

**Dirk Drewes**

---

# **Zum Einsatz von Pferden beim Umbau von Waldbeständen**

- Eine arbeitswissenschaftliche Schwerpunktstudie an der Voraussaat  
von Bucheckern zur Umwandlung von Fichtenreinbeständen -

---



**Cuvillier Verlag Göttingen**

## **Zum Einsatz von Pferden beim Umbau von Waldbeständen**

– Eine arbeitswissenschaftliche Schwerpunktstudie an der Voraussaat von  
Bucheckern zur Umwandlung von Fichtenreinbeständen –

Dissertation

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

vorgelegt von Dirk Drewes  
geboren in Bremen-Vegesack

Göttingen, im März 2006

## **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

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

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2006  
Zugl.: Göttingen, Univ., Diss., 2006  
ISBN 3-86537-941-9

D7

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Heribert Jacke  
2. Berichterstatter: Prof. Dr. Burghard von Lüpke  
  
Tag der mündlichen Prüfung: 10. Mai 2006

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2006  
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen  
Telefon: 0551-54724-0  
Telefax: 0551-54724-21  
[www.cuvillier.de](http://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, 2006  
Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-86537-941-9

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie der Georg-August-Universität Göttingen im Rahmen eines Forschungsprojektes, das in der Zeit von 2000–2003 durch die Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert wurde. Die erforderlichen Versuchsbestände der Buchensaat wurden freundlicherweise von der Landesforstverwaltung Nordrhein-Westfalen zur Verfügung gestellt. Das Forschungsvorhaben wurde unter anderem vom Direktor des Instituts, Herrn Prof. Dr. Heribert Jacke, initiiert und mir als Dissertationsthema zur Verfügung gestellt. Ich danke Herrn Prof. Dr. Heribert Jacke für seine wissenschaftliche Betreuung, seine kontinuierliche Unterstützung und den konstruktiven Diskussionen, die entscheidend zum Gelingen der Arbeit beitrugen. Herrn Prof. Dr. Burghard von Lüpke bin ich für die Übernahme des Koreferats zu Dank verpflichtet.

Mein ausgesprochener Dank für die freundliche Zusammenarbeit und die große Unterstützung gilt allen Mitarbeitern des Instituts. Sie haben für ein sehr angenehmes Arbeitsklima gesorgt, in dem ich mich immer wohl gefühlt habe. Bei den zum Teil unter widrigen Außenbedingungen durchgeführten, umfangreichen Datenerhebungen in den Versuchsflächen, bin ich vor allem Christhilde Bobbert, Jutta Bielefeld, Hartwig Bohlken, Ekkehard Hausknecht sowie Thomas Busse für ihre unermüdliche Unterstützung sehr dankbar. Ebenso gebührt mein Dank Axel Quentin, der mir im Zuge der Datenaufbereitung der vielfältigen Messdaten tatkräftig zur Seite stand. Im Rahmen der Vorbereitung und Durchführung der Feldversuche danke ich den Forstbeamten der nordrhein-westfälischen Versuchsforstämtern Bad Driburg und Paderborn, die die Untersuchungen stets unterstützten. Herrn Erhard Schroll bin ich für die fachmännische Durchführung der Pferdearbeit sowie für seine offenen und anregenden Diskussionen sehr dankbar. An dieser Stelle seien Dr. Bettina Schäfer und Dr. Eva Moors vom Institut für Tierzucht und Haustiergenetik (Georg-August-Universität Göttingen) genannt, denen ich für ihre verlässlichen Beistand bei den tierphysiologischen Untersuchungen der Pferde ebenfalls sehr verbunden bin.

Ich möchte auch nicht versäumen, all denjenigen meinen Dank auszusprechen, die mir bei fachlichen Fragen außerhalb des Instituts zu jeder Zeit zur Seite standen. Hier sind vor allem Dr. Dominik Hessenmöller, Felix Mader und ganz besonders Marco Hille erwähnt. Ebenfalls zu Dank verpflichtet bin ich denen, die bei Durchsicht des Manuskriptes ihre Freizeit für mich geopfert haben. Hier sind der unermüdliche Einsatz von Sylvia Weber und Thies Eggers mit ihrem ausdauerndem detektivischen Gespür hervorzuheben. Meiner Freundin Nina Weißmann sowie meinem privaten Umfeld gebührt mein Dank für Ihre Geduld und Rücksichtnahme sowie der Freistellung einiger Abende und Wochenenden.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern und meiner Schwester, die mich uneingeschränkt in dem von mir eingeschlagenen Weg unterstützt haben. Ihnen widme ich diese Arbeit.

Göttingen, im März 2006

Dirk Drewes



# Inhaltsverzeichnis

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>VI</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>XI</b>
<b>1 ARBEITSVERFAHREN ZUR VORAUSSAAT VON ROTBUCHEN .....</b>	<b>1</b>
1.1 WALDUMBAU IM WANDEL FORSTLICHER ZIELSYSTEME.....	1
1.2 AKTUELLE WALDUMBAU-PRAXIS .....	2
1.3 BUCHECKERN-VORAUSSAAT .....	5
1.4 VERFAHRENSTECHNOLOGISCHE ASPEKTE DER BESTANDSBEGRÜNDUNG.....	6
1.5 EINSATZ VON ZUGPFERDEN IN DER WALDARBEIT .....	7
<b>2 ZIELSETZUNG.....</b>	<b>10</b>
<b>3 UNTERSUCHUNGSGEGENSTAND .....</b>	<b>12</b>
3.1 ARBEITSSYSTEM.....	12
3.2 ARBEITSAUFGABEN .....	12
3.3 BETRIEBSMITTEL .....	13
3.3.1 Streifenpflüge.....	13
3.3.1.1 <i>Eberswalder Streifenpflug</i> .....	13
3.3.1.2 <i>Meinberg Wundstreifenpflug</i> .....	14
3.3.2 Saataggregate .....	15
3.3.2.1 <i>EggeSaat</i> .....	15
3.3.2.2 <i>ÖkoSat/U</i> .....	16
3.3.2.3 <i>Weilmünster Waldgrubber mit Säeinheit</i> .....	17
3.4 ARBEITSBEDINGUNGEN .....	18
3.4.1 Auswahlkriterien der Versuchsbestände.....	18
3.4.2 Der Wuchsbezirk <i>Egge</i> .....	19
3.4.2.1 Klimatische Rahmenbedingungen .....	19
3.4.2.2 Geologie und Boden .....	20
3.4.3 Versuchsbestände.....	20
3.4.3.1 Versuchsbestand I (FoA Bad Driburg) .....	20
3.4.3.2 Versuchsbestand II (FoA Paderborn).....	21
3.4.4 Zaunbau.....	23
3.4.5 Saatgut.....	23
3.5 PFERDEFÜHRER .....	23
3.6 ZUGPFERDE.....	24

<b>4 VERSUCHSABLAUF</b> .....	<b>25</b>
4.1 KOOPERATIONEN IM STUDIENDESIGN.....	25
4.2 VORSTUDIE.....	25
4.3 HAUPTSTUDIE.....	26
4.4 STUDIE ZUR BODENSTRUKTURVERÄNDERUNG.....	27
<b>5 METHODIK</b> .....	<b>28</b>
5.1 ERHEBUNGSKONZEPT.....	28
5.2 ARBEITSABLAUFSTUDIEN.....	28
5.2.1 Ausrichtung der Arbeitszeitstudien.....	28
5.2.2 Arbeitszyklen.....	29
5.2.3 Arbeitsablaufabschnitte und Messpunkte.....	32
5.2.4 Arbeitszeitstudientechnik.....	33
5.3 QUALITÄT DER ARBEITSAUSFÜHRUNGEN.....	34
5.3.1 Bearbeitung der Saatstreifen.....	34
5.3.2 Auflauf der Buchensaat.....	35
5.3.3 Mechanische Verletzungen am Fichtenbestand.....	36
5.3.4 Strukturänderung des Waldbodens.....	36
5.3.4.1 Bodenverdichtung.....	36
5.3.4.2 Belastung des Waldbodens.....	37
5.3.4.3 Erfassung der Luftpermeabilität.....	39
5.4 HUMANPHYSIOLOGISCHE MESSUNGEN.....	41
5.4.1 Belastungssituation.....	41
5.4.2 Herzfrequenz.....	42
5.4.2.1 Herzfrequenzen beim arbeitenden Menschen.....	42
5.4.2.2 Erfassung der Herzfrequenz.....	42
5.5 TIERPHYSIOLOGISCHE MESSUNG.....	43
5.5.1 Zugkraft.....	43
5.5.1.1 Zugkraft von Pferden.....	43
5.5.1.2 Erfassung der Zugkraft.....	45
5.5.2 Herzschlagfrequenz.....	45
5.5.2.1 Herzschlagfrequenz bei Pferden.....	45
5.5.2.2 Erfassung der Herzschlagfrequenz.....	46
5.5.3 Blutlaktat.....	47
5.5.3.1 Der biochemische Parameter Laktat.....	47
5.5.3.2 Blutentnahme und Laktatbestimmung.....	48
5.6 STATISTISCHE DATENANALYSE.....	48

<b>6</b>	<b>ERGEBNISSE</b>	<b>50</b>
6.1	ARBEITSABLAUFSTUDIEN	50
6.1.1	Zeitverbrauch der streifenweisen Bearbeitungsvariante	50
6.1.1.1	Datenbasis	50
6.1.1.2	Zusammensetzung des Zeitverbrauchs	51
6.1.1.3	Vergleichende Gegenüberstellung der Arbeitsverfahren	56
6.1.1.4	Identifizierung produktivitätsrelevanter Faktoren	59
6.1.1.4.1	Clusterung der Verteil-Aktivitäten	59
6.1.1.4.2	Kreuztabellarischer Vergleich der Arbeitsverfahren	60
6.1.1.4.3	Regressionsanalytische Bewertung einzelner Verfahren	60
6.1.2	Zeitverbrauch der praxisnahen Bearbeitungsvariante	64
6.1.2.1	Datenbasis	64
6.1.2.2	Bodenverwundungsverfahren	65
6.1.2.3	Saatverfahren	66
6.2	ÖKONOMISCHE BEWERTUNG DER ARBEITSVERFAHREN	67
6.2.1	Datenbasis	67
6.2.2	Regressionsmodell zur Erklärung des Zeitverbrauchs	68
6.2.2.1	Überprüfung und Auswahl möglicher Regressoren	68
6.2.2.2	Regressionsmodelle der Bodenverwundungsverfahren	71
6.2.2.3	Regressionsmodelle der Saatverfahren	74
6.2.3	Herleitung der Planzeiten	76
6.2.3.1	Datenbasis	76
6.2.3.2	Bodenverwundungsverfahren	77
6.2.3.3	Saatverfahren	78
6.2.4	Kalkulation der Verfahrenskosten	80
6.2.4.1	Kosten der Pferdeinsatzstunde	80
6.2.4.2	Kosten der Gerätearbeitsstunde	81
6.2.4.3	Kosten der plätzeweisen Handsaat	84
6.2.4.4	Preis für Rotbuchen-Saatgut	85
6.2.5	Gesamtkosten der Arbeitsverfahren	85
6.2.5.1	Bodenverwundungsverfahren	85
6.2.5.2	Saatverfahren	86
6.2.5.3	Alternativverfahren – Manuelle Plätzesaat	89
6.2.5.4	Vergleich der Systemkosten	90

6.3 QUALITÄT DER ARBEITSAUSFÜHRUNGEN .....	91
6.3.1 Bearbeitung der Saatstreifen .....	91
6.3.1.1 Datenbasis.....	91
6.3.1.2 Bodenverwundungsverfahren.....	92
6.3.1.3 Saatverfahren.....	94
6.3.2 Auflauf der Buchensaat .....	98
6.3.2.1 Datenbasis.....	98
6.3.2.2 Vollaufnahme im Herbst 2001.....	99
6.3.2.3 Stichprobenaufnahme im Sommer 2002.....	101
6.3.2.4 Ökonomische Bewertung des Keimerfolges.....	106
6.3.3 Mechanische Verletzungen am Fichtenbestand .....	107
6.3.3.1 Datenbasis.....	107
6.3.3.2 Verletzungen des oberirdischen Holzkörpers .....	108
6.3.3.3 Verletzungen des Wurzelwerks .....	110
6.3.4 Veränderungen der Bodenstruktur.....	112
6.3.4.1 Datenbasis.....	112
6.3.4.2 Luftpermeabilität der Bodenproben.....	113
6.3.4.3 Vergleich der Luftpermeabilität zwischen den Zugmittelvarianten..	114
6.4 HUMANPHYSIOLOGISCHE MESSUNGEN .....	115
6.4.1 Herzschlagfrequenz des Pferdeführers .....	115
6.4.1.1 Datenbasis.....	115
6.4.1.2 Absolute Herzschlagfrequenzen.....	116
6.4.2 Dauerleistungsgrenze .....	119
6.5 TIERPHYSIOLOGISCHE MESSUNGEN.....	121
6.5.1 Zugkraft zwischen Pferd und Betriebsmittel.....	121
6.5.1.1 Datenbasis.....	121
6.5.1.2 Zugkräfte bei der Bearbeitung von geraden Strecken.....	121
6.5.1.3 Zugkräfte bei der praxisnahen Bearbeitung .....	124
6.5.2 Herzschlagfrequenz der Zugpferde.....	126
6.5.2.1 Datenbasis.....	126
6.5.2.2 Individuelle Herzschlagfrequenzen der Versuchspferde .....	127
6.5.2.3 Herzschlagfrequenzen innerhalb der Arbeitsverfahren.....	130
6.5.3 Blutlaktat .....	134
6.5.3.1 Datenbasis.....	134
6.5.3.2 Laktatkonzentrationen .....	135

<b>7 DISKUSSION .....</b>	<b>136</b>
7.1 METHODENDISKUSSION.....	136
7.2 ERGEBNISDISKUSSION.....	139
7.2.1 Technische Aspekte der Verfahrensbewertung .....	139
7.2.2 Ökonomische Aspekte der Verfahrensbewertung.....	143
7.2.3 Ökologische Aspekte der Verfahrensbewertung.....	145
7.2.4 Ergonomische Aspekte der Verfahrensbewertung .....	150
<b>8 ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>153</b>
<b>9 LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>157</b>
<b>10 ANHANG .....</b>	<b>168</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: <i>Eberswalder Streifenpflug</i> für den Pferdezug	13
Abbildung 2: <i>Meinberg Wundstreifenpflug</i> für den Pferdezug	14
Abbildung 3: <i>EggeSaat</i> als Anhängesaggregat für den <i>Meinberg Wundstreifenpflug</i>	15
Abbildung 4: <i>ÖkoSat/U</i> in Kombination mit einem Rückewagen	16
Abbildung 5: <i>Weilmünster Waldgrubber</i> mit aufgebautem Saataggregat, die drei nicht für die Saat zu verwendenden Grupperzinken wurden demontiert	17
Abbildung 6: Schematische Darstellung eines Zyklus bei praxisnaher Bearbeitung einer Teilfläche	30
Abbildung 7: Zyklusfolge bei der streifenweisen Bearbeitung einer Teilfläche	31
Abbildung 8: Der konstruierte Luftpermeameter im Gelände	39
Abbildung 9: Darstellung der am Pferd und am pferdegezogenen Bodenverwundungsaggregat wirkenden Kräfte;	44
Abbildung 10: Mittlerer Zeitverbrauch je Zyklus mit Aufschlüsselung nach Tätigkeitsgruppen (PT = Primärtätigkeit, ST = Sekundärtätigkeit) für die Bodenverwundungsverfahren in beiden Bestandsvarianten	52
Abbildung 11: Mittlerer Zeitverbrauch je Zyklus mit Aufschlüsselung nach Tätigkeitsgruppen (PT = Primärtätigkeit, ST = Sekundärtätigkeit) für die Saatverfahren in beiden Bestandsvarianten	54
Abbildung 12: Scatterplot des möglichen Regressors <i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i> versus der Zielgröße <i>RAZ/m</i> getrennt nach Bestandsvarianten	68
Abbildung 13: Scatterplot des möglichen Regressors <i>Hangneigung</i> versus der Zielgröße <i>RAZ/m</i> getrennt nach Bestandsvarianten	69
Abbildung 14: Scatterplot des möglichen Regressors <i>Stammzahl</i> versus der Zielgröße <i>RAZ/m</i> getrennt nach Bestandsvarianten	70
Abbildung 15: Scatterplot der möglichen Regressoren <i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i> versus <i>Hangneigung</i>	71
Abbildung 16: Verfahrenskosten je Teilfläche (0,1 ha) für die Bucheckern-Vorssaat mit den untersuchten Arbeitsverfahren in beiden Bestandsvarianten sowie für ein alternativ kalkuliertes Handsaatverfahren (gestrichelte Linie)	90
Abbildung 17: Mittelwert inklusive Standardabweichung des Kriteriums <i>Eckernabstand</i> für die untersuchten Saatverfahren in beiden Bestandsvarianten	97
Abbildung 18: Relative Häufigkeit zur klassierten Eckern-Abdeckung der Saatverfahren in beiden Bestandsvarianten	98

