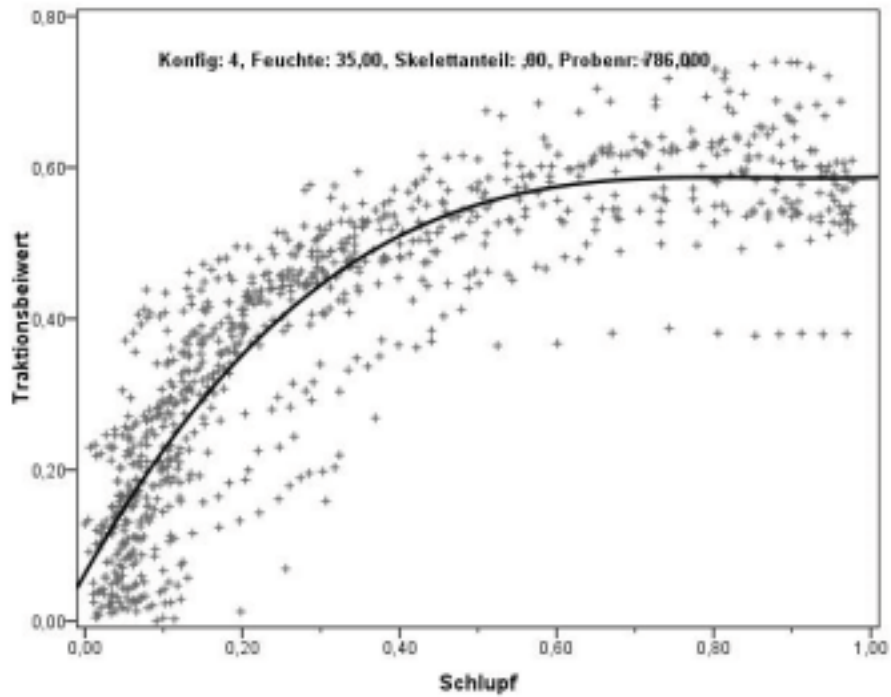


Abbildung V, 33: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 4 bei 35,0 % Bodenwassergehalt

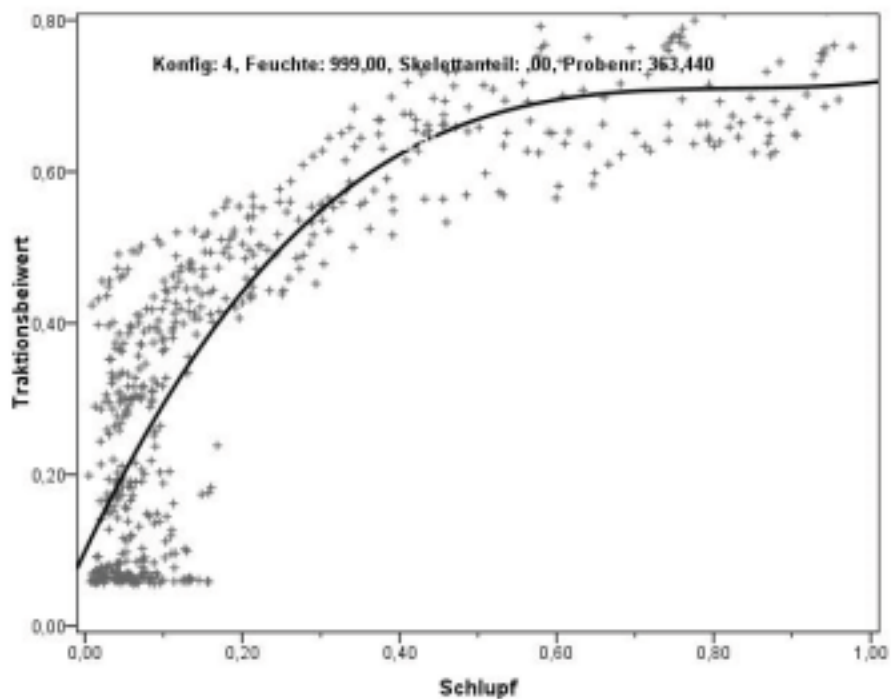


Abbildung V, 34: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 4 bei unbekanntem Bodenwassergehalt

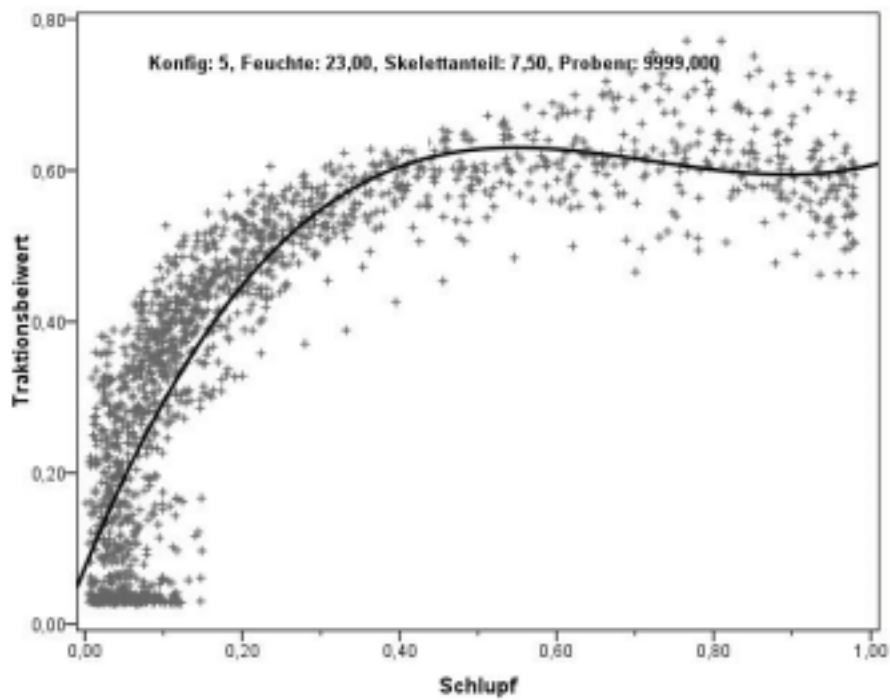


Abbildung V, 35: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 5 bei 23,0 % Bodenwassergehalt

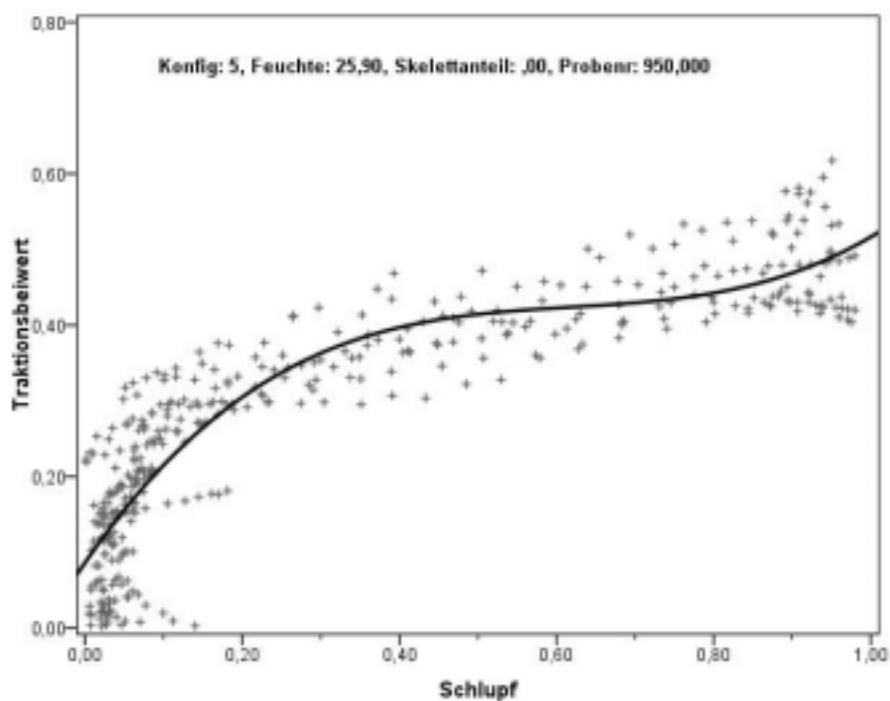


Abbildung V, 36: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 5 bei 25,9 % Bodenwassergehalt

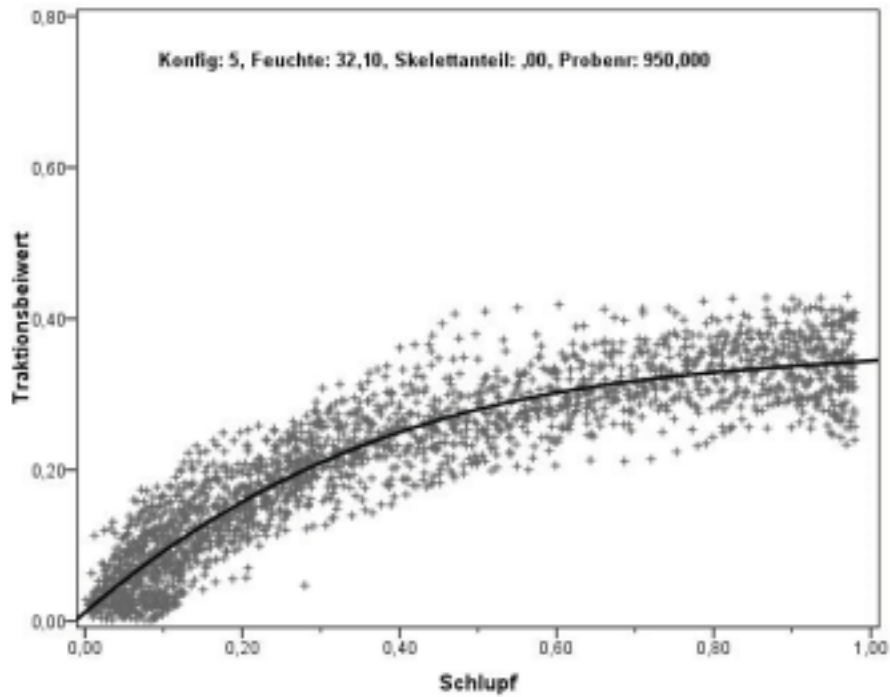


Abbildung V, 37: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 5 bei 32,1 % Bodenwassergehalt

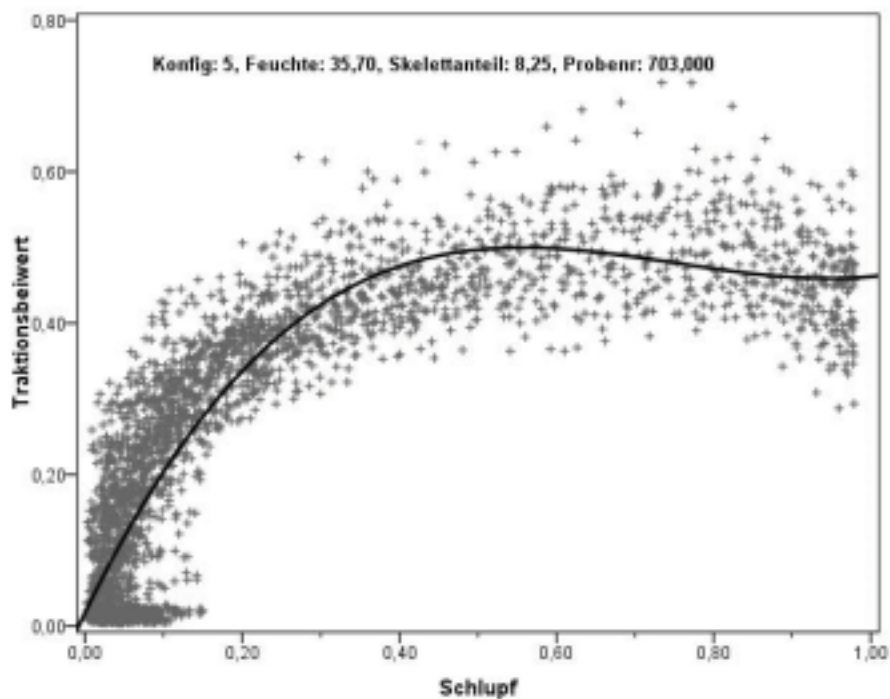


Abbildung V, 38: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 5 bei 35,7 % Bodenwassergehalt

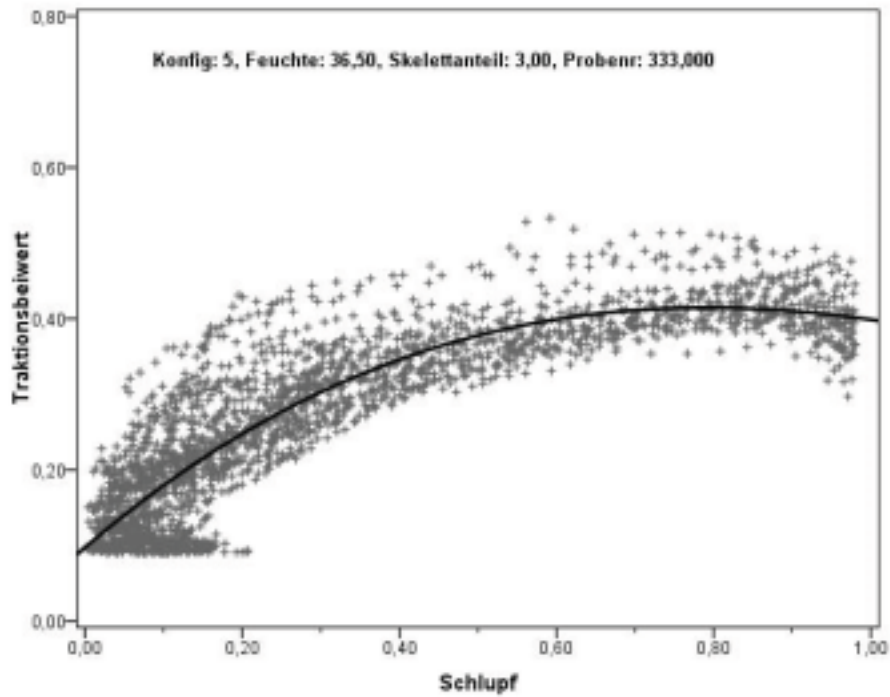


Abbildung V, 39: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 5 bei 36,5 % Bodenwassergehalt