Abbildung 19: Ausfallprozent der Buchenkeimlinge nach dem ersten Winter (2001/2002) in Abhängigkeit des untersuchten Arbeitsverfahrens und der Bestandsvariante auf Basis der Stichprobenaufnahme (SP = 80)	102
Abbildung 20: Arithmetischer Mittelwert der Abstände der erfassten Buchenpflanzen in den Saatrillen in Abhängigkeit des Arbeitsverfahrens und der Bestandsvariante im ersten Aufnahmejahr 2001	103
Abbildung 21: Arithmetischer Mittelwert der Abstände der erfassten Buchenpflanzen in den Saatrillen bei der zweiten Aufnahme (2002)	104
Abbildung 22: Mittlere Kosten für die Begründung eines Buchenkeimlings im ersten Jahr der Saat (2001) in Abhängigkeit von den untersuchten Arbeitsverfahren und Bestandsvarianten	106
Abbildung 23: Verteilung der mechanischen Verletzungen an Fichten auf die vier ausgewiesenen Wundgrößenklassen in Abhängigkeit vom Arbeitsverfahren	109
Abbildung 24: Relative Häufigkeit der Stichprobenpunkte mit einer Wurzelverletzung der Klasse 1 in Abhängigkeit vom Arbeitsverfahren	111
Abbildung 25: Relative Häufigkeit der Stichprobenpunkte mit dem Nachweis einer Wurzelverletzung der Klassen 2 und 3	112
Abbildung 26: Ki-Werte im mineralischen Oberboden (0–6 cm) in Abhängigkeit der untersuchten Zugmittelvarianten. Verschiedene Kleinbuchstaben oberhalb der Whisker kennzeichnen signifikante Unterschiede ( $\alpha = 0,05$ ) der zentralen Tendenz auf Basis des Kruskal-Wallis-H-Tests	115
Abbildung 27: Mittelwert der Herzschlagfrequenz des Probanden in Abhängigkeit vom Arbeitsverfahren und der Bestandsvariante sowie die individuelle Dauerleistungsgrenze (DLG, gestrichelte Linie)	120
Abbildung 28: Verlauf der individuellen Herzschlagfrequenz der Versuchspferde P1 und P2 bei der Bearbeitung von drei Teilflächen der ersten Bestandsvariante im Arbeitsverfahren <i>ÖkoSat/U</i> sowie entsprechende Arbeitsunterbrechungen zwischen den Teilflächen (Schraffur)	128
Abbildung 29: Differenz der Herzschlagfrequenz zwischen den Versuchspferden bei der praxisnahen Bearbeitung im Arbeitsverfahren <i>ÖkoSat/U</i> in beiden Bestandsvarianten	129
Abbildung 30: Entwicklung der Minuten-Mittelwerte sowie die jeweilige Standardabweichung der Herzschlagfrequenz des Pferdes P1 bei der Rillensaat während der praxisnahen Bearbeitungsvariante mit den untersuchten Arbeitsverfahren im Bestand I	132
Abbildung 31: Box-Plots der mittleren Herzschlagfrequenz direkt vor, während, direkt nach und 3 bzw. 5 Minuten nach der Belastung für die Saatverfahren bei praxisnaher Bearbeitung in beiden Bestandsvarianten	133

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kriterien der Bestandsauswahl für die Versuchsdurchführung	18
Tabelle 2: Jahresmittelwerte der Lufttemperatur und Niederschlagsmengen der Klimastation Bad Driburg für den Zeitraum 1960–1990 und die Jahre 2000 bis 2004 (Quelle: POLLMANN, 2005)	19
Tabelle 3: Arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung der Parameter zur Charakteristik der Teilflächen (0,1 ha) im Versuchsbestand I (FoA Bad Driburg)	21
Tabelle 4: Arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung der Parameter zur Charakteristik der Teilflächen (0,1 ha) im Versuchsbestand II (FoA Paderborn)	22
Tabelle 5: Angaben zu den eingesetzten Kaltblutpferden von 2001	24
Tabelle 6: Ablaufplan der durchgeführten Außenversuche	27
Tabelle 7: Übersicht der Untergliederung von Primär- (Bodenverwundung bzw. Saat) und Sekundärtätigkeiten in definierte Teilereignisse (Arbeitsablaufabschnitte) mit den ausgewiesenen Messpunkten (charakteristische Vorgänge)	33
Tabelle 8: Klassifizierung der Saatgutabdeckung	35
Tabelle 9: Permeabilitätsklassen nach Bruggenwert (Quelle: Eijkelkamp, 1983)	41
Tabelle 10: Abschätzung der klassierten Bodenbelüftungssituation nach KREMER (1998)	41
Tabelle 11: Mittelwert und Standardabweichung des Zeitverbrauchs je Meter bei den untersuchten Bodenverwundungsverfahren in beiden Bestandsvarianten	56
Tabelle 12: Mittelwert und Standardabweichung des Zeitverbrauchs je Meter bei den untersuchten Saatverfahren in beiden Bestandsvarianten	57
Tabelle 13: Reihenfolge und Relevanz der in das Regressionsmodell implementierten Störfaktoren der Bodenverwundungsverfahren	61
Tabelle 14: Reihenfolge und Relevanz der in das Regressionsmodell implementierten Störfaktoren der Saatverfahren	62
Tabelle 15: Mittelwert und Standardabweichung des Zeitverbrauchs und der zurückgelegten Strecken während der praxisnahen Bearbeitungsvariante bei den untersuchten Bodenverwundungsverfahren in beiden Bestandsvarianten	65
Tabelle 16: Mittelwert und Standardabweichung des Zeitverbrauchs und der zurückgelegten Strecken während der praxisnahen Bearbeitungsvariante bei den untersuchten Saatverfahren in beiden Bestandsvarianten	66
Tabelle 17: Matrix der Pearsonschen Korrelationskoeffizienten der originären Modellvariablen für das Bodenverwundungsverfahren <i>Eberswalder Streifenpflug</i>	72

Tabelle 18: Modellzusammenfassung der Regressionsanalyse mit der abhängigen Variable <i>RAZ/m</i> für das Bodenverwundungsverfahren <i>Eberswalder Streifenpflug</i>	72
Tabelle 19: Parameter des Regressionsmodells für das Bodenverwundungsverfahren <i>Eberswalder Streifenpflug</i> mit den ursprünglichen und partiellen Korrelationskoeffizienten der Modellgröße	73
Tabelle 20: Partielle Korrelationskoeffizienten zwischen den verbleibenden Regressoren und der Zielgröße <i>RAZ/m</i> für das Bodenverwundungsverfahren <i>Eberswalder Streifenpflug</i>	73
Tabelle 21: Mittelwert (MW), Standardabweichung (SD) und Variationskoeffizient (CV) für die Reine Arbeitszeit je 100 m bei den untersuchten Bodenverwundungsverfahren in beiden Bestandsvarianten	77
Tabelle 22: Mittelwerte der Zeitartern zur Berechnung der Planzeiten für die Bodenverwundungsverfahren	77
Tabelle 23: Arithmetischer Mittelwert (MW), Standardabweichung (SD) und Variationskoeffizient (CV) für die Reine Arbeitszeit je 100 m bei den untersuchten Saatverfahren in beiden Bestandsvarianten	79
Tabelle 24: Mittelwerte der Zeitartern zur Berechnung der Planzeiten für die Saatverfahren	79
Tabelle 25: Gerätearbeitsstundenkosten für den <i>Eberswalder Streifenpflug</i>	82
Tabelle 26: Gerätearbeitsstundenkosten für den <i>Meinberg Wundstreifenpflug</i>	82
Tabelle 27: Gerätearbeitsstundenkosten für das Saataggregat <i>EggeSaat</i>	83
Tabelle 28: Gerätearbeitsstundenkosten für das Saataggregat <i>ÖkoSat/U</i>	83
Tabelle 29: Gerätearbeitsstundenkosten für das Saataggregat <i>Weilmünster Waldgrubber</i>	84
Tabelle 30: Systemkosten für das Arbeitsverfahren <i>Eberswalder Streifenpflug</i>	85
Tabelle 31: Systemkosten für das Arbeitsverfahren <i>Meinberg Wundstreifenpflug</i>	86
Tabelle 32: Systemkosten für das Arbeitsverfahren <i>EggeSaat</i>	87
Tabelle 33: Systemkosten für das Arbeitsverfahren <i>ÖkoSat/U</i>	88
Tabelle 34: Systemkosten für das Arbeitsverfahren <i>Weilmünster Waldgrubber</i>	88
Tabelle 35: Systemkosten für die manuelle Plätzeaat (Wiedehopphaue)	89
Tabelle 36: Mittelwerte der erfassten Streckenlängen je Teilfläche im Rahmen der Bearbeitung mit den Bodenverwundungsverfahren in beiden Bestandsvarianten	92
Tabelle 37: Mittelwerte der Arbeitsbreite und -tiefe bei den Bodenverwundungsverfahren sowie der relative Anteil der Stichprobenpunkte mit Mineralbodenkontakt	93
Tabelle 38: Mittelwerte der erfassten Streckenlängen je Teilfläche im Rahmen der Bearbeitung mit den Saatverfahren	94

Tabelle 39: Mittelwerte der Arbeitsbreite und -tiefe bei den Saatverfahren sowie der relative Anteil der Stichprobenpunkte mit Mineralbodenkontakt	96
Tabelle 40: Mittlere Anzahl der Keimlinge je Teilfläche sowie deren prozentuale Verteilung auf die Vitalitätsklassen bei der Handsaat nach Bodenverwundung durch die Streifenpflüge in beiden Bestandsvarianten	99
Tabelle 41: Mittlere Anzahl der Keimlinge je Teilfläche sowie deren prozentuale Verteilung auf die Vitalitätsklassen bei der kombinierten Rillensaat mit den untersuchten Saataggregaten in beiden Bestandsvarianten	100
Tabelle 42: Anteil der mit Buchenpflanzen begründeten Saatplätze und deskriptive Statistik zur Anzahl der Pflanzen je Platz in beiden Bestandsvarianten	101
Tabelle 43: Mittelwertunterschiede der Pflanzenhöhe in Abhängigkeit vom Arbeitsverfahren und der Bestandsvariante in den Jahren 2001 und 2002	105
Tabelle 44: Deskriptive Statistik der Anzahl mechanischer Verletzungen an Fichten über alle Wundgrößen je Teilfläche [0,1 ha] in Abhängigkeit von Arbeitsverfahren und Bestandsvariante	108
Tabelle 45: Arithmetischer Mittelwert und Median des Schadensprozents in Abhängigkeit vom Arbeitsverfahren und der Bestandsvariante	110
Tabelle 46: Deskriptive Statistik der berechneten $k_i$ -Werte in den Bodenproben der untersuchten Varianten	113
Tabelle 47: Mittelwerte der Herzschlagfrequenzen des Pferdeführers während der Bearbeitung der Versuchsflächen	116
Tabelle 48: Mittelwert und Standardabweichung der Herzschlagfrequenz des Pferdeführers in Abhängigkeit der klassierten Hangneigung und den Tätigkeiten im Bestand II	118
Tabelle 49: Arithmetische Mittelwerte der Geschwindigkeit, effektiven Zugkraft und äußeren Leistung in der streifenweisen Bearbeitungsvariante in Abhängigkeit der Arbeitsverfahren und Bestandsvariante sowie die Mittelwertdifferenzen der äußeren Leistungen zwischen den Versuchsbeständen	123
Tabelle 50: Mittelwerte der gemessenen Zugkraft in den untersuchten Arbeitsverfahren bei praxisnaher Bearbeitung in beiden Bestandsvarianten	125
Tabelle 51: Mittelwert und Standardabweichung der Herzschlagfrequenz (8-Minuten-Intervall) der Versuchspferde vor Belastung in Abhängigkeit der Messmethode	127
Tabelle 52: Mittelwerte der Herzschlagfrequenz des Versuchspferdes P1 für die ausgewiesenen Tätigkeiten in Abhängigkeit vom Arbeitsverfahren und der Bestandsvariante während der praxisnahen Bearbeitungsvariante	130

## Abkürzungsverzeichnis

AAA	Arbeitsablaufabschnitt
ASCII	<b>American Standard Code for Information Interchange</b> , standardisierter Zeichensatz für Computer zur Textdarstellung
AZ	Allgemeine Zeit(en)
BHD	„Brusthöhendurchmesser“, Durchmesser eines Baumes in 1,3 m Höhe über dem Erdboden
CV	Variationskoeffizient ( <i>deskriptive Statistik</i> )
DLG	individuelle Dauerleistungsgrenze
EKG	Elektro-Kardiogramm
EZ	Erholzeit(en)
GAS	Gerätearbeitsstunde(n)
Gew.-%	Gewichtsprozent oder korrekter Massenprozent, bezeichnet den gravimetrisch bestimmten, relativen Anteil beispielsweise des Wassergehaltes einer Bodenprobe
GT	Gesamtstätigkeit (Summe aus Primär- und Sekundärtätigkeit)
h	Zeiteinheitzeichen der Stunde (v. lat. <i>hora</i> )
IFA	Institut für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie der Georg-August-Universität Göttingen
LF	Leistungsfaktor
lfd. M.	Laufende(r) Meter
MAS	Maschinenarbeitsstunde(n)
MAX	Maximalwert ( <i>deskriptive Statistik</i> )
MIN	Minimalwert ( <i>deskriptive Statistik</i> )
MW	Arithmetischer Mittelwert ( <i>deskriptive Statistik</i> )
MwSt.	Mehrwertsteuer
p	p-Wert (Überschreitungswahrscheinlichkeit)
PAS	Pferdearbeitsstunde(n)
PNK	Personalnebenkosten
PT	Primärtätigkeit
r	Korrelationskoeffizient (nach Pearson) ( <i>Regressionsanalyse</i> )
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß ( <i>Regressionsanalyse</i> )
RAZ	Reine Arbeitszeit(en)
SD	Standardabweichung ( <i>deskriptive Statistik</i> )
SP	Stichprobenumfang ( <i>deskriptive Statistik</i> )
SPSS	Ursprünglich die Abkürzung für <b>Statistical Package for the Social Sciences</b> – heute Bezeichnung für die modular aufgebaute Softwarelösung zur statistischen Datenanalyse
ST	Sekundärtätigkeit
SUM	Summe ( <i>deskriptive Statistik</i> )
TF	Teilfläche; rechteckige Versuchsfläche mit einer Größe von 0,5 ha
Z	Median ( <i>deskriptive Statistik</i> )



# 1 Arbeitsverfahren zur Voraussaat von Rotbuchen

## 1.1 Waldumbau im Wandel forstlicher Zielsysteme

Die Fläche Mitteleuropas wäre heute ohne den menschlichen Einfluss zu 90 % mit Wald bedeckt. Eine steigende Bevölkerungsdichte sorgte jedoch dafür, dass die Waldfläche z. B. durch unregelmäßige, übermäßige Holznutzung, Waldweide und Streunutzung stetig abnahm. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts war die durch Rotbuchen und sonstige Hartlaubhölzer akzentuierte Waldfläche Mitteleuropas vielerorts auf nicht pflugfähige Standorte zurückgedrängt worden. An diese Phase der Übernutzung schloss sich eine Periode der Wiederaufforstung an. Charakteristisch für diese Epoche war die Umkehr des Flächenverhältnisses von Laub- und Nadelbäumen in der Bestockung durch die verstärkte Einbringung von Fichte insbesondere zu Lasten der Buche. Durch menschliche Einflussnahme entwickelte sich somit ein stark wirtschaftlich orientiertes Waldökosystem, das durch eine ungünstige Baumarten- und Altersklassenverteilung sowie eine zunehmende Artenmischung gekennzeichnet war (vgl. HASEL, 1985; HATZFELD, 1994; THOMASIU, 1996; SCHOPPA, 1999; JOHANN ET AL., 2004).

KÖBLE UND SEUFERT (2002) geben für die europäische Waldfläche den Anteil der Fichte mit 21 %, der Kiefer mit 31 % und der Buche mit ca. 7 % an. Nach TEUFFEL ET AL. (2004) stocken 86 % der Fichte in Europa (EU-14) außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebietes, davon sind 4–5 Mio. ha auf dominierten Laubholzstandorten begründet. Allein in Deutschland befinden sich ca. 31 % dieser Fichtenflächen.

Von den sekundären Fichtenreinbeständen geht ein erhöhtes Risiko der Destabilisierung des Waldgefüges durch z. B. Sturm- oder Schneebruchschäden sowie regelmäßig auftretende Insektenkalamitäten aus. Vor allem die Windwurfereignisse 1990 durch die Stürme *Vivian* und *Wibke* sowie durch *Lothar* im Jahr 1999 sorgten für verstärkte Forderungen nach einem zielgerichteten, ökologischen Waldbau durch einen konsequenten Umbau in standortgerechte, stabile und artenreiche Wälder (vgl. KOHLSTOCK, 1993; HOFFMANN, 1994; VONHOFF, 1997; THOMASIU, 1996).

In den heutigen waldbaulichen Zielsystemen aller deutschen Landesforstverwaltungen wird diese Umbaubestrebung durch Mehrung des Laubwaldanteils insbesondere in den Waldbauprogrammen wie z. B. zur „Langfristigen ökologischen Waldentwicklung – LÖWE“ oder „Wald 2000“ festgeschrieben (vgl. PECK, 1980; WEIGER, 1990; LANG, 1991; MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, 1991; LANDESFORSTVERWALTUNG NIEDERSACHSEN, 1992; OTTO, 1992; BRAUN, 1995; OTTO, 1995; PAESCHKE, 1995; MRAZEK, 1995; HOLLÄNDER, 1999).

Die langfristige Bestandssicherung durch Einbringung von Laubholzbaumarten in Nadelholzreinbestände vor dem Hintergrund der Verminderung von abiotischen und biotischen Risiken soll dem Leitbild des Dauerwaldes folgen. Diese angestrebten arten- und strukturreichen Wälder sind in der Regel stabiler, zumindest aber elastischer als (sekundäre) Reinbestände. Somit schädigen störende Einwirkungen nicht zwingend die Gesamtbestandsstruktur und der Ausgangszustand kann relativ schnell wieder erreicht werden. Die in diesem Kontext ebenfalls angestrebte Naturnähe von erzeugten Laub-Nadelholzmischbeständen geht als Nebeneffekt mit der fokussierten Stabilitätsverbesserung einher (vgl. BURSCHEL, 1990; OTTO, 1993; THOMASIU, 1996; LÜPKE, 2004b).

In diesem Zusammenhang hat in den vergangenen Jahrzehnten der Begriff „Waldumbau“ einen hohen Stellenwert in der waldbaulichen Forschung und forstbetrieblichen Praxis eingenommen. Eine Vielzahl von Definitionen des Umbaus bzw. der Überführung von reinen Nadelholzbeständen in laubholzangereicherte Mischbestände belebten dabei die Diskussion (vgl. VOLZ, 1991; ARENHÖVEL, 1996; THOMASIU, 1996; BUTTER, 2001; LEDER, 2002).

Im Fokus der Umbaumaßnahmen standen und stehen nachhaltig multifunktionale Zielsetzungen, bei denen die Steigerung der Stabilität und die Erhaltung der natürlichen Biodiversität eine besondere Bedeutung besitzt. Hinzu kommen die Aspekte der langfristigen Speicherung von Kohlenstoff durch Ausweitung der Produktionszeiträume und der einzelstammweisen Nutzung zielstarker Baumdimensionen. Die genannten Gesichtspunkte stellen im Wesentlichen Naturschutzziele dar. Werden sie durch den Waldbesitzer erbracht, sind es Leistungen, für die es derzeit keine geldwerten Entschädigungen gibt. Waldumbau wird daher überwiegend im öffentlichen Wald betrieben, im Privatwald sind in der Regel finanzielle Anreize in Form von Erstattung der Kosten aus Steuermitteln notwendig, um diese gesellschaftspolitische Daueraufgabe zu erfüllen (vgl. PIEPER, 2002; MÖHRING, 2004).

Die angestrebte Multifunktionalität der Waldbewirtschaftung umfasst die Vielfalt der Nutz-, Schutz- und Erholungsleistungen, die ein Forstbetrieb im Interesse des Gemeinwohls erbringt bzw. erbringen soll. Ein entsprechend formuliertes Leitbild als Wirtschaftsziel führt bei Forstbetrieben – vor allem in Bezug auf Einzelbestände – zu Zielkonflikten. Naturnah ausgerichtete Wälder können, bedingt durch eine Überschneidung vielfältiger Ziele auf der Fläche, nicht alle Funktionen optimal erfüllen. So kann z. B. nach MÖHRING (2004) der Umbau von Fichtenbeständen in Fichten-Buchen-Mischbestände keinen Beitrag zur Lösung betriebswirtschaftlicher Probleme der Forstbetriebe darstellen (vgl. SPELLMANN ET AL., 2001; WEBER, 2003; RIPKEN, 2004; WAGNER, 2004).

Wie sich auch in den Ergebnissen der zweiten Bundeswaldinventur (BWI<sup>2</sup>) widerspiegelt, hat sich Deutschland in den zurückliegenden 15 Jahren durch den Aufbau von stabilen und naturnahen Wäldern schwerpunktmäßig an einer Erhöhung der forstlich-ökologischen Nachhaltigkeit ausgerichtet. Der Anteil der Laubbäume an der Waldfläche hat in den alten Bundesländern im Zeitraum 1987–2002 zu Lasten der Baumartengruppen Fichte und Kiefer um ca. 4,8 Prozentpunkte zugenommen. Der Flächenanteil der Fichte beträgt in Deutschland ca. 29 % (Nadelholz: ca. 59 %), während die Buche auf ca. 15 % (Laubholz: ca. 41 %) der Fläche stockt. Die BWI<sup>2</sup> weist auf 73 % der deutschen Waldfläche eine Mischbestockung aus. Der in Bezug auf die potenziell natürliche Vegetation ausgewiesene Indikator „Naturnähe“ wurde mit 76 % im Hauptbestand angegeben, in Jungbestockungen sogar mit 83 % (SCHMITZ, 2004).

Der Umbau von Waldbeständen wird auch zukünftig eine große Bedeutung in der Forstwirtschaft besitzen. Im Fokus der waldbaulichen Maßnahmen werden verstärkt die Mischung und Struktur von Beständen stehen, die sich auch den prognostizierten Änderungen des Klimas anpassen und aus Baumarten mit unterschiedlichen ökologischen Eigenschaften und Funktionen zusammensetzen. Die zu schaffenden Baumartenmischungen müssen eine hohe Anpassungsfähigkeit an unterschiedlichste Störungen erfüllen (erweiterte Risikostreuung durch Arten- und Strukturvielfalt), diese Bestände entfernen sich hingegen deutlich von der aktuell ausgewiesenen potenziellen natürlichen Vegetation. Darüber hinaus wird sich auch eine Umbaubestrebung nach forstbetrieblichen Zielen ergeben, die sich aus einer ökologischen oder ökonomischen Ausrichtung der nachhaltigen Sicherung der Waldfunktionen ergeben (vgl. THOMASIUS, 1991; GERSTENGABE ET AL., 2003; LÜPKE, 2004a).

## 1.2 Aktuelle Waldumbau-Praxis

In den naturnah ausgerichteten Waldbaukonzepten ist die strikte Beachtung des Standortpotenzials bei der Baumartenwahl entscheidend. Die standörtlichen Voraussetzungen sind bedeutend, um Mischungen zu erziehen, in denen die gewählten Baumarten ihre speziellen Eigenschaften (z. B. Unterschiede in Lichtansprüchen, Wasser- und Nährstoffbedarf, Fruktifikation, Anfälligkeit bzw. Resistenz gegen Gefährdungen) optimal in die multifunktionalen Ziele einbringen.

Den Schwerpunkt beim Waldumbau von Nadelholzreinbeständen bilden Fichtenwälder, die zumeist auf Standorten stocken, wo die Rotbuche autochthone Baumart ist. Hier werden vor allem Mischbestände mit Buche angestrebt. In der Regel werden labile vor stabilen Fichtenbeständen, aber im Grunde alle nicht standortgerechten Nadelholzbestockungen in die aktuellen Umbauestrebungen mit einbezogen. Für 14 europäische Länder schätzen TEUFFEL ET AL. (2004) die potenzielle Umbaufläche für Fichte, die auf Laubholzstandorten stockt, auf 1,1–1,6 Mio. ha bei einer Einbringung von 30 % Laubholz in den Nadelholzbeständen.

Aufgrund des in einigen Regionen beobachtbaren Fehlens von ausreichend Laub-Samenbäumen (vor allem der Rotbuche) in umzuwandelnden Nadelholzbeständen existiert zumeist keine Möglichkeit, diese durch natürliche Verjüngung umzubauen. Der ökologisch orientierte Waldbau sieht i. d. R. eine kahlschlagsfreie Waldbewirtschaftung vor, so dass eine Überführung in stufige Mischbestände in erster Linie durch künstliche Verjüngung realisierbar ist (vgl. RICHTER UND LEDER, 1990; KESSEL, 1994; GEROLD, 1996).

Der Waldumbau von Fichtenreinbeständen in Fichten-Buchen-Mischbestände wird vielfach unter dem Schirm des Altholzes auf einer Fläche von 30–70 % durchgeführt. Die Schirmstellung und die somit zu regulierende relative Beleuchtungsstärke ermöglicht die Steuerung bzw. zeitliche Entzerrung der Konkurrenz zwischen der sich natürlich verjüngenden Fichte und der künstlich eingebrachten Buche. Der Altholzschirm bietet darüber hinaus Schutz gegen z. B. Spätfröste, Konkurrenzvegetationen oder indirekt auch Mäusefraß. Mit den angestrebten Buchen-Fichten- oder Fichten-Buchen-Mischbeständen werden die positiven Effekte eines strukturreichen und stufigen Dauerwaldes erreicht. So erzielen diese Maßnahmen z. B. eine Risikominimierung der Schäden, eine höhere Sortimentsstruktur des Einschlags und eine bodenpfllegliche Wirkung der Laubstreu (vgl. FLEDER, 1991; PAMPE, 2000; KRÜGER, 2002; OTT, 2002; REDDE, 2002; KÜHNE UND BARTSCH, 2003; AMMER UND WILNHAMMER, 2004).

Die Überführung der in Frage kommenden Fichtenreinbestände erfolgt in der Regel nach verschiedenen Behandlungskonzepten des Altbestandes. In Abhängigkeit von der jeweiligen Strategie unterscheidet PALMER (1985) den Voranbau vor dem Hintergrund des Waldumbaus und der Beimischung sowie ein aktives und passives Vorgehen bei der Umsetzung. Bedeutend ist hierbei das räumlich sowie zeitlich geordnete Vorgehen der Maßnahmen (Vor- und Endnutzungen) im Nadelaltholzschirm. Die Bestandsstabilität kann durch die Entwicklung kleinflächiger Mosaikstrukturen erhöht werden, wobei in diesem Zusammenhang der einzelstammweisen Zielstärkennutzung und einer entsprechenden Begründung auf den entstehenden Kleinflächen der Vorrang eingeräumt wird (vgl. PECK, 1980; PALMER, 1985; OTTO, 1993; LEDER, 2004).

Soll der Waldumbau dem Ziel einer vorausschauenden Anpassung der Bestände auf eine mögliche Klimaänderung in Mitteleuropa dienen, bedarf eine erfolgreiche Mischwaldmehrung auch einer höheren Vielfalt in den waldbaulichen Verfahren (Hiebseingriffe wie z. B. Loch-, Saumhiebe, lichte Schirmschläge oder Kahlschläge). Diese Forderung richtet sich nach den entsprechenden Eigenschaften der jeweiligen Mischbaumarten und wird mit Vertretern des naturnahen Waldbaus teilweise kontrovers diskutiert (LÜPKE, 2004a).

In erster Linie geschieht die Einbringung der Laubgehölze durch Pflanzung verschiedener Pflanzensortimente mit unterschiedlichen Arbeitsverfahren. Als klassisches Pflanzmaterial ist der Buchenwildling zu nennen, der nicht nur kostengünstig in Selbstwerbung gesicherter Herkunft, sondern auch bzgl. des Anwuchserfolgs im Vergleich zu Sämlingen und verschulten Pflanzen positiv abschneidet. Das Pflanzenmaterial aus den Baumschulen weist jedoch vielfach den deutlichen Vorteil auf, rascher das gesicherte Jungwuchsstadium als der Wildling zu erreichen. Laubholzgroßpflanzen finden ebenfalls beim Voranbau unter Nadelholzreinbeständen Anwendung, vor allem bei stark vergrasteten, verwilderten Flächen sowie nach Kalamitäten. Die Vorteile dieses Pflanzensortiments bestehen darin, dass die Terminalknospe bereits aus der bodennahen Frostzone sowie dem Äser vom z. B. Rehwild herausgewachsen ist, eine geringere Pflanzenzahl je Hektar sowie eine geringe (bis gar keine) Jungwuchspflege erforderlich

wird. Daraus ergeben sich im Vergleich zu zweijährigen Pflanzen geringere Gesamtkosten (vgl. PALMER, 1985; DAHMER, 1998; MÜLLER, 1999).

Den angeführten Vorteilen der Pflanzungen stehen jedoch bedeutende Kritikpunkte gegenüber. So werden oftmals zu hohe Kosten des Pflanzenmaterials, die zeit- und übungsintensiven, manuellen Handpflanzverfahren und die initiale Wuchshemmung (Pflanzschock) benannt. Darüber hinaus führen Standardarbeitsverfahren wie z. B. die Winkelpflanzung vor allem bei heute üblichen und somit nicht an diese Verfahren angepassten Laubholzpflanzsortimenten vielfach zu einer Wurzeldeformation und geringer Erschließung des Wurzelraums, was zu einer Gefährdung der Bestandsstabilität führen kann (vgl. DAHMER, 1998; REDDE, 2002; NÖRR, 2003; NÖRR, 2004).

Unter anderem die aufgeführten waldbaulichen Nachteile der Pflanzung haben in den zurückliegenden Jahren dazu geführt, dass die entsprechenden Konzepte verstärkt auf Naturverjüngung und – insbesondere beim Fehlen von ausreichend Samenbäumen – Saat setzten. Im Vergleich zum Voranbau durch Pflanzung wurzelnackter Buchensortimente hat die Saat den Vorteil, dass die Wurzelentwicklung und das Wachstum der Jungpflanzen physiologisch ungestört und natürlich ablaufen können. Darüber hinaus ergibt sich bei erfolgreichen Saaten und somit hohen Pflanzenzahlen durch innerartliche Konkurrenz eine frühzeitige Qualifizierung der Individuen und eine größere natürliche Selektionsmöglichkeit im Laufe des Bestandslebens (vgl. GOMMEL, 1994; ROSENHAUER, 1994; BAUMHAUER, 1996; MOSANDL UND FELBERMEIER, 1999 sowie NÖRR, 2004).