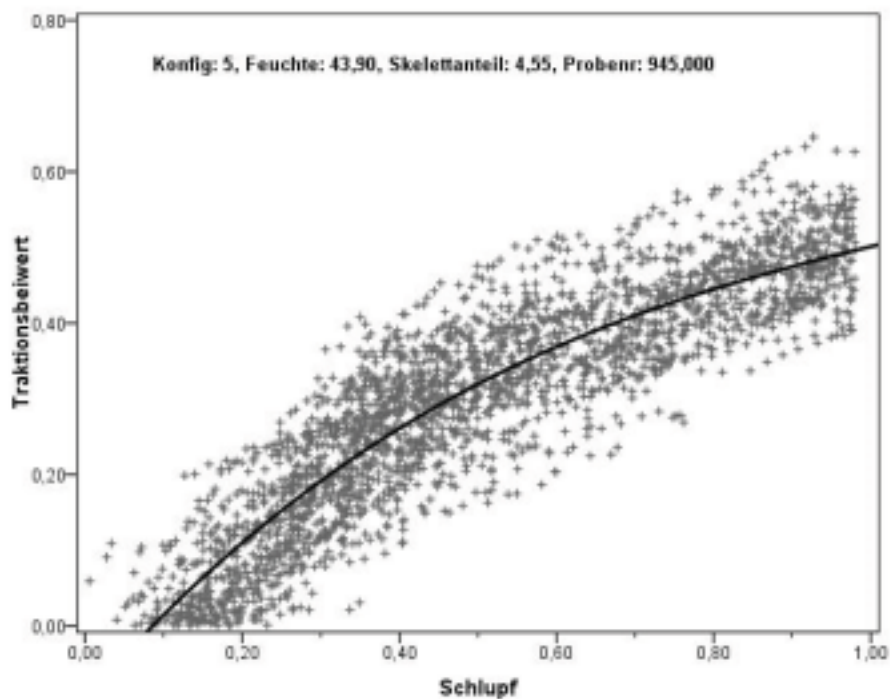


Abbildung V, 40: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 5 bei 43,9 % Bodenwassergehalt

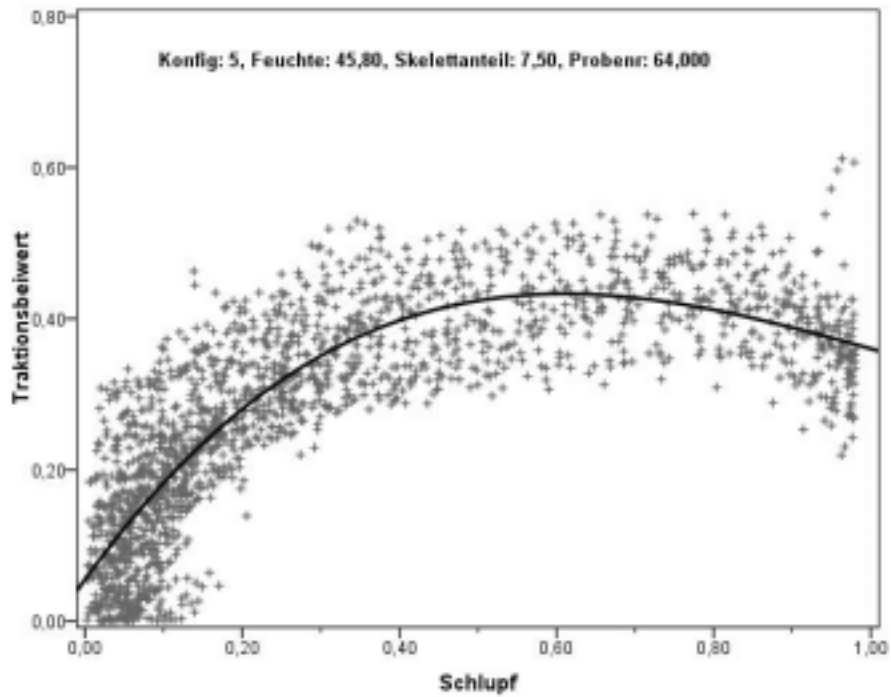


Abbildung V, 41: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 5 bei 45,8 % Bodenwassergehalt

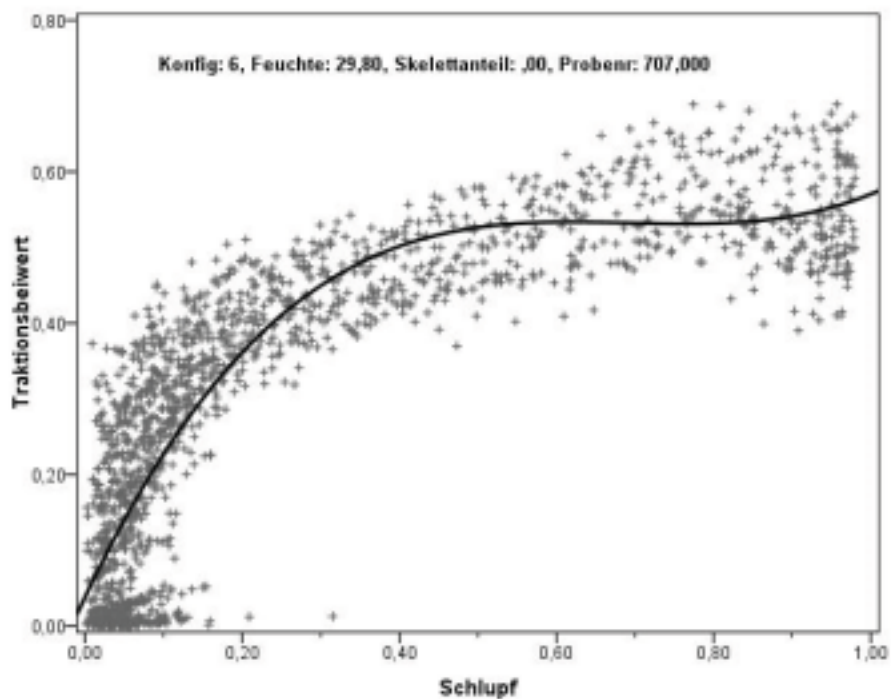


Abbildung V, 42: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 6 bei 29,8 % Bodenwassergehalt