Unabhängig von den dargestellten Verfahren führen der hohe Kapitalbedarf, die lange Kapitalbindung und die hohen Zinskosten dazu, dass Investitionen für Bestandsbegründungen in den Forstbetrieben heute so gering wie möglich gehalten werden. Hinzu kommt der derzeit enorme Rationalisierungsdruck der deutschen Forstwirtschaft, der sich unter anderem auch in den Reformbestrebungen sowie der stärkeren erwerbswirtschaftlichen Ausrichtung der öffentlichen Forstbetriebe widerspiegelt. Entsprechende organisationspolitische und somit finanzpolitische Restriktionen haben zur Folge, dass waldbauliche Aktivitäten mit Investitionscharakter (hier vor allem die Bestandsbegründung sowie der Umbau) eingeschränkt werden. Dies zeigt sich in den abnehmenden Flächenanteilen der künstlichen Bestandsbegründung, die auch zukünftig einen stagnierenden, wenn nicht weiter rückläufigen Trend aufweisen wird. Die Hälfte der deutschen Landesforstverwaltungen wird die Kulturkosten senken, zum einen durch Ausweitung von Naturverjüngungen und zum anderen durch Anwendung von direkten Saaten im Rahmen der künstlichen Begründung (vgl. SCHRÖDER, 1999; ZULAUF, 2002). Den Rückgang von Pflanzungen sowie die gesenkten Pflanzenzahlen je Maßnahme belegt auch der zurückgehende Absatz unterschiedlicher Pflanzensortimente deutscher Forstbaumschulen. Des Weiteren hat sich das Baumartenspektrum der nachgefragten Forstpflanzen in den zurückliegenden Jahrzehnten stark zu Lasten homogener Nadelholzmassensortimente verändert, so dass Buchen- und Eichenpflanzen heute verstärkt vermarktet werden, was mit der vom Waldumbau betonten forstpolitischen Zielsetzung einhergeht (vgl. DÖRFLINGER, 1992; OTTO, 1994; SCHÜTE, 1994; RATHE, 1995; SCHLEGEL, 1997 sowie STATISTISCHES BUNDESAMT, 1978–2004).

Bei der zunehmenden Finanzknappheit der (öffentlichen) Waldbesitzer und der verstärkt erwerbswirtschaftlichen Ausrichtung der öffentlichen Forstbetriebe sind Rationalisierungspotenziale unter Wahrung der Nachhaltigkeit aller Waldfunktionen weiterhin zu erschließen. Dies gilt insbesondere für die kostenintensive Begründung und Erneuerung von Waldbeständen – eine Investition, die sich hinsichtlich von Einzelbeständen erst nach Jahrzehnten amortisieren kann (vgl. SCHRÖDER 1999; BUTTER, 2001). Lösungsmöglichkeiten werden in der Extensivierung entsprechender Maßnahmen sowie in der Anwendung von kostengünstigen und waldbaulich Erfolg versprechenden Alternativ-Arbeitsverfahren gesehen. So wird die direkte Saat von z. B. Bucheckern als das vielversprechendste waldbauliche Verfahren zur Lösung aktueller Problemstränge im Waldumbau angeführt.

### 1.3 Bucheckern-Voraussaat

Die künstliche Bestandsbegründung über direkte Saaten gehörte in den zurückliegenden Jahrzehnten nicht mehr zu häufig angewendeten Begründungstechniken. In den Anfängen der modernen Forstwirtschaft, zu Beginn des 19. Jahrhunderts, war dies jedoch anders, die „Restaurierung“ devastierter Wälder fußte auf der breiten Verwendung unterschiedlicher Saatetechniken, im Wesentlichen durch die Einbringung von Nadelhölzern. Die Saat von Laubhölzern besaß in der jüngeren Vergangenheit eine vergleichbar geringere Bedeutung in der Kulturbegründung, so wurden schwerpunktmäßig Eichen oder in Einzelfällen Buchen gesät. Die Buchensaat – speziell die Voraussaat unter Fichtenschirm – kam jedoch im zurückliegenden Jahrzehnt wieder verstärkt zur Anwendung, so z. B. in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen, Bayern und Sachsen, in denen vor allem die waldbaulichen Aspekte entsprechender Maßnahmen wissenschaftlich begleitet wurden. Im Fokus dieser Untersuchungen stand unter anderem die nähere Eingrenzung des Anwendungsbereiches, vornehmlich die erforderliche Ausgangssituation des Fichtenbestandes, die eine Saat gegenüber der Pflanzung rechtfertigt. So sind Wasser- und Nährstoffansprüche für die Etablierung der Sämlinge bedeutender als für mehrjährige Baumschulpflanzen. Darüber hinaus untersuchten die Studien schwerpunktmäßig die Intensität der Bodenbearbeitung sowie die Kombination mit Kalkungsmaßnahmen. Insbesondere die Schirmstellung, deren Einfluss auf die Niederschlagsmenge auf den Waldboden, die Wasserkonkurrenz der Altbäume sowie die Beleuchtungssituation in den ersten 5–10 Jahren spielen eine bedeutende Rolle für die Konkurrenz zur Begleitflora oder der Fichtennaturverjüngung (vgl. GOMMEL, 1994; BAUMHAUER, 1996; LEDER UND WAGNER, 1996; KÜßNER UND WICKEL, 1998; MOSANDL UND FELBERMEIER, 1999; AMMER, 2000; AMMER UND EL KATEB, 2001; LEDER ET AL., 2003; AMMER UND WILNHAMMER, 2004).

Direkte Buchensaat bedürfen großer Mengen an Eckern, da der Keim- und somit Anwuchserfolg im Wald auch bei einer vorherigen Bodenbearbeitung und eventuellen Kalkung wesentlich geringer ausfällt als in Kulturbeeten der Forstbaumschulen, wo es zusätzlich möglich ist, die Bodenfeuchte und Nährstoffzugabe zu kontrollieren. Als ein Kompromiss zwischen Ausfallrisiko und Kosten werden 50–100 kg Saatgut für eine Ausbringung auf einer Verjüngungsfläche von einem Hektar empfohlen, hingegen wurden auch mit deutlich geringeren Mengen (z. B. 20 kg/ha) positive Ergebnisse dokumentiert (vgl. BAUMHAUER, 1994; NÖRR, 2004).

Neben der Menge entscheidet vor allem eine hohe Qualität der Bucheckern aus autochthonen Herkünften, deren professionelle Vorbereitung (Stratifikation) sowie eine fachgerechte Behandlung während der Maßnahmen über den Erfolg einer Voraussaat. In der Literatur sind die Berentung von Buchenbeständen, Einlagerung und Stratifikation der Bucheckern sowie deren Behandlung und Transport zum Aussaatetermin detailliert beschrieben (vgl. MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, 1998; LEPPER ET AL., 1996; SCHUBERT, 1999; GILLE, 2000 und LUDWIG, 2004).

Als Aussaatzeitpunkt wird je nach standort-klimatischen Voraussetzungen vielfach das Frühjahr von Ende April bis Anfang Mai empfohlen, zu dieser Jahreszeit ist der Einfluss abiotischer (Trockenheit und Frost) sowie biotischer Schäden (Mäuse, Schalenwild, Vögel etc.) an Eckern sowie Keimlingen deutlich geringer als im Herbst. Demgegenüber muss eine teurere Einlagerung und Aufbereitung des Saatgutes berücksichtigt werden (vgl. BAUMHAUER, 1994; LEDER UND WAGNER, 1996; AMMER, 2000; GILLE, 2000).

Bedeutend für den Keimerfolg der ausgebrachten Eckern sind die im Rahmen des Arbeitsverfahrens geschaffenen Keimbedingungen, vor allem die Freilegung des Mineralbodens und die Abdeckung des Saatgutes.

Direkte Saaten eignen sich vor allem nach Vollmastjahren, da der Preis für das Saatgut deutlich niedriger, die Qualität zudem hochwertiger und Fraßverluste durch z. B. Mäuse geringer ausfallen (vgl. BAUMHAUER, 1994; LEDER UND WAGNER, 1996; LEDER, 2004).

Als häufiges Argument für die Anwendung der direkten Saat gegenüber der Pflanzung werden die niedrigeren Gesamtkosten angeführt, die sich u. a. aus der geringeren Anzahl an Prozessschritten zur Etablierung eines Jungwuchses ergeben (vgl. GOMMEL, 1994; OTTO, 1994; LEDER UND WAGNER, 1996; BAUMHAUER, 1996; KÜßNER UND WICKEL, 1998; MOSANDL UND FELBERMEIER, 1999; STÄDTLER UND MELLES, 1999).

In der Literatur wird eine Vielzahl von unterschiedlichen Kostensätzen genannt, die unter Berücksichtigung der Ausbringungsqualität und Aussaatdichte sowie des Anwuchserfolgs ein stark heterogenes Bild ergeben. In Abhängigkeit von angewandten Verfahren und der Technisierungsstufe kann gemäß abnehmender Systemkosten folgende Reihenfolge angegeben werden: Manuelle Saaten (Handsaaten unter Zuhilfenahme von einfachen Werkzeugen, z. B. Wiedehopfhäue) lassen die höchsten Kosten, aber bei sorgfältiger Ausführung auch die besten Ergebnisse erwarten. Schleppergestützte Verfahren sind für große Flächenleistung konzipiert und kostengünstig, sie schneiden allerdings bei Ausbringungsqualität, Aussaatdichte und Bodenschonung schlechter ab. Saatverfahren mit pferdegezogenen (einfach mechanisierten) Betriebsmitteln sind in der Regel bei guter Flächenleistung und kontinuierlichem Saatvorgang, der zudem ständig vom Gespannführer kontrolliert werden kann, teurer als schleppergestützte Verfahren (NÖRR, 2004).

Die aufgeführten, aktuellen Erkenntnisse aus verschiedenen Bucheckern-Voraussaaten zeigen, dass diese unter entsprechenden Voraussetzungen heute einen festen Bestandteil im Waldumbau einnehmen und voraussichtlich bei den gegebenen Restriktionen im Vergleich zur Pflanzung zukünftig verstärkt Anwendung finden werden.

## 1.4 Verfahrenstechnologische Aspekte der Bestandsbegründung

Das mit Arbeitsverfahren der Bestandsbegründung herzustellende „Produkt“ bildet nach ERLER (2000) die verjüngte Bestandsfläche. Das räumliche Muster (selektiv, schematisch oder flächig), d. h. die bestandsörtliche Festlegung einer entsprechenden Arbeitsaufgabe, bestimmt vielfach über die Wahl des Betriebsmittels im jeweiligen Arbeitsverfahren. Auf die direkte Saat bezogen findet sich in der Literatur eine Fülle von unterschiedlichen, z. T. historischen Arbeitsverfahren, die sich nach dem gesäten Flächenanteil und vielfach auch durch die eingesetzten Betriebsmittel bzw. Werkzeuge unterscheiden. Zu nennen sind hier v. a. die Voll- oder Breitsaat auf der ganzen Verjüngungsfläche, die Streifenbreitsaat auf freigelegten Streifen mit einer Breite von 40–60 cm, die Rillensaat in mit einfachem Pflug erzeugten 10 cm breiten Furchen sowie die Plätzesaat auf einer Vielzahl von Kleinflächen mit einer Größe von jeweils 20–100 cm<sup>2</sup> (vgl. LOYCKE, 1963). Die Verfahren zum Umbau von Fichtenreinbeständen sollten je nach betrieblicher Zielsetzung auf 30–70 % der Fläche zum Einsatz kommen. Für die Erzielung von Buchenwertholz werden Horste mit einer Größe von 0,1 ha empfohlen, die mit ca. 500 lfd. M. Saatrillen (Rillensaat) oder ca. 330 Saatplätzen (plätzeweise Handsaat) begründet werden sollten (vgl. NÖRR, 2004).

Darüber hinaus werden die Arbeitsverfahren der Waldverjüngung auch nach der Intensität des Eingriffs in die Bodenstruktur unterschieden. Hierbei differenziert ERLER (2000) Verjüngungsmaßnahmen, die auf unbearbeitetem, freigelegtem und intensiver bearbeitetem Mineralboden stattfinden. Des Weiteren unterscheidet LOYCKE (1963) nach zunehmendem Eingriffsgrad das Aufreißen des Waldbodens mit Hilfe von Rechen, Eggen und Grubber, das Hacken der oberen Bodenzone mit manuellen Hacken oder Fräsen sowie das Wenden oder Umbrechen in verschiedenen Tiefen der Bodenzone vor allem durch unterschiedliche Pflüge. Hieraus resultieren

i. d. R. höhere Mechanisierungsgrade bei entsprechenden Saatverfahren im Vergleich zur Pflanzung, die vor dem Hintergrund der geringen Systemkosten teilweise positiv bewertet werden. Saatverfahren werden in nicht mechanisiert (reine Handarbeit inkl. tierisch gestützter Arbeit), teilmechanisiert (einfache Maschinenarbeit) und höhermechanisiert (bei der Verwendung von schleppergezogenen, kombinierten Saataggregaten) unterteilt (vgl. ERLER, 2000).

Berücksichtigt man die dargestellten „modernen“ waldbaulichen Konzeptionen – mehr Naturverjüngung, Mischbestände, kleinflächiger Wechsel der Bestockung –, die zwangsläufig zu auf kleinem Raum wechselnden Arbeitsaufgaben führen, dann lassen sich heute im Bereich der biologischen Produktion nur schwerlich großflächige Anwendungsmöglichkeiten hochmechanisierter Techniken erkennen, die zudem noch tief greifende Bodenbearbeitungen auf großer Fläche vollziehen. LÖFFLER (1988) spricht beim geschilderten kleinflächigen Aufgabenbereich der manuellen Arbeit mit ggf. motorgetriebenen, technisch einfachen Geräten (z. B. dem Einmann-Lochbohrgerät) eine große Bedeutung zu.

Für die Vorbereitung von Pflanz- und Saatplätzen (bzw. Reihen) wurden in den zurückliegenden Jahren verschiedene, z. T. regional verbreitete Betriebsmittel wiederentdeckt und entsprechende Konzepte entwickelt, so z. B. der *Sögeler Forststreifenpflug*, der *Waldmeister-Forstpflug*, der *Eberswalder Streifenpflug*, der *Meinberg Wundstreifenpflug* (zzgl. dem Saat-Anhängeaggregat *EggeSaat*), die *Sämagrub*, der *Kobold*, die *ÖkoSat/U* und der *Weilmünster Waldgrubber* (vgl. LEDER, 1996, LEDER, 2000; KOCH, 1999; RIPKEN, 2003). Eine detailliertere Übersicht von historischen, aktuellen sowie lokal adaptierten Betriebsmitteln und daran ausgerichteten Arbeitsverfahren zu Bodenbearbeitung und Saat sind LOYCKE (1963) und KWF (1999) zu entnehmen.

Entsprechende Bodenverwundungs- und kombinierte Saatgeräte werden vielfach für den Schlepper- und/oder Pferdezug angeboten. Am Einsatz von Schleppern als Zugmittel für die Geräte (i. d. R. für die Landwirtschaft konzipiert und mit forstlicher Zusatzausstattung aufgerüstet) wird die flächige Befahrung der Standorte und eine damit einhergehende Veränderung der Bodenstruktur sowie Beschädigungen des verbleibenden Bestandes kritisiert. Dem stehen höhere Flächenleistungen als mit tierisch gestützten Verfahren gegenüber, die jedoch als bestands- und bodenpfleglicher eingeschätzt werden. Insbesondere die Aggregate für den Pferdezug sind oft Einzelanfertigungen und durch einen geringen Absatz, eine daher eingeschränkte Verbreitung und ständige, z. T. individuelle Weiterentwicklungen durch die Betreiber gekennzeichnet (vgl. Kapitel 3.3).