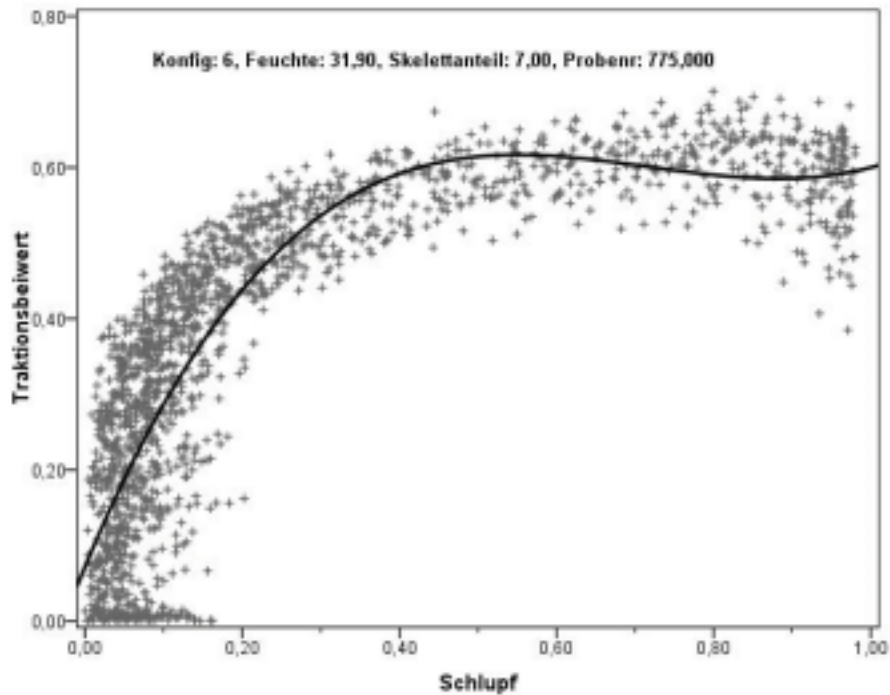


Abbildung V, 43: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 6 bei 31,9 % Bodenwassergehalt

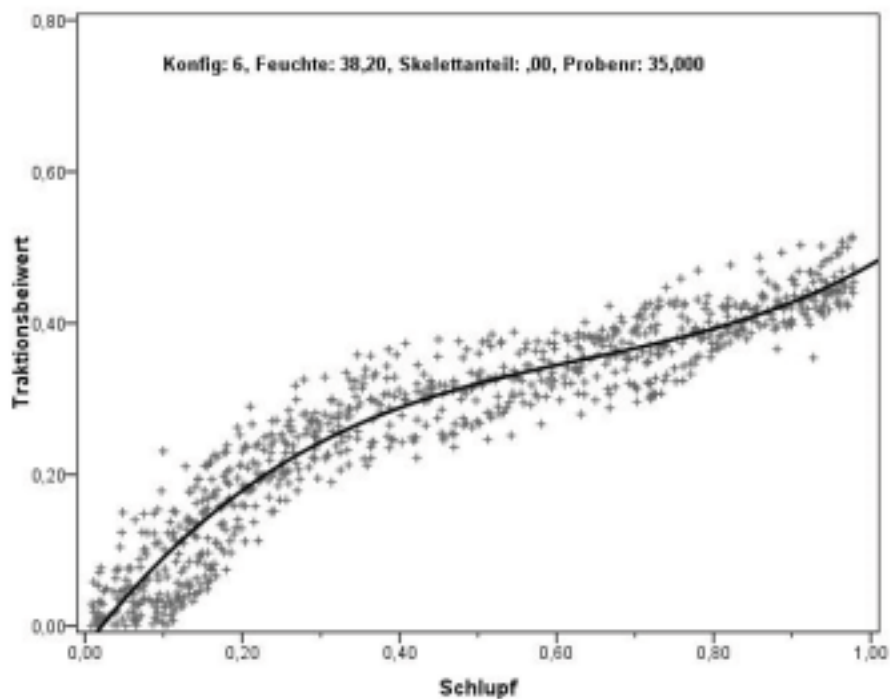


Abbildung V, 44: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 6 bei 38,2 % Bodenwassergehalt

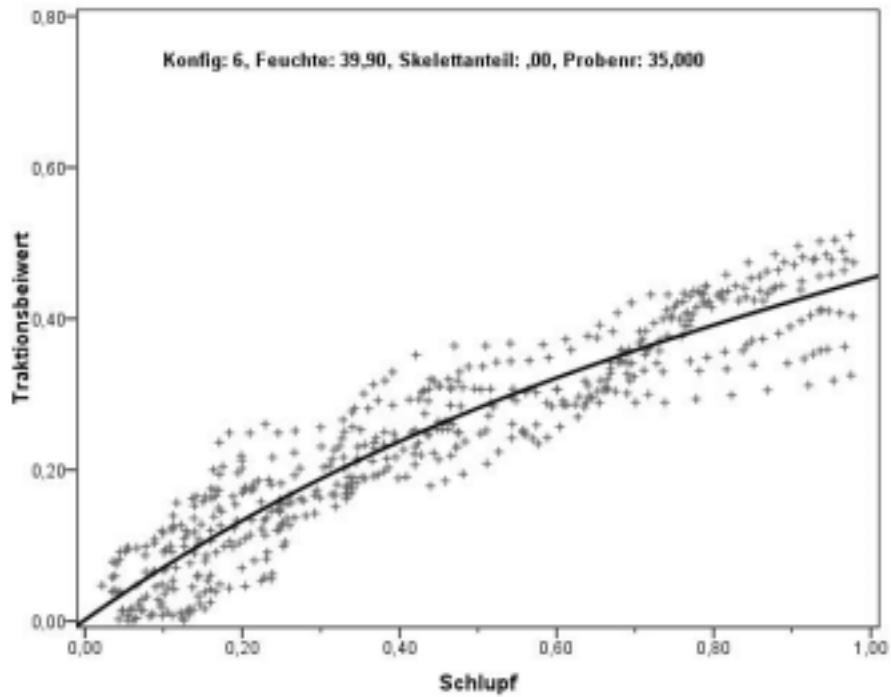


Abbildung V, 45: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 6 bei 39,9 % Bodenwassergehalt

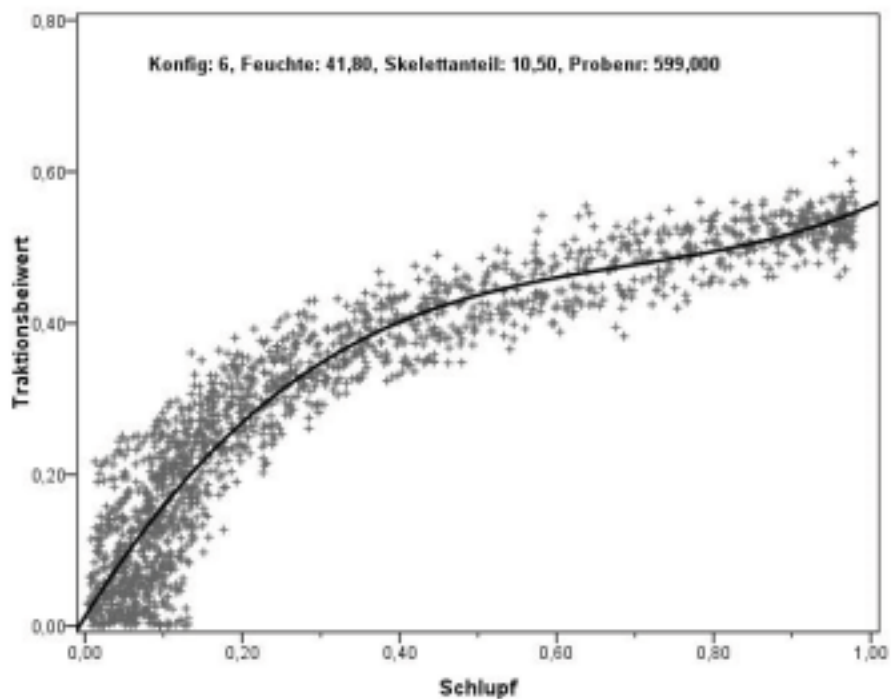


Abbildung V, 46: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 6 bei 41,8 % Bodenwassergehalt

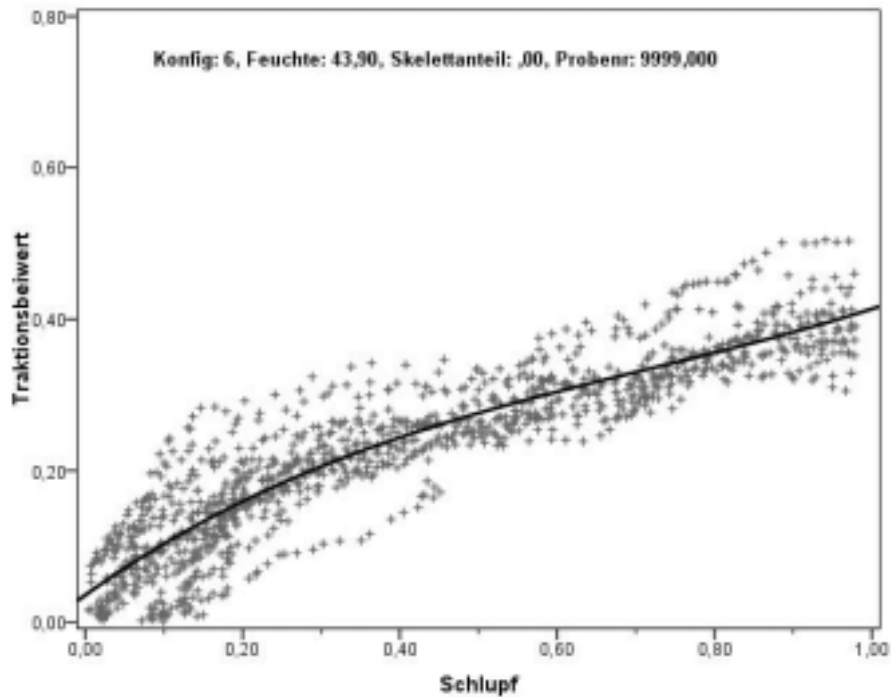


Abbildung V, 47: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 6 bei 43,9 % Bodenwassergehalt

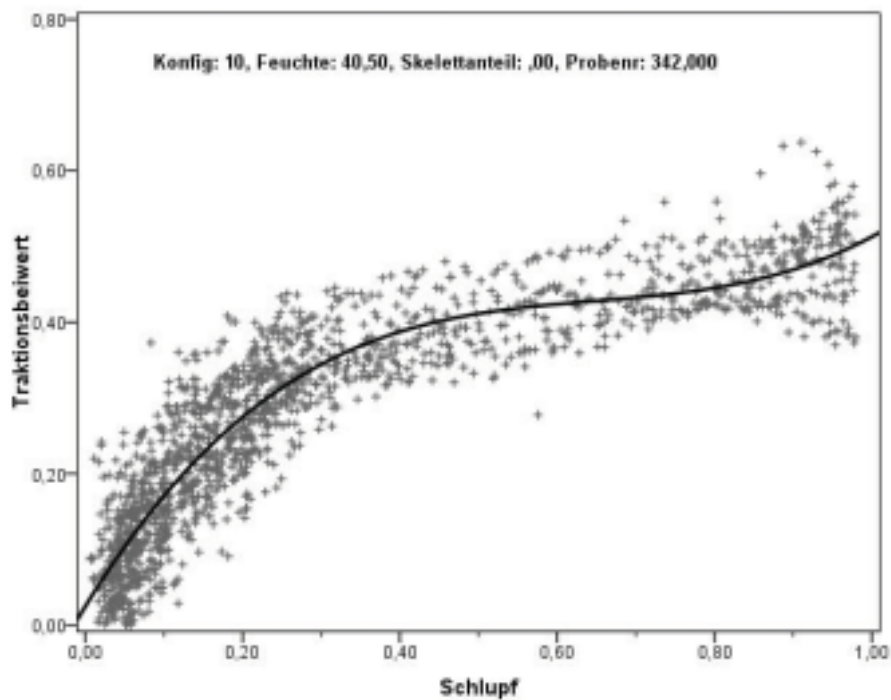


Abbildung V, 48: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 10 bei 40,5 % Bodenwassergehalt

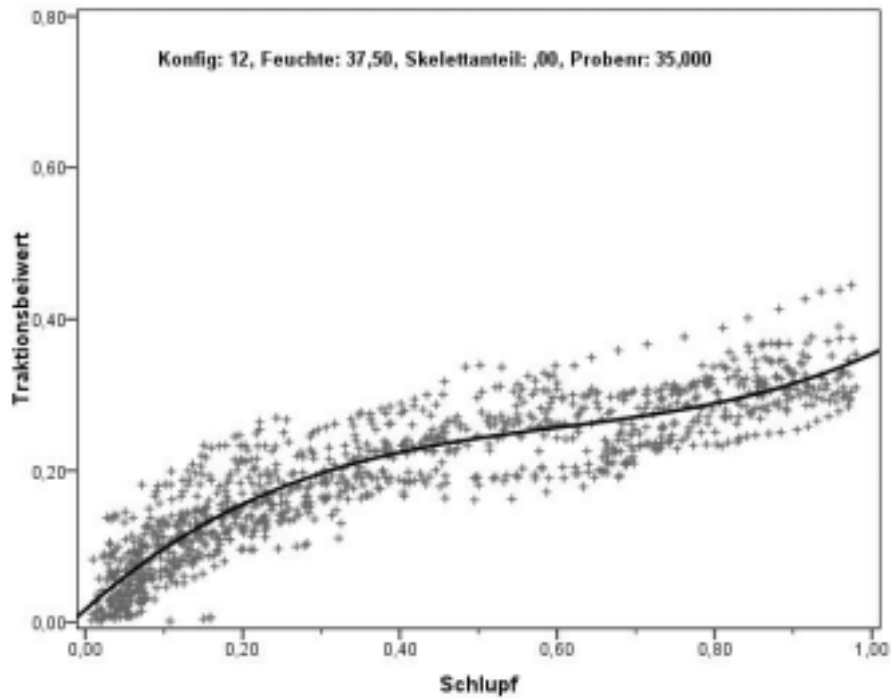


Abbildung V, 49: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 12 bei 37,5 % Bodenwassergehalt