## 1.5 Einsatz von Zugpferden in der Waldarbeit

Der Einsatz von Pferden in der Waldarbeit gewinnt heute vor allem dann an Bedeutung, wenn alternative, meist höher mechanisierte Verfahren ökologisch kritisiert werden. Dies trifft vorwiegend im Zusammenhang mit dem flächigen Befahren von Waldstandorten sowie der Beschädigung des verbleibenden Bestandes durch schwere Forstmaschinen zu. Der Boden gilt in der Forstwirtschaft als grundlegender Produktionsfaktor und wird als volkswirtschaftlich bedeutendes Kulturgut angesehen, was auch durch die verstärkte Zunahme von entsprechenden gesetzlichen Regelungen sowie den von Forstbetrieben selbst auferlegten Zertifizierungskonzepten in den zurückliegenden zwei Jahrzehnten zum Ausdruck kommt (vgl. Kapitel 5.3.4).

Noch bis zur Mitte der 40er Jahre des vergangenen Jahrhunderts stellte das Pferd – abgesehen von einigen wenigen Zugochsen – das alleinige Hilfsmittel bei der manuellen Arbeit im Wald dar. Dabei handelte es sich überwiegend um schwere Kaltblüter mit phlegmatischem Temperament, die entweder aus den Ställen Wald besitzender Bauern oder aus forsteigenen Stallungen stammten. Auch Pferde mit geringerem Körpergewicht wie Haflinger, Fjordpferde oder Warmblüter eines schwereren Schlags kamen zum Einsatz, erbrachten aber

nicht die Zugkräfte der Kaltblutpferderassen. Das Pferd als Zugmittel in der Holzbringung und beim Transport sowie bei der Bodenvorbereitung für Verjüngungsmaßnahmen war fester Bestandteil im damaligen Forstbetrieb (vgl. RINGELMANN, 2002; SCHARNHÖLZ, 2002).

Bereits zwischen dem Ersten und Zweiten Weltkrieg, insbesondere in den Jahren der Weltwirtschaftskrise, wurde der Grundstein für die Mitte der 1950er Jahre voranschreitende Mechanisierung und Rationalisierung gelegt. Moderne Techniken in der Waldarbeit, zunächst in Form von einfachen Schleppern, substituierten verstärkt die tierische Zugkraft. Von 1960 bis 1965 halbierte sich die Zahl der Pferde in Deutschland von 1.000.000 auf 417.000, während sich im gleichen Zeitraum die Zahl der Schlepper von 520.000 auf 1.100.000 mehr als verdoppelte (vgl. ROGALL, 1968).

Ein weiterer Mechanisierungsschub von schweren, selbstfahrenden Forstmaschinen ergab sich aus den Sturm- und Brandkatastrophen in den 1970er Jahren. Diese Ereignisse machten eine effiziente Aufarbeitung des liegenden Rohholzes erforderlich. Die Arbeit mit dem Zugpferd im windgeworfenen Holz deklassierte sich vielerorts durch die geringe Leistung, hohe Beanspruchung von Pferdeführer und Tier sowie die Unfallgefahr. Der Pferdeeinsatz nahm in den ausklingenden 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts nur noch eine Randposition in der deutschen Waldarbeit ein, bzw. war bereits ganz aus dem breiten Arbeitsfeld verschwunden (vgl. CERNY, 1987).

Eine eingeschränkte Renaissance erfuhr der Einsatz von Zugpferden in der Waldarbeit in den 1980er Jahren. Ein durch akute Umweltschäden für die Natur geschärftes Bewusstsein der deutschen Bevölkerung förderte ein Umdenken in der bis dato auf Mechanisierung ausgerichteten Forstwirtschaft. Mit der Hinwendung zur naturgemäßen Waldbewirtschaftung verstärkten sich die Forderungen der Boden- und Bestandspfleglichkeit von Arbeitsverfahren in der Bewirtschaftung der Wälder, womit die Alternative der Holzbringung mit dem Pferd wieder eine höhere Bedeutung gewann. Im Zuge dieser Entwicklungen wurden im Haupteinsatzgebiet der Rückepferde in der Bringung von Rohholz verschiedene Arbeitsverfahren konzipiert und erprobt, die vielfach einen kombinierten Einsatz von Pferd (zum Vorrücken) und Forstschlepper (aufgerüstete landwirtschaftliche Schlepper und Forstspezial-Seilschlepper zum Endrücken) vorsahen. Auch im Rahmen der Bodenvorbereitung zur Förderung der Naturverjüngung und der Saat wurden wieder verstärkt Pferde eingesetzt (s. o.).

Die Ausweitung des Einsatzes von Pferden in der Waldarbeit in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts wurde zudem durch staatliche Fördermaßnahmen einzelner Bundesländer begünstigt. Für z. B. die Holzernte ergab sich so ein föderalistisch heterogenes Bild, weil sich die staatliche Unterstützung von der Nullförderung in Niedersachsen und dem Saarland über die Gewährleistung zinsloser Darlehen in Hessen, der direkten Subvention von (pferde-) gerücktem Holz in Nordrhein-Westfalen und Schleswig-Holstein bis hin zur Gewährung direkter Beihilfen in unterschiedlicher Höhe für Investitionen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz erstreckte. Neben der direkten finanziellen Unterstützung stellt eine konstante jährliche Auslastung der Pferde sicher, dass die Pferdeführer ihre Haltungs- und Einsatzkosten abdecken können. Eine entsprechende Auslastung wird mit ca. 1.500 - 2.000 m<sup>3</sup>(f)/a/Pferd angegeben (vgl. SCHWILL, 1987; RINGELMANN, 2002).

Sowohl die politischen Veränderungen im Zuge der deutsch-deutschen Wiedervereinigung als auch die Windwürfe der Orkane *Wiebke* und *Vivian* Anfang der 1990er Jahre sorgten für einen erneuten Rückgang des Pferdeeinsatzes. Nach BONIN (1999) schufen vor allem die geringen Rohholzpreise und der inzwischen vorhandene höher mechanisierte Maschinenbestand ungünstige Einsatzbedingungen von Zugpferden (s. o.). SCHROLL (2000) führt ebenfalls an, dass auch die Ende 1999 vom Orkan *Lothar* verursachten Schäden für weitere rückläufige Tendenzen v. a. im für den Pferdeeinsatz bedeutenden Bundesland Baden-Württemberg gesorgt haben.

Einen Hinweis auf die meist geringe Anzahl von Pferden in der Waldarbeit kann die Entwicklung des Kaltblutzuchtpferdebestands bieten. 1950 belief sich die Zahl der Zuchtstuten auf 99.329 und sank bis zum Jahre 1977 auf 1.181 ab. Im Jahr 1980 stieg sie wieder leicht auf 1.810 Stuten und konnte nach der deutsch-deutschen Wiedervereinigung eine erneute Erhöhung auf 2.777 Stuten im Jahre 1990 und zehn Jahre später auf 4.454 Kaltblutzuchtstuten verzeichnen. Betrachtet man für das Jahr 2002 deren Anteil von 4.446 registrierten Tieren am Gesamtzuchtstutenbestand, so fällt dieser mit ca. 5 % eher gering aus. Hier zeigt sich, dass Pferde heute verstärkt für Sport- und Freizeitaktivitäten genutzt werden (vgl. FRÖBA, 1992; NEUBERGER, 1993; SCHARNHÖLZ, 2002 sowie FN, 2002).

Die Anzahl der im Forst eingesetzten Zugpferde ist heute aufgrund der heterogenen Struktur der meist im Nebenerwerb arbeitenden Pferdeführer schwer zu ergründen. Verschiedene Untersuchungen auf der Basis von Befragungen zeigen diese Schwierigkeit selbst bei der Festlegung auf einzelne Bundesländer auf. Nach GEILE UND SCHULZE (1993) belief sich in Unternehmen, die Pferde einsetzen, der Bestand Anfang der 1990er Jahre auf ca. 2,5 Pferde pro Betrieb. Bei durchschnittlich 1.128 Pferdearbeitsstunden pro Jahr wurde kalkuliert, dass in Deutschland ca. 8 % des Rückevolumens durch den Einsatz von Pferden erbracht werden konnten. RINGELMANN (2002) ermittelte für das Erhebungsjahr 2001 einen Bestand von 1.061 Pferden, die regelmäßig in der Holzernte eingesetzt wurden. Hierunter zählten auch ca. 64 Zugpferde, die in Eigenregie von staatlichen Forstbetrieben zum Einsatz kamen. Nach NICK UND FORBRIG (2002) belief sich die Zahl der in der Waldarbeit eingesetzten Pferde Anfang des 21. Jahrhunderts in Deutschland auf insgesamt 359.

Eine ernsthafte ökonomische und auch volkswirtschaftliche Bewertung des Pferdeeinsatzes in der Waldarbeit fällt schwer, da vor allem in der (Betriebs-) Struktur eine Trennung zwischen Hobby, Neben- und Haupterwerb schwer vorzunehmen ist. Ein ökonomisch sinnvoller Einsatz von Zugpferden wird heute nur noch für Dienstleistungsunternehmen mit angeschlossener Landwirtschaft gesehen, in denen der Einsatz von Forstschleppern und Pferdekraft Kosten sparend verbunden werden kann und individuell organisatorische Rahmenbedingungen gegeben sind (vgl. RINGELMANN, 2002; SCHRÖDER, 1999). So ergeben sich heutige Einsatzbereiche von Kaltblutpferden neben der Waldarbeit schwerpunktmäßig in der Landwirtschaft, im Gartenbau, bei Kommunalarbeiten, im Rahmen von Planwagen- und Kutschfahrten sowie zur Beförderung unterschiedlicher Lasten.

## 2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die aktuellen Entwicklungen pferdegezogener Betriebsmittel und der daran ausgerichteten Arbeitsverfahren innerhalb des Umbaus von Fichtenreinbeständen in Mischbestände durch Buchensaat vergleichend zu untersuchen und eine Verfahrensbewertung vorzunehmen.

Die beiden im Fokus der Untersuchung stehenden Arbeitssysteme der Bodenvorbereitung und der kombinierten Rillensaat unterscheiden sich nicht nur in ihren Arbeitsaufgaben, sondern auch in ihren Arbeitsverfahren, da jeweils unterschiedliche pferdegezogene Betriebsmittel zum Einsatz kommen. Insgesamt werden fünf Verfahren näher beleuchtet: zwei Bodenverwundungsverfahren mit anschließender plätzeweisen Handsaat und drei kombinierte einfachmechanisierte Rillensaatverfahren.

Ein optimales Arbeitsverfahren (Arbeitsbest- oder Standardverfahren) ergibt sich aus dem Ziel der höchsten Sachleistung (Arbeitsergebnis pro Zeiteinheit) bei gegebenen Restriktionen. Hierbei sind nach HÄBERLE (1998) technische, ökonomische, ökologische und soziale bzw. ergonomische Aspekte anzuführen, aus denen sich die vier sachlichen Teilziele der vorliegenden Arbeit ableiten lassen.

1. Als erstes Untersuchungsziel werden anhand von Arbeitsablaufstudien die technischen und natürlichen Einflussgrößen auf die Produktivität von Arbeitsverfahren ermittelt und Einsatzbereiche für die jeweiligen Betriebsmittel abgeleitet. Eine Bewertung des Einsatzbereiches ergibt sich aus dem Zeitverbrauch, dem homogenen bzw. störungsfreien Arbeitsablauf, der Produktivität sowie der Bearbeitungsqualität.
2. Ein weiteres Teilziel besteht darin, die wirtschaftliche Bedeutung dieser Arbeitsverfahren der Bestandsbegründung zu klären und Investitionsentscheidungen für den Forstbetrieb deduzieren zu können. Daher richtet sich eine Verfahrensauswahl nach dem ökonomischen Minimalprinzip. Für eine Bewertung sind Zeitbedarfswerte in einem Planzeitkatalog und Geräte- sowie Pferdearbeitsstundenkalkulationen zu erstellen und somit die Ökonomie der Arbeitsverfahren gegenüberzustellen.
3. Das dritte Untersuchungsziel lässt sich aus dem zunehmenden Anspruch der Gesellschaft bzgl. der ökologischen Auswirkung von Arbeitsverfahren ableiten. Hier sollen bodenökologische Untersuchungen im Pferdehufabdruck und in der Fahrspur eines Schleppers Auskunft über die Strukturveränderung des Waldbodens durch die jeweiligen Zugmittel geben. Darüber hinaus ist die Erfassung von mechanischen Verletzungen an Stammteilen und Wurzeln des Fichtenbestandes durchzuführen, um diesen Aspekt vor dem Hintergrund der Bestandsstabilität der Fichtenreinbestände zu ergänzen.
4. Abschließendes Teilziel ist die Analyse arbeitsphysiologischer Aspekte für Mensch und Tier innerhalb der Arbeitsverfahren. Es soll geprüft werden, inwiefern die durch den Pferdeführer erbrachten Leistungen ohne gesundheitliche Beeinträchtigungen über die Dauer einer Arbeitsschicht hinweg gehalten werden können. Bei den Pferden werden die auftretenden Zugkräfte in Abhängigkeit von den Betriebsmitteln und Arbeitsbedingungen herangezogen. Die Auswirkung auf die körperliche Beanspruchung der Pferde und die sich daraus ergebende Beurteilung der tiermedizinischen Grenzbereiche entsprechender Tätigkeiten erfolgen über die Erfassung von Herzfrequenzen und Blutlaktat.

Die Zielsetzung soll sich in diesem Bereich der Verfahrensbewertung darauf beschränken, aus den Ergebnissen der Feldversuche Anforderungen an die Arbeitsverfahren abzuleiten.

Aus der komplexen inhaltlichen Fragestellung folgt in methodischer Hinsicht die Notwendigkeit, entsprechende Daten aus Feldstudien kombiniert und integrativ zu erheben und hinreichend

genau zu dokumentieren. Hieraus ergibt sich die Pflicht, ein Erhebungskonzept für Feldstudien zu entwickeln, das eine praxisnahe Datenerhebung im Gelände erlaubt. Es soll geprüft werden, inwiefern bisher einzeln angewandte Messmethoden gleichzeitig nebeneinander eingesetzt werden können.

Mit Sicherheit kann der als äußerst komplex dargelegte Problemkreis mit einer Reihe von Ergebnissen zu Einzelfragen nicht als gelöst angesehen werden. Aus den gewonnenen Erfahrungen der vorliegenden Untersuchung können Hinweise auf künftige Forschungsaufgaben dieses Themengebietes abgeleitet werden.

## 3 Untersuchungsgegenstand

### 3.1 Arbeitssystem

Ein Vergleich von Arbeitsverfahren mit einer abschließenden Bewertung macht es erforderlich, zunächst das Arbeitssystem näher zu beleuchten.

Der arbeitende Mensch bildet zusammen mit dem im Sinn der Arbeitsaufgabe eingesetzten Betriebsmittel und der Arbeitsumgebung ein entsprechendes Arbeitssystem (vgl. REFA, 2004). In dieser Systematik werden Tiere wie z. B. Zugpferde als Lebewesen eher den Menschen zugeordnet und nicht als Betriebsmittel verstanden. Innerhalb der soziotechnischen Systeme werden diese Arbeitssysteme in die Technisierungsstufe der (tierisch gestützten) manuellen Arbeit eingegliedert (vgl. ROPOHL, 1999 sowie ERLER, 2000).

Im Fokus der vorliegenden Untersuchung standen zwei Arbeitssysteme mit den verschiedenen Arbeitsaufgaben der Bodenvorbereitung und der kombinierten Rillensaat. Des Weiteren unterscheiden sich die Arbeitssysteme in den Arbeitsverfahren, da jeweils unterschiedliche pferdegezogene Betriebsmittel zum Einsatz kamen.

Der Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit besteht aus den fünf Grundelementen Arbeitsaufgaben, Betriebsmittel, Arbeitsbedingungen, Pferdeführer und Zugpferde.

### 3.2 Arbeitsaufgaben

Die grundlegende Arbeitsaufgabe der Buheckern-Vorausaat im Rahmen der Umwandlung von Fichtenreinbeständen liegt in der schematischen Freilegung des Mineralbodens als Keimbett, der Ausbringung der Buheckern sowie der anschließenden Abdeckung von Saatplätzen bzw. Saatreihen.

Wie bereits erwähnt, standen zwei Arbeitssysteme mit verschiedenen Arbeitsaufgaben im Mittelpunkt dieser Untersuchung, die Bodenvorbereitung und die kombinierte Rillensaat.

Bei der Bodenvorbereitung kamen zwei pferdegezogene Aggregate zum Einsatz, die den Mineralboden freilegten, indem sie die organische Auflage sowie den Bewuchs abschälten. Die Intensität der Bearbeitung war abhängig von den Gespannbewegungen. Hierbei handelte es sich um ein systematisches Vorgehen, bei dem zwei Streifenpflüge unterschiedlicher Bauart verwendet wurden. Eine detaillierte Beschreibung der Versuchsgeräte ist dem Kapitel 3.3 zu entnehmen. Im Anschluss an die Bodenbearbeitung erfolgte in schematischen Reihen die manuelle Ausbringung der Buheckern und deren Übererdung. Dies wurde von einem Forstwirt selektiv unter Verwendung eines Garten-Dreizacks durchgeführt, um die ggf. verregnete, bindige oder verdichtete Kontaktfläche zwischen Saatgut und Mineralboden zusätzlich aufzurauen und somit eine günstigere Ausgangssituation für die Keimwurzeln zu schaffen.

Die Rillensaat erfolgte mit pferdegezogenen Arbeitsmitteln, die je nach Bauart eine Furche im Mineralboden herstellten, das Saatgut darin ablegten und dieses abschließend übererdeten. Die Saat wurde somit schematisch in einem Arbeitsgang durchgeführt. Zur Anwendung kamen drei Aggregate für den Pferdezug, die jeweils unterschiedliche Konstruktionen aufwiesen (vgl. Kapitel 3.3).

Der Pferdeführer bearbeitete die ausgewiesenen, rechteckigen Teilflächen von 0,1 ha mit dem Gespann [Pferd(e) und Betriebsmittel] spiralförmig von außen nach innen. Im Zentrum der Teilfläche angelangt, erfolgte nach ausreichendem Bearbeitungsgrad die Umsetzung in die nächste, in der Regel benachbarte Fläche.

Neben der dargestellten Bearbeitung der Bestandsfläche zählten zu den Aufgaben des Pferdeführers einfache Reparaturen an den Betriebsmitteln inkl. Geschirr der Pferde, logistische Arbeiten wie z. B. die Bereitstellung von Saatgut sowie die manuelle, partielle Räumung der zu bearbeitenden Teilflächen (Horste) von Schlagabraum.

### 3.3 Betriebsmittel

#### 3.3.1 Streifenpflüge

##### 3.3.1.1 Eberswalder Streifenpflug

Der *Eberswalder Streifenpflug* ist ein Forststreifen-Grindel-Karrenpflug, der von der Firma GRUBE KG aus Hützel für den Pferdezug und in einer Schlepperzugvariante vertrieben wird. Neben der Bodenvorbereitung zur Saat wird dieser Streifenpflug auch für die Vorbereitung von Pflanzplätzen bzw. -reihen und zur Förderung der Naturverjüngung genutzt. Ursprünglich für den Einsatz in vergrasteten Kiefernbeständen entwickelt, geht die Einbindung in diese Untersuchung zurück auf Empfehlungen anlässlich einer Tagung im Forstamt Hilchenbach (vgl. LANDESFORSTVERWALTUNG NORDRHEIN-WESTFALEN, 1997). Die Abbildung 1 zeigt den *Eberswalder Streifenpflug*, wie er im Rahmen der Versuche Verwendung fand.

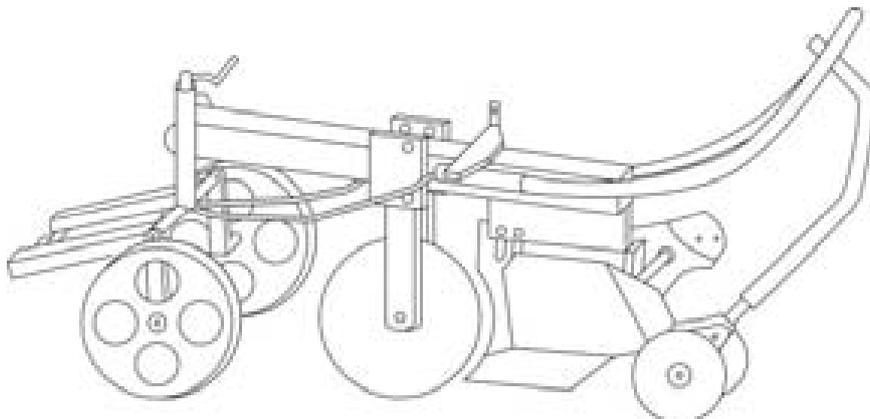


Abbildung 1: *Eberswalder Streifenpflug* für den Pferdezug

Das Gerät ist mit einem Pflugschar und vorgeschaltetem Scheibenkolter ausgestattet, welcher ein mittiges Auftrennen der Bodendecke und ein Überrollen von Hindernissen ermöglicht. Das Schar hebt formbedingt beidseitig die Bodendecke an und legt sie um ca. 180° gewendet am Rand des ca. 40 cm breiten Streifens ab. Die Arbeitstiefe (bis 15 cm) ist abhängig von den Bodenverhältnissen und kann über eine am Vorderkarren befindliche Spindel eingestellt werden. Mit Hilfe einer luftbereiften Transportvorrichtung kann das Schar ausgehoben und ohne Bearbeitung gezogen werden.

Das Gerät wurde als Zweispanner mit einer Spielwaage eingesetzt, als Zugstränge kamen wie bei den übrigen Verfahren jeweils Polyamid-Monofil-Seile mit einem Dämpfungselement aus Naturgummi zum Einsatz. Die ausreichende Selbstführung des *Eberswalder Streifenpflugs* unter Fichte ermöglichte den Verzicht auf einen zusätzlichen Helfer, der Pferdeführer musste lediglich beim Wenden oder beim Überfahren von Hindernissen (Schlagabraum) korrigierend/stützend eingreifen.

### Übersicht 1: Technische Daten des *Eberswalder Streifenpfluges*

VERTRIEB :	GRUBE KG
EIGENMASSE :	150 kg
LÄNGE :	2.000 mm
BREITE :	550 mm
HÖHE :	780 mm (vo.)/ 680 mm (mi.)/ 1.100 mm (hi.)
PREIS (o. MwSt) :	1.983 €(2002)

#### 3.3.1.2 *Meinberg Wundstreifenpflug*

Der *Meinberg Wundstreifenpflug* ist ein Scheibenpflug, der von einem Forstbeamten des Staatlichen Forstamtes Bad Driburg speziell für den Umbau von Nadelholzreinbeständen in Mischbestände entwickelt wurde. Abbildung 2 zeigt den Wundstreifenpflug mit einer Einspanner-Deichsel.

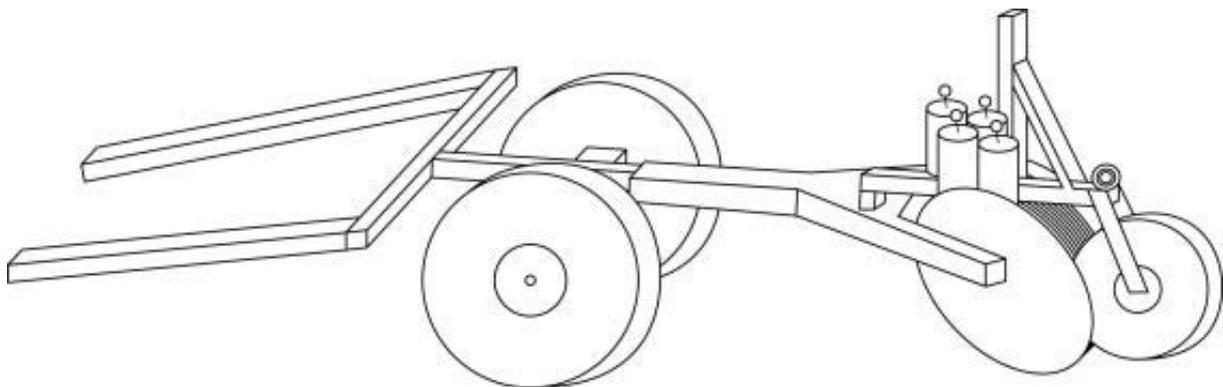


Abbildung 2: *Meinberg Wundstreifenpflug* für den Pferdezug

Das Gerät besteht aus einer Tragachse (Vorderwagen), an der sich eine höhenverstellbare Anhängervorrichtung befindet, an die der pflugscheibentragende Hinterwagen vertikal beweglich angekuppelt ist. Die zwei gewölbten Scheibeneggen sind im Winkel von 33° zur Achse gestellt. Die Scheiben zerschneiden rollend den Rohhumus und Grasfilz (Bodenauflage) und legen auf einer Breite von ca. 40 cm den Mineralboden frei. Die Tiefenwirkung (ca. 8 cm) ist durch den Scheibendurchmesser von 60 cm und deren Winkel zur Scheibenachse begrenzt. Der die Pflugscheiben tragende Hinterwagen kann in Abhängigkeit der Bodenverhältnisse zusätzlich mit bis zu maximal 125 kg beschwert werden.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde das Aggregat als Einspanner mit einer Scherbaum-Deichsel gefahren, optional kann dieses Gerät auch durch zwei Pferde gezogen werden.

## Übersicht 2: Technische Daten des *Meinberg Wundstreifenpfluges*

VERTRIEB :	Meinberg
EIGENMASSE :	150 kg (Optional: Zusatzgewichte)
LÄNGE :	1.800 mm
BREITE :	1.200 mm
HÖHE :	780 mm
PREIS (o. MwSt) :	2.556 € (2002)

### 3.3.2 Saataggregate

#### 3.3.2.1 *EggeSaat*

Dieses Aggregat basiert auf dem *Meinberg Wundstreifenpflug* (s. Kapitel 3.3.1.2), das durch die Montage des Anhängesaggregates *EggeSaat* erweitert wird. Die Anspannung erfolgte, wie beim einfachen Wundstreifenpflug, auch hier mit einem Pferd. In Abbildung 3 ist der *Meinberg Wundstreifenpflug* mit dem Anhängesaggregat *EggeSaat* dargestellt.

Die *EggeSaat* besteht aus einem Rahmen, der mit einer kurzen Deichsel am Scheibenteil des Wundstreifenengerätes montiert wird und auf zwei Rädern dem Scheibenpflug nachläuft. Durch ein Kugelgelenk wird erreicht, dass die gesamte Säeinheit horizontal und vertikal beweglich ist. Über der Achse dieses Anhängesaggregates ist der Saatgutbehälter aufgebaut, der ca. 5 kg Bucheckern fasst.

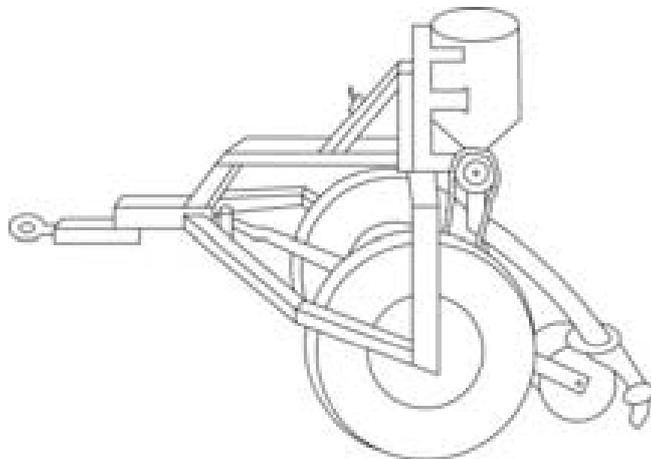


Abbildung 3: *EggeSaat* als Anhängesaggregat für den *Meinberg Wundstreifenpflug*

Die Bucheckern werden über ein Särad aus dem Saatbehälter in ein Plastikrohr befördert. Hierbei striegelt ein Pinsel die überzähligen Eckern vom Särad und verhindert somit ein Zerquetschen. Das aus Aluminium gefertigte Särad wird über einen Kettenantrieb der Achse bewegt. Der Antrieb ist über eine Nabenschaltung (konventionelle Fahrradtechnologie) regelbar, der Auswurf von Bucheckern kann somit problemlos der Geschwindigkeit des Gespanns angepasst werden. Durch ein Plastiksaatrohr werden die Bucheckern in eine durch zwei kleine, an einem vertikal beweglichen Saatarm befestigte Scheibenkolter gezogene Rille abgelegt, die mit einem nachlaufenden Striegel verschlossen wird. Die über eine Kettenarretierung zu variierende Arbeitstiefe beträgt je nach Bodenverhältnissen ca. 6 cm im freigelegten Mineralboden.

### Übersicht 3: Technische Daten der *EggeSaat* (ohne *Meinberg Wundstreifenpflug*)

VERTRIEB :	Meinberg
EIGENMASSE :	60 kg
LÄNGE :	1.700 mm
BREITE :	1.000 mm
HÖHE :	1.100 mm
PREIS (o. MwSt) :	900 € (2002)

#### 3.3.2.2 *ÖkoSat/U*

Die *ÖkoSat/U* ist eine Kombination aus Bodenbearbeitungseinheit und landwirtschaftlicher Drillmaschine, die u. a. für die Umwandlung von Nadelholzreinbeständen in Mischbestände entwickelt wurde.

Dieses schwere, zweiachsige Gerät ist für den ein- oder zweispännigen Pferdezug konzipiert. Vor allem beim Wenden werden hohe seitliche Scherkräfte auf die Flanken des Pferdes übertragen. Um dem entgegenzuwirken, wurde im Rahmen der Versuche der *ÖkoSat/U* ein einachsiger Rückewagen vorgeschaltet, der als „Vorderwagen“ diese Kräfte minimiert. Bei Wendemanövern läuft die *ÖkoSat/U* dem Rückewagen in der Spur hinterher. Die Anspannung der Pferde erfolgte über eine Spielwaage vor dem Vorderwagen mit Deichsel. Das modifizierte Aggregat ist in Abbildung 4 dargestellt.

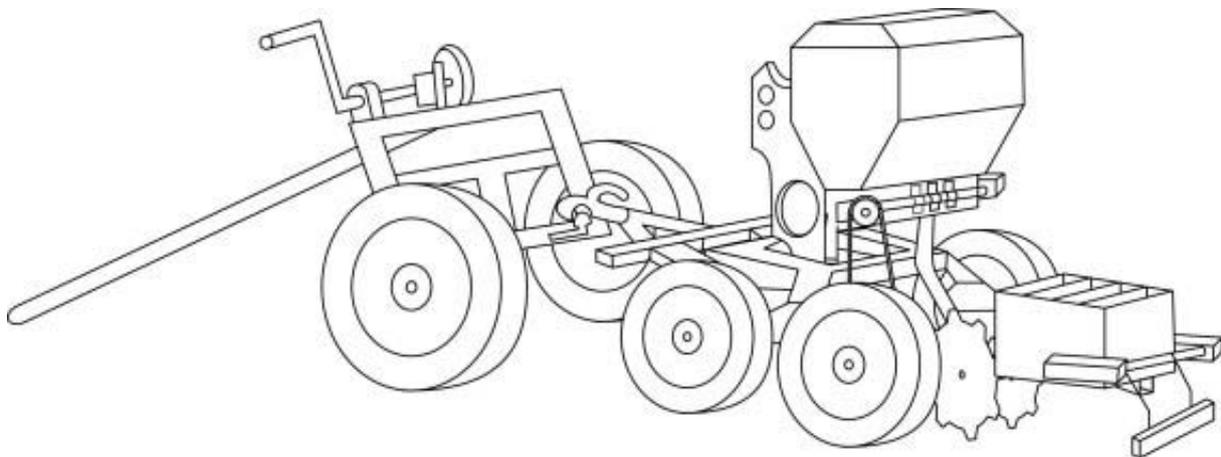


Abbildung 4: *ÖkoSat/U* in Kombination mit einem Rückewagen

Das Gerät besteht aus einem stabilen Rahmen, an dem zwei pendelnd gelagerte Starrachsen mit Stollenrad-Reifenkombinationen befestigt sind. Durch die Achslagerung wird eine ständig optimale Boden Anpassung erreicht. Zwischen den beiden Achsen ist der großvolumige und unterteilbare, d. h. mischfähige Saatgutbehälter mit einem Fassungsvermögen von ca. 40 kg Buheckern befestigt. Die Säeinheit wird über einen Kettenantrieb bewegt. Die Saatgutdosierung geschieht durch ein entsprechendes Säräd, eine regelbare Übersetzung sowie einen Dosierschieber im Saatgutbehälter. Die Buheckern werden über Säräder in ein Plastikrohr befördert und fallen in eine Bodenrinne, die durch zwei gezackte und V-förmig angeordnete Scheibeneggen an einem vertikal frei beweglichen Tragarm gezogen wird. Die Zahnung der Scheibenegge erhöht zum einen die Schnittkraft und sorgt zum anderen für verbesserte Dreheigenschaften und somit für eine Verringerung des Zugwiderstandes. Die von den örtlichen Stand-

ortverhältnissen abhängige Ablagetiefe der Eckern von ca. 7 cm kann über eine Beschwerung des Tragarms mit Gewichtsscheiben angepasst werden. Die Saatrille wird durch einen nachlaufenden Plastikstriegel übererdet.