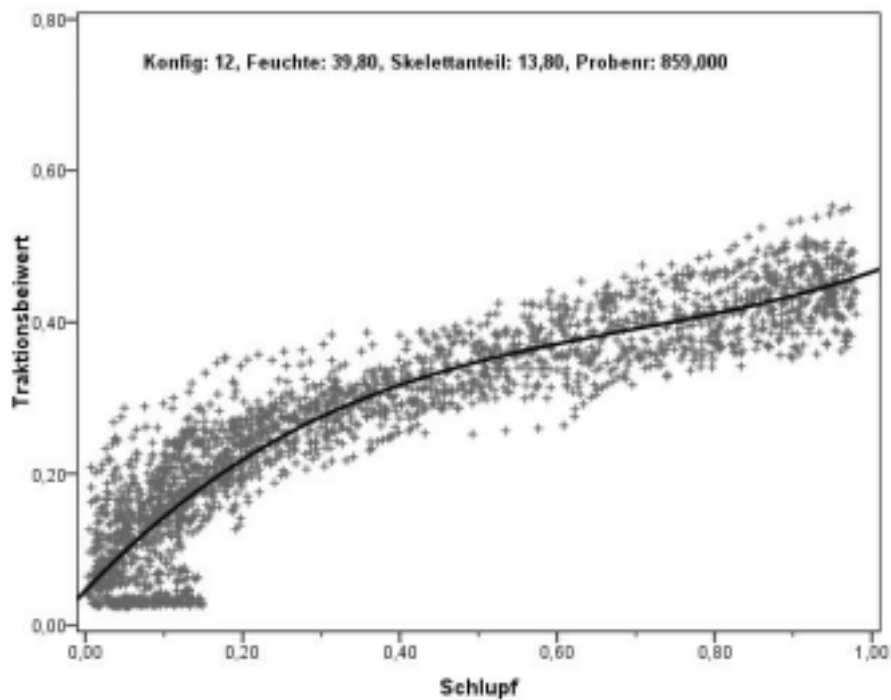


Abbildung V, 50: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 12 bei 39,8 % Bodenwassergehalt

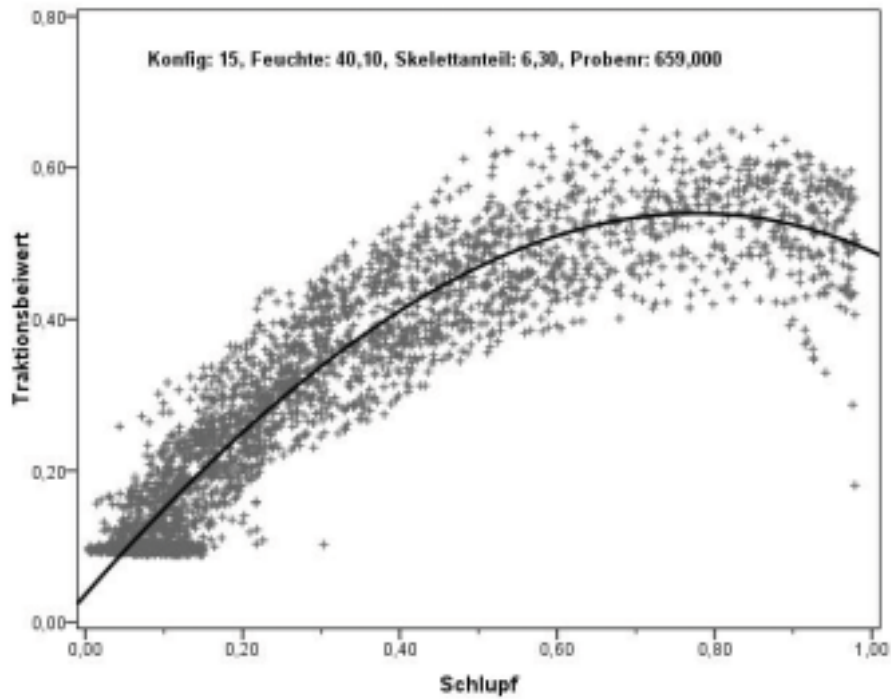


Abbildung V, 51: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 15 bei 40,1 % Bodenwassergehalt

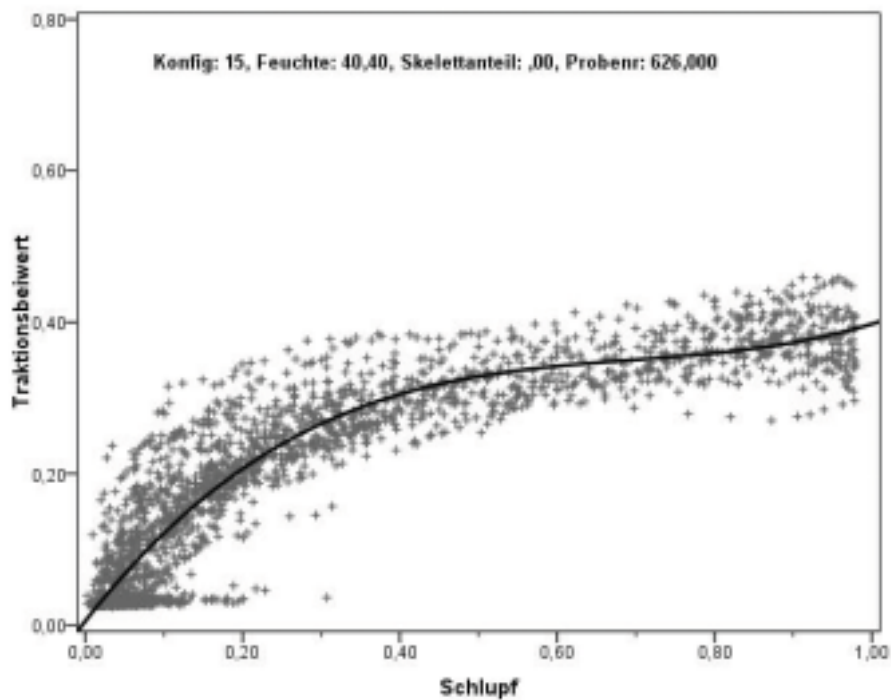


Abbildung V, 52: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 15 bei 40,4 % Bodenwassergehalt

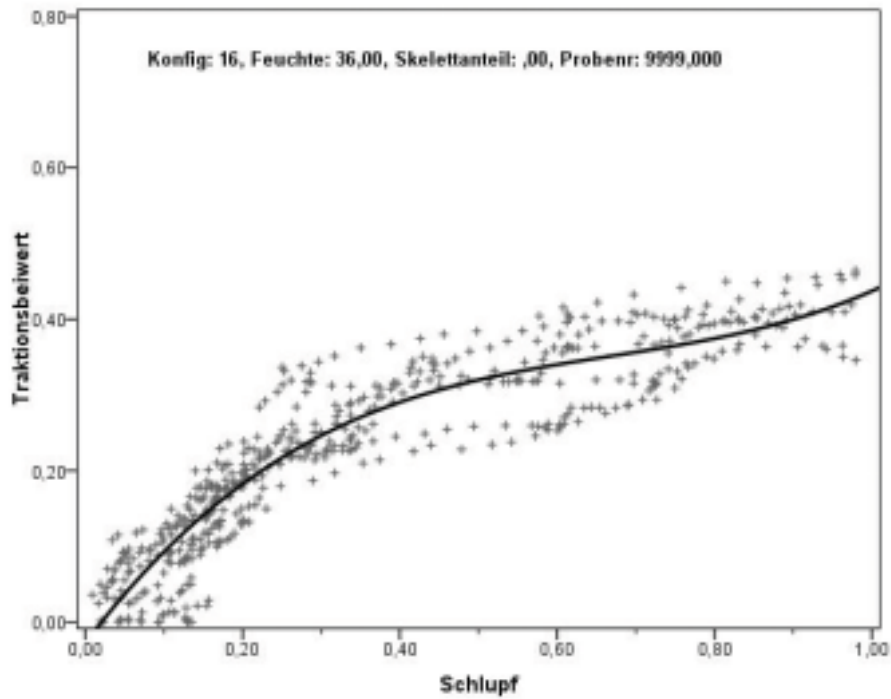


Abbildung V, 53: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 16 bei 36,0 % Bodenwassergehalt

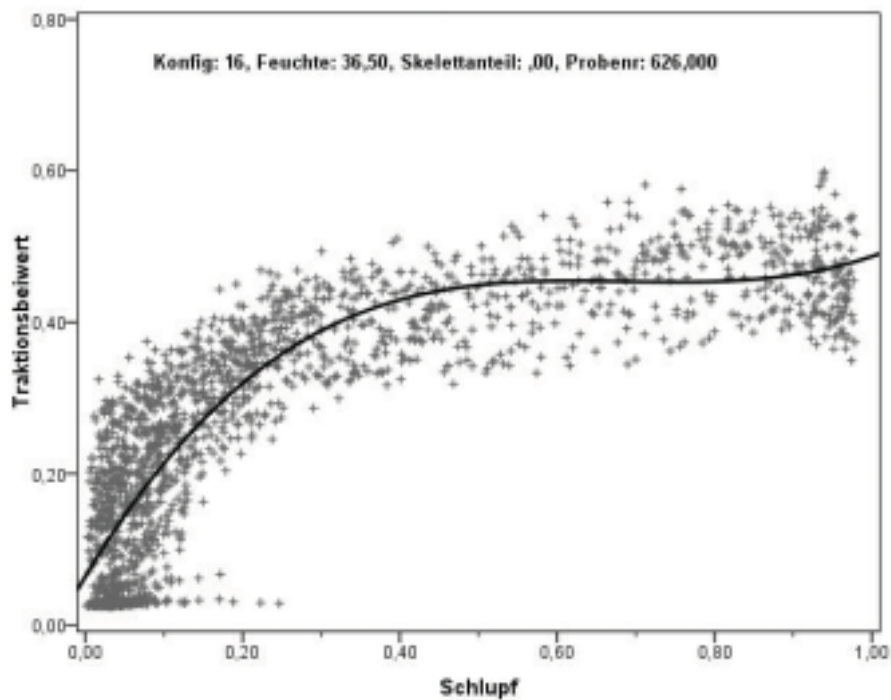


Abbildung V, 54: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 16 bei 36,5 % Bodenwassergehalt

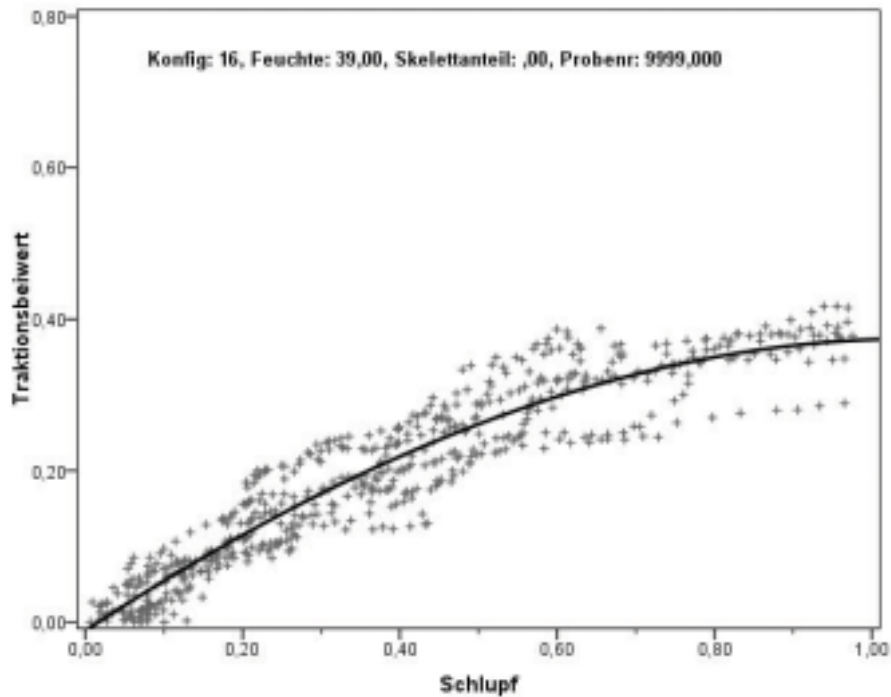


Abbildung V, 55: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 16 bei 39,0 % Bodenwassergehalt