#### Übersicht 4: Technische Daten der *ÖkoSat/U* (einschließlich Rückewagen)

VERTRIEB :	ehem. Arbor-Seda-Forstl
EIGENMASSE :	ca. 450 kg
LÄNGE :	1.450 mm
BREITE :	1.200 mm
HÖHE :	1.350 mm
PREIS (o. MwSt) :	9.950 € (1998)

#### 3.3.2.3 *Weilmünster Waldgrubber* mit Säeinheit

Dieses Aggregat basiert auf dem *Weilmünster Waldgrubber*, der für die Bodenvorbereitung mit fünf Federzinken ausgestattet ist. Für die zweireihige Rillensaat ist zusätzlich eine Säeinheit aufgebaut.

Der *Weilmünster Waldgrubber* besteht aus einem Tragrahmen, der auf zwei handelsüblichen PKW-Rädern und einem Stützrad (Schwerlastlenkrad) läuft. Die drehbare Lagerung von Deichselmaul und Spielwaage vermeidet eine Übertragung von auftretenden Erschütterungen und Bewegungen des Aggregates auf das Pferd. Des Weiteren ermöglicht sie eine Schwenkbarkeit um bis zu 90°, wodurch Wendemanöver auf engstem Raum realisiert werden können. Das Gerät ist für den einspännigen Einsatz ausgelegt, es kann wahlweise auch zweispännig gezogen werden. Abbildung 5 zeigt den *Weilmünster Waldgrubber* mit aufgebauter Saatvorrichtung und Einspanner-Scherbaum-Deichsel.

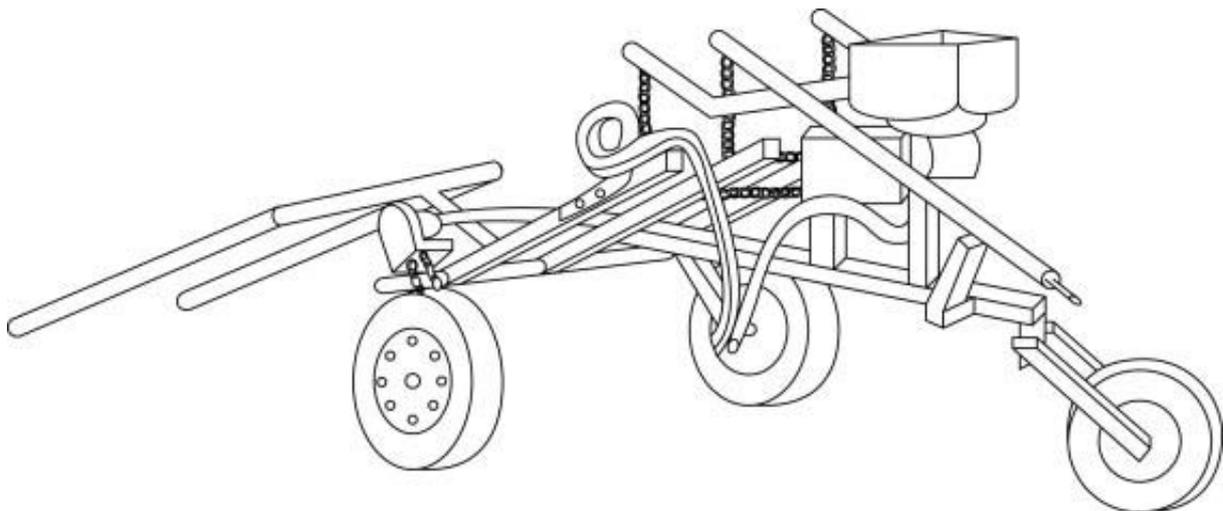


Abbildung 5: *Weilmünster Waldgrubber* mit aufgebautem Saataggregat, die drei nicht für die Saat zu verwendenden Grubberzinken wurden demontiert

Die Sämaschine basiert auf zwei einzelgelagerten Schwingarmen mit je einer Federzinke, die als Grubberschar ausgebildet ist. In Abhängigkeit von der Bodenart bzw. der Bodenvegetation kann die Eingrifftiefe der Federzinken durch eine Höhenverstellung der Tragarme variiert wer-

den. Der Vorratsbehälter fasst 3–4 kg Bucheckern. Durch eine kettengetriebene Samendosier-  
vorrichtung fallen die Eckern über zwei Auslaufrohre in die von den Federzinken gezogenen  
Rillen und werden direkt in den Mineralboden eingearbeitet. Dieses Aggregat produziert zwei  
ca. 2–3 cm tiefe Saatreihen mit einem Abstand von 0,8 m.

### Übersicht 5: Technische Daten des *Weilmünster Waldgrubbers* mit Säeinheit

<b>HERSTELLER :</b>	Metall und Gerätebau Rühl
<b>EIGENMASSE :</b>	340 kg
<b>LÄNGE :</b>	3.240 mm
<b>BREITE :</b>	1.760 mm
<b>HÖHE :</b>	1.680 mm
<b>PREIS (o. MwSt) :</b>	6.974 € (2002)

## 3.4 Arbeitsbedingungen

### 3.4.1 Auswahlkriterien der Versuchsbestände

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen fanden in Fichten-  
reinbeständen des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen statt. Aufgrund des hohen Anteils der  
Fichte an der Baumartenverteilung im Eggegebirge wurden bei einer Vorauswahl vor allem  
Flächen in den staatlichen Forstämtern Paderborn und Bad Driburg berücksichtigt. Hierbei  
konnten mögliche Versuchsbestände für die Bucheckern-Vorausfaat begutachtet und gemäß  
einem vorab erstellten Kriterienkatalog (vgl. Tabelle 1) mit den Dezernenten der Forstämter  
und den Revierleitern diskutiert sowie entsprechende Flächen der Feldversuche festgelegt  
werden.

**Tabelle 1: Kriterien der Bestandsauswahl für die Versuchsdurchführung**

Bestandsparameter	Kriterien für die Bestandsauswahl
Mischungsform	Fichtenreinbestand mit 90–100 % Fichte
Hangneigung	max. 30 % (schwach bis stark geneigt)
Standort	Wasserhaushalt: mäßig frisch bis frisch Oberboden: geringer Skelettanteil
Stammzahl	400–500/ha Mittlerer Stammabstand: 4–5 m
Bestockungsgrad	≤ 0,8
Relative Beleuchtungsstärke	bis 20 % der Freifläche
Alter der Fichte	80 Jahre und älter
Bewuchs	mäßig bis gering
Stöcke	geringe Anzahl, kein frisch durchforsteter Bestand
Schlagabraum	geringer Anteil, kein frisch durchforsteter Bestand
Flächengröße	mindestens 10 ha zusammenhängende Fläche, auf denen dem Mi- schungsanteil entsprechend, ca. 30 Horste (à 0,1 ha) besät werden

### 3.4.2 Der Wuchsbezirk *Egge*

#### 3.4.2.1 Klimatische Rahmenbedingungen

Die Untersuchungen wurden in Flächen der Staatlichen Forstämter Bad Driburg und Paderborn (Nordrhein-Westfalen), dort in den Forstbetriebsbezirken Torfbruch und Klusweide durchgeführt. Die Versuchsfelder in beiden Forstämtern gehören zum Wuchsgebiet Weserbergland. Innerhalb dieses Wuchsgebietes werden die Untersuchungsflächen dem Wuchsbezirk *Egge* zugeordnet.

Die mittlere Jahrestemperatur beträgt in der *Egge* 7,5–8,5 °C, während der Vegetationszeit liegt die mittlere Lufttemperatur bei 13,5–14,5 °C. Die Dauer der Vegetationszeit (Temperaturen > 10 °C) dauert 140–150 Tage. Die mittlere Jahresschwankung der Temperatur beläuft sich auf 16,0–16,5 °C. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 900–1.200 mm, davon fallen 400–500 mm während der Vegetationszeit (AG STANDORTSKARTIERUNG, 1985).

Die Witterung im Untersuchungszeitraum war gekennzeichnet durch einen zu nassen, kühlen April 2001, dem ein sommerlicher Mai folgte. Zum Versuchsbeginn am 3. Mai wurde mit 25 °C die höchste Temperatur des Frühjahrs 2001 verzeichnet. Im Verlauf des ersten Versuchstages trat in Ostwestfalen ein heftiges und für diese Jahreszeit seltenes Gewitterereignis ein. Der 4. Mai zeigte mit nur knapp über 4 °C die niedrigsten Temperaturen des Monats. Im weiteren Verlauf des Monats Mai herrschte – mit einer Unterbrechung vom 17. bis 20. Mai – gutes Frühlingswetter ohne Niederschläge. Die durchschnittliche Niederschlagsmenge im gesamten Monat Mai lag auf der *Egge* mit 32,1 mm (Vorjahr: 44,3 mm) und Driburg mit 36,9 mm (Vorjahr: 43,9 mm) erheblich unter dem langjährigen Durchschnitt von 84,4 mm. Die Durchschnittstemperaturen betragen auf der *Egge* 13,2 °C (Vorjahr: 14,0 °C), in Driburg 13,6 °C (Vorjahr: 14,1 °C) im Vergleich zum langjährigen Mittel von 11,7 °C. Der Mai war damit zu trocken und zu warm (OWL, 2001). Weitere Angaben sind im ANHANG I aufgeführt.

Detaillierte Angaben entsprechender Jahreskennwerte lieferte die Klimastation Bad Driburg (195 m ü. NN) im Wuchsbezirk *Egge* (vgl. POLLMANN, 2005). Die Witterung in den Jahren 2000–2002 wich deutlich vom langjährigen Mittel ab (vgl. Tabelle 2). Die mittlere Jahrestemperatur fiel in den Jahren um gut 1 °C höher aus als im 30-jährigen Mittel. In den Vegetationsperioden zeigten sich darüber hinaus ebenfalls in jedem Jahr erhöhte Temperaturen im Vergleich zum Mittel des Zeitraums von 1961–1990.

**Tabelle 2: Jahresmittelwerte der Lufttemperatur und Niederschlagsmengen der Klimastation Bad Driburg für den Zeitraum 1960–1990 und die Jahre 2000 bis 2004 (Quelle: POLLMANN, 2005)**

	1961–1990	2000	2001	2002
<b>Lufttemperatur im Tagesmittel [°C]</b>	8,1	9,6	8,9	9,2
<b>Lufttemperatur in der Vegetationszeit (Mai–Sept.) [°C]</b>	14,3	15,0	14,9	15,3
<b>Niederschlag pro Jahr [mm]</b>	1.098	1.149	1.185	1.380
<b>Niederschlag in der Vegetationszeit (Mai–Sept.) [mm]</b>	432	456	497	539

Die Jahresniederschlagssumme in den ersten zwei Jahren des betrachteten Untersuchungszeitraums fiel mit 1.149 mm und 1.185 mm höher aus als das langjährige Mittel, was in etwa der Menge eines durchschnittlichen Monats entspricht. Das Jahr 2002 war um ca. 26 % feuchter als der Rest des Bezugszeitraums. In den Vegetationsperioden konnten vergleichbare Zunahmen des Niederschlags verzeichnet werden. Im Vergleich zum 30-jährigen Mittelwert betragen die Anteile der Niederschlagsmengen während der

trugen die Anteile der Niederschlagsmengen während der Vegetationszeit im Beobachtungszeitraum ebenfalls ca. 40 %.

### 3.4.2.2 Geologie und Boden

Geologisch sind die Versuchsabteilungen von Sandsteinen der Unterkreide geprägt. Als Bodenartengruppe haben sich unterschiedlich frische Sandlehme entwickelt. Der Auflagehumus in den ausgewählten Fichtenbeständen schwankt von rohhumusartigem Moder bis zum Rohhumus in unterschiedlicher Mächtigkeit. Die Nährstoffversorgung kann als mäßig bis gut bezeichnet werden.

Der Hainsimsen-Buchenwald (*Luzulo luzuloidis-Fagetum*) und der Perlgras-Buchenwald (*Melico-Fagetum*) bilden die natürlichen Waldgesellschaften (vgl. AG STANDORTSKARTIERUNG, 1985).

### 3.4.3 Versuchsbestände

#### 3.4.3.1 Versuchsbestand I (FoA Bad Driburg)

Die für die Hauptstudie ausgewählte Abteilung 198 A im Forstbetriebsbezirk Torfbruch liegt in einer submontanen Höhenstufe bei ca. 400 m über NN, die Hangneigung beträgt in Exposition Südwest bis West 6–8 %. Auf der 27 ha großen Bestandsfläche stockte ein geschlossener, lückig bis gedrängter Fichten-Reinbestand im Alter von 78 Jahren. Zusätzlich wies der Bestand zwei Unterflächen von je ca. 2 ha Größe mit Japanischer Lärche und Fichte mit Rotbuchen-Voranbau (A) sowie Fichte, Japanischer Lärche und Sitkafichte (B) auf. Der Bestockungsgrad betrug bei der Fichte (Ertragsklasse II) 0,8. Der Vorrat belief sich auf 340 fm/ha. Die Fichte war zu 70 % vom Rotwild geschält. Der rohhumusartige Moder hatte eine mittlere Mächtigkeit von 7,7 cm. In lichterem Bestandsteilen war vereinzelt eine 1- bis 2-jährige Fichtennaturverjüngung anzutreffen.

Der letzte Einschlag in der Fichte mit durchschnittlich 53 Efm/ha lag vier Jahre zurück. Im Jahr 1999 erfolgte in der Abteilung bereits eine Voraussaat auf Kleinflächen. Diese Saat wurde nicht gezäunt, was schon in einem frühen Stadium zu einem erheblichen Ausfall hauptsächlich durch Schwarzwild führte. Zum Zeitpunkt der vorliegenden Versuche waren nur vereinzelt zweijährige Buchen aufzufinden.

Bei der Abgrenzung der einzelnen Versuchsflächen im Bestand musste eine vorgesehene, systematische Feinerschließung im Gassenabstand von 30 m berücksichtigt werden. Bei der Flächenauswahl und der Zuordnung der Arbeitsverfahren wurden die in Tabelle 3 dargestellten Parameter erfasst und mit einbezogen.

Die mittlere Stammzahl der Teilfläche betrug 380/ha. Dies entsprach einem durchschnittlichen Stammabstand von 5,1 m, wodurch eine ausreichende Beweglichkeit mit den eingesetzten Aggregaten gegeben war. Der mittlere BHD betrug 34,1 cm ( $SP = 1.530$ ;  $SD = 7,42$ ). Die Anzahl der als Hindernis anzunehmenden Stöcke schwankte auf den ausgewählten Teilflächen zwischen 37 und 63, betrug also im Mittel 46 Stöcke pro Teilfläche. Durchschnittlich waren 10,9 % der Fläche von 0,1 ha mit Schlagabraum (Kronenmaterial und Äste) der vergangenen Eingriffe bedeckt. Die Hiebsreste untergliederten sich in diesem Bestand in 71,3 % Kronenmaterial und 28,7 % Astmaterial. Die Frische des Schlagabraumes wurde für die eingesetzten Verfahren gemäß des Kriterienkatalogs (vgl. Tabelle 1) als unbedenklich eingestuft.