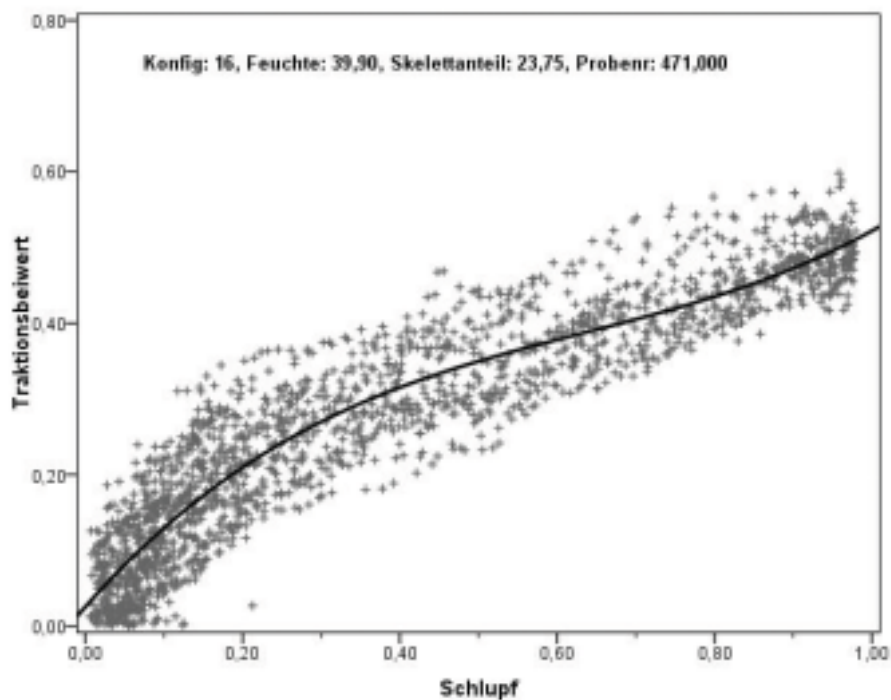


Abbildung V, 56: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 16 bei 39,9 % Bodenwassergehalt

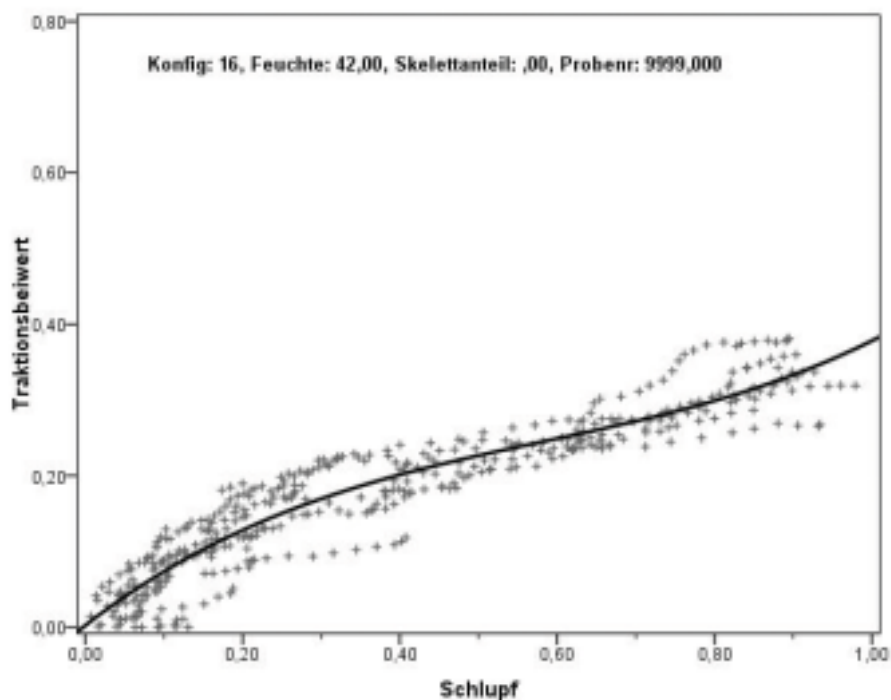


Abbildung V, 57: Punktwolke und kubischer Ausgleich der Traktions-Schlupf-Beziehung für die Konfiguration 16 bei 42,0 % Bodenwassergehalt

Tabelle V, 20: Regressionskoeffizienten des linearen Regressionsmodells zur Bestimmung der bodenökologischen Grenzneigungen mit weiteren Qualitätsmaßen

Variable	nicht standardisierte Koeffizienten		standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall für B	
	B	Standardfehler	Beta			Untergrenze	Obergrenze
(Konstante)	29,753	1,416		21,019	,000	26,905	32,601
Bodenwassergehalt (reduziert um 30 %)	-,831	,123	-,569	-6,726	,000	-1,079	-,582
Skelettgehaltsstufe (0; 1; 2)	6,185	1,115	,451	5,547	,000	3,942	8,428
Bänder (Dummy: 1 = montiert)	7,579	2,663	,285	2,846	,007	2,221	12,936
Ketten (Dummy: 1 = montiert)	6,035	3,283	,177	1,839	,072	-,568	12,639

abhängige Variable: red_25 (befahrbare Neigung bei 25 % Schlupf anhand des reduzierten Datensatzes)

Tabelle V, 21: Regressionskoeffizienten des linearen Regressionsmodells zur Bestimmung der absoluten Grenzneigungen mit weiteren Qualitätsmaßen

Variable	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Signifikanz	95%-Konfidenzintervall für B	
	B	Standardfehler	Beta			Untergrenze	Obergrenze
(Konstante)	47,530	1,180		40,296	,000	45,158	49,903
Bodenwassergehalt (reduziert um 30 %)	-,583	,103	-,435	-5,666	,000	-,790	-,376
Skelettgehaltsstufe (0; 1; 2)	4,766	,929	,378	5,130	,000	2,897	6,635
Bänder (Dummy: 1 = montiert)	9,790	2,219	,400	4,412	,000	5,325	14,254
Ketten (Dummy: 1 = montiert)	9,438	2,735	,302	3,450	,001	3,935	14,941

abhängige Variable: *max_trak* (Neigung berechnet anhand des max. Traktionsbeiwertes der Stufenmittewerte)

Lebenslauf

Persönliche Daten

Jörg Hittenbeck

geboren am 02. Juni 1979
in Bassum (Niedersachsen)
verheiratet, ein Kind

Studium und Ausbildung

- 04/2005 – 08/2009 Georg-August-Universität Göttingen
Abteilung Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie
wissenschaftlicher Mitarbeiter
Thema des Promotionsvorhabens:
Entwicklung eines Grenzneigungsmodells für selbstfahrende Arbeitsma-
schinen in der Forstwirtschaft“
- 10/1999 – 09/2004 Studium der Forstwissenschaften und Waldökologie
Abschluss: Master of Science
Thema der Masterarbeit:
„Zugkraft- und Schlupfmessung an einem Forwarder“
- 09/2002 Bachelor of Forest Science
Thema der Bachelorarbeit:
„Hydrodynamische Antriebskomponenten in Forstschleppern und aktuel-
le Alternativen“
- 09/1991 – 07/1998 Gymnasium Syke
Abschluss Abitur

Zivildienst

- 07/1998 – 08/1999 Delme Werkstätten für Behinderte gGmbH in Weyhe
Behindertenbetreuung im „Garten-Landschaftsbau“ sowie im „Verpa-
ckungsbereich“