**Tabelle 3: Arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung der Parameter zur Charakteristik der Teilflächen (0,1 ha) im Versuchsbestand I (FoA Bad Driburg)**

Verfahren	Stammzahl		Anzahl Stöcke		Deckung Kronenreste [m <sup>2</sup> ]		Deckung Äste [m <sup>2</sup> ]	
	MW <sup>a)</sup>	SD <sup>b)</sup>	MW	SD	MW	SD	MW	SD
<i>Eberswalder Streifenpflug</i>	36	5,35	37	6,54	48,9	18,97	24,1	9,74
<i>Meinberg Wundstreifenpflug</i>	42	7,25	39	8,96	91,7	18,32	27,6	13,87
<i>EggeSaat</i>	39	6,21	63	9,15	79,4	22,67	45,2	31,12
<i>ÖkoSat/U</i>	39	3,42	50	3,96	122,8	25,34	38,6	25,81
<i>Weilmünster Waldgrubber</i>	36	3,83	41	8,03	46,6	25,08	20,8	13,07
<b>GESAMT</b>	<b>38</b>	<b>5,56</b>	<b>46</b>	<b>12,11</b>	<b>77,8</b>	<b>35,66</b>	<b>31,3</b>	<b>21,5</b>

Stichprobenumfang (SP) = 8  
<sup>a)</sup> Arithmetischer Mittelwert (MW)  
<sup>b)</sup> Standardabweichung (SD)

Die in Tabelle 3 dargestellte Übersicht zeigt die Ausgangssituation. Hierbei waren die Flächen mit geringerem Schlagabraum den Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* (5,8 %) und *Weilmünster Waldgrubber* (6,0 %) vorbehalten. Die Flächen für das Verfahren *ÖkoSat/U* wiesen mit 16,1 % den größten Flächenanteil an Schlagabraum auf, die Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* und *EggeSaat* lagen zwischen den Extrema. Näheres zur Auswahl einzelner Teilflächen für die entsprechenden Arbeitsverfahren ist dem Kapitel 4.3 zu entnehmen.

### 3.4.3.2 Versuchsbestand II (FoA Paderborn)

Der zweite Versuchsbestand wurde im Bereich des Staatlichen Forstamtes Paderborn ausgewählt. Die Abteilung 493 befindet sich im dortigen Forstbetriebsbezirk Klusweide. Die Fläche liegt mit 410 m über NN in der submontanen Höhenstufe und ist nach Nordosten schwach bis stark geneigt (6–30 %; Schatthang). Die nördliche Abteilungsgrenze ist durch einen Hang mit einem Bachgrund im Nordwesten vorgegeben. Auf 90 % der insgesamt 15 ha großen Bestandsfläche stockten gedrängt bis locker 80-jährige Fichten mit einer einzelstamm- bis gruppenweisen Einmischung von 75-jähriger Japanischer Lärche. Der 0,2 ha große Bachgrund war mit Birke (80-jährig) und Fichte (52-jährig) bestockt. Der Bestockungsgrad des Hauptbestandes betrug bei zweiter Ertragsklasse 0,9. Die Fichte war zu 81–90 % vom Rotwild geschält und wies über 50 % Rotfäule auf. Beim Auflagehumus handelte es sich um einen Rohhumus mit einer durchschnittlichen Mächtigkeit von 8,7 cm. Vereinzelt war ein- bis zweijährige Fichtennaturverjüngung anzutreffen.

Die letzte Holzerntemaßnahme fand auf ca. 13,4 ha im FWJ 2000 statt. Die Eingriffsstärke in der Fichte belief sich auf ca. 61 Efm/ha und die einzelstammweise Nutzung der Japanischen Lärche auf durchschnittliche 3 Efm/ha.

Der Bestand war systematisch mit Rückegassen im Abstand von 30 m erschlossen. Die Feinerschließung, Lärcheneinmischung und die kleinstandörtlichen Besonderheiten beeinflussten die räumliche Anordnung der Teilflächen im Versuchsbestand. Der aus dem Vorjahr stam-

mende Schlagabraum wies deutlich mehr Feinastmaterial auf als im Versuchsbestand I. Dadurch wurde die Abgrenzung homogener Flächen für die Verfahrenszuordnung erschwert.

Aus den Flächenaufnahmen ergab sich eine mittlere Stammzahl von 300/ha, dies entsprach einem durchschnittlichen Stammabstand von 5,7 m. Der mittlere BHD des aufstockenden Bestandes betrug 37,1 cm ( $SP = 1.185$ ;  $SD = 8,10$ ). Wie in Tabelle 4 dargestellt, wurden im Mittel 29 Stöcke pro Teilfläche als Hindernis erfasst. Diese im Vergleich zum Versuchsbestand Bad Driburg um 17 Stöcke geringere Anzahl bei niedrigerer Stammzahl war darauf zurückzuführen, dass sich unter dem frischeren, häufig noch benadelten Schlagabraum Stöcke fanden, die nicht zusätzlich erfasst wurden, da bereits das Kronenmaterial als Hindernis angesprochen und vermessen wurde. Durchschnittlich betrug der mit Schlagabraum bedeckte Flächenanteil in diesem Versuchsbestand  $262,7 \text{ m}^2/0,1 \text{ ha}$  und damit ca. 15 % mehr als im Versuchsbestand I. Dabei entfielen 68,3 % auf Kronenmaterial und 31,7 % auf Astmaterial, was annähernd dem Verhältnis im Versuchsbestand I entsprach. Der Schlagabraum war – wie bereits angemerkt – wesentlich frischer als in der ersten Bestandsvariante, so dass eine höhere Behinderung der Arbeitsverfahren zu erwarten war.

In Tabelle 4 ist die Ausgangssituation dargestellt. Hierbei waren wiederum die Flächen mit geringerem Schlagabraum den Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* (17,1 %) und *Eberswalder Streifenpflug* (19,1 %) vorbehalten. Im Mittel betrug der mit Hiebsresten bedeckte Flächenanteil dieser Verfahren gut das Dreifache des Bestandes I. Die Teilflächen des Verfahrens *ÖkoSat/U* wiesen auf nahezu 39,4 % der Fläche Abraum der vergangenen Hiebsmaßnahmen auf. Die Verfahren *EggeSaat* ( $270,2 \text{ m}^2$ ) und *Meinberg Wundstreifenpflug* ( $287,1 \text{ m}^2$ ) lagen annähernd im mittleren Bereich der Ausprägungen. Zur Flächenzuordnung der Arbeitsverfahren gemäß der den Arbeitsablauf behindernden Faktoren siehe auch Kapitel 4.3.

**Tabelle 4: Arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung der Parameter zur Charakteristik der Teilflächen (0,1 ha) im Versuchsbestand II (FoA Paderborn)**

Verfahren	Stammzahl		Anzahl Stöcke		Deckung Kronenreste [m <sup>2</sup> ]		Deckung Äste [m <sup>2</sup> ]	
	MW <sup>a)</sup>	SD <sup>b)</sup>	MW	SD	MW	SD	MW	SD
<i>Eberswalder Streifenpflug</i>	30	3,70	30	5,93	128,8	52,85	62,1	32,58
<i>Meinberg Wundstreifenpflug</i>	29	2,33	25	5,55	188,7	22,29	98,4	31,77
<i>EggeSaat</i>	30	3,2	30	7,03	184,3	35,00	85,9	45,73
<i>ÖkoSat/U</i>	27	2,67	28	6,70	267,2	48,02	127	47,17
<i>Weilmünster Waldgrubber</i>	33	4,49	30	8,11	128,4	21,08	42,4	21,84
<b>GESAMT</b>	<b>30</b>	<b>3,87</b>	<b>29</b>	<b>6,68</b>	<b>179,5</b>	<b>62,99</b>	<b>83,2</b>	<b>45,9</b>

Stichprobenumfang (SP) = 8  
<sup>a)</sup> Arithmetischer Mittelwert (MW)  
<sup>b)</sup> Standardabweichung (SD)

### 3.4.4 Zaunbau

Um den Auflauf der Buchensaat und die Entwicklung der Sämlinge sicherzustellen wurden die Versuchsfelder mit einem Pfostenzaun versehen. Durch diese Maßnahme sollte das von Schwarz-, Rot- und Rehwild ausgehende Wildrisiko ausgeschlossen werden.

Die Forstämter stellten im Vorfeld der Untersuchungen den Zaunbau in Form von Gatterblöcken unter Aussparung der Rückegassen sicher. Der Zaun umspannte die Versuchsfelder mit einem zusätzlichen Abstand von ca. 5 m, um eine ungehinderte Bearbeitung mit dem Pferdegespann gewährleisten zu können.

Im Versuchsbestand I entstand eine Scherenzaun-Konstruktion (Höhe: 1,80 m), die zusätzlich in Bodennähe mit Stacheldraht umspannt wurde, um ein Aufwühlen durch Schwarzwild zu verhindern. Insgesamt entstanden sieben Gatter mit einer Gesamtlänge von ca. 2.850 lfd. M.

Im Forstamt Paderborn wurden in der Versuchsabteilung zwei Pfostenzäune (Höhe: 2,20 m) mit einer Länge von ca. 2.000 lfd. M. gebaut und ebenfalls mit Stacheldraht in Bodennähe gesichert.

### 3.4.5 Saatgut

Das Rotbuchen-Saatgut für die Versuche wurde von der Forstbaumschule August Lüdemann (Frankfurt am Main) geliefert und entsprach der geforderten Herkunft 810 09 (Egge) aus autochthonen Beständen des Reifejahres 2000. Insgesamt standen 450 kg Saatgut zur Verfügung. Es wurde in zwei Chargen aussaatfertig geliefert, d. h. die Keimruhe war vollständig gebrochen. Die zeitnahe Lieferung kurz vor dem Aussaattermin erforderte lediglich eine kurze Zwischenlagerung bei 7 °C in den Kühlzellen der Forstbetriebsbezirke.

Um den angestrebten Mischungsanteil von 20–30 % Rotbuche in den Fichtenbeständen zu erreichen, sollten pro Teilfläche 5 kg Bucheckern ausgebracht werden.

Das Rotbuchen-Saatgut wies gemäß dem Begleitschein der Forstbaumschule Lüdemann die in der nachfolgenden Übersicht angeführte gute Qualität auf:

#### Übersicht 6: Qualität des Rotbuchen-Saatgutes

<b>Spezielle Reinheit:</b>	> 98 %
<b>Tausendkorngewicht:</b>	292,5 g
<b>Schnitt:</b>	ca. 80 %
<b>Anzahl der lebenden Keime je kg:</b>	2.735 Stück

### 3.5 Pferdeführer

Im Vorfeld der Untersuchung wurden mit Unterstützung der nordrhein-westfälischen Landesforstverwaltung sowie der Interessengemeinschaft Zugpferde e. V. (IGZ) mehrere Unternehmer zur Pferdearbeit schriftlich befragt. Es wurden Pferdeführer angeschrieben, die eigene Zugpferde besitzen und aus einem Umkreis von 200 km des Versuchsgebietes stammen. Inhalt der Befragung war u. a. der Einkommenserwerb (unterschieden nach Haupterwerbs- und Nebenerwerbstätigkeit), die Ausstattung (Pferde und Arbeitsgeräte), die Auslastung sowie die von ihnen veranschlagten Systemkosten. Es zeigte sich hierbei, dass nur wenige der Pferdeführer die Tiere regelmäßig einsetzten und sie zudem kaum Erfahrungen mit den Geräten zur

Bodenverwundung/Saat besaßen. Der Einsatzschwerpunkt der Kaltblutpferde lag vor allem bei temporären Einsätzen zur Holzbringung.

Aus fünf geeignet erscheinenden Dienstleistungsunternehmen wurde für die Durchführung der Versuche im Rahmen der Hauptstudie ein Pferdeführer ausgewählt, der neben langjähriger Erfahrung und entsprechender Sachkunde auch über leistungsfähige Pferde und eine gute Geräteausstattung verfügte. Ein weiterer Vorteil des ausgewählten Dienstleisters war, dass er seine Pferde nahezu täglich in der Forst- und Landwirtschaft einsetzte. Für die physiologischen Untersuchungen innerhalb dieser Studie konnte somit eine gute und der Arbeitsaufgabe entsprechende Kondition von Fuhrmann und Pferden unterstellt werden. Der Pferdeführer setzte die Pferde und entsprechenden Betriebsmittel bei den Arbeiten sehr effizient und schonend ein.

Zur weiteren Absicherung und um eine verallgemeinernde Interpretation der Untersuchungsergebnisse zu ermöglichen, wurde die körperliche Eignung des Probanden im Rahmen einer arbeitsmedizinischen und leistungsphysiologischen Eingangsuntersuchung überprüft (vgl. Kapitel 5.4.1.2.2).

### 3.6 Zugpferde

In der arbeitswirtschaftlich und physiologisch orientierten Hauptstudie (vgl. Kapitel 4.3) wurden zwei Rheinisch-Deutsche Kaltblutpferde (P1 und P2) aus dem Betrieb des Pferdeführers eingesetzt. Des Weiteren kam im Rahmen der Bodenuntersuchungen ein Westfälisches Kaltblut (P3) eines im Nebenerwerb tätigen Fuhrmanns zum Einsatz. Je nach Betriebsmittel wurde dieses ein- oder zweispännig gezogen (vgl. Kapitel 3.3). Nähere Angaben zu den Versuchspferden können Tabelle 5 entnommen werden.

**Tabelle 5: Angaben zu den eingesetzten Kaltblutpferden von 2001**

Pferd	Rasse	Geschlecht	Alter	Stockmaß [m]	Masse [kg]
<b>P1</b>	Rheinisch-Deutsches Kaltblut	Wallach	13	1,67	770
<b>P2</b>	Rheinisch-Deutsches Kaltblut	Wallach	5	1,64	720
<b>P3</b>	Westfälisches Kaltblut	Stute	5	1,66	750

Im Vorfeld der Hauptversuche bestätigte eine tierärztliche Untersuchung, dass die Pferde (P1 & P2) klinisch gesund waren und einen guten bis sehr guten Ernährungszustand aufwiesen. Die Rheinisch-Deutschen Kaltblüter befanden sich zum Zeitpunkt der Versuche aufgrund ihrer kontinuierlichen Arbeitseinsätze in einer sehr guten konditionellen Verfassung.

Die Pferde wurden an den Versuchstagen im Betrieb des Pferdeführers gefüttert, getränkt und angeschirrt (Kummet) in einem PKW-Pferdetransportanhänger zu den Versuchsfeldern befördert. Die Pferde arbeiteten je Tag in der Regel sechs Zeitstunden, wobei eine Mittagspause inkl. Fütterung von durchschnittlich 0,7–1,0 Stunden zusätzlich berücksichtigt werden musste.

Das hier vorgestellte Feldexperiment wurde bei der Bezirksregierung Detmold im April 2001 gemäß § 8a Tierschutzgesetz als Tierversuch angezeigt. Die tiermedizinischen Untersuchungen überwachten und unterstützten die Tierärztin Frau E. Moors und Frau Dr. sc. agr. B. Schäfer vom Institut für Haustiergenetik und Tierzucht der Georg-August-Universität Göttingen.

## 4 Versuchsablauf

### 4.1 Kooperationen im Studiendesign

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden vor der gesetzten Zielformulierung verschiedene, zeitlich entkoppelte Untersuchungen zur Bucheckernsaat in Fichtenreinbeständen durchgeführt. Während der maßgeblich von der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten/Landesamt für Agrarordnung (LÖBF/LAfAO) Nordrhein-Westfalen finanzierten Versuche wurden Kooperationen mit diversen Einrichtungen eingegangen.

Die Mitarbeiter der Forstämter unterstützten die Auswahl der Versuchsabteilungen und organisierten den Zaunbau sowie die durchzuführenden Handsaaten durch erfahrene Mitarbeiter. Vom Forstamt Bad Driburg wurden die Aggregate *Meinberg Wundstreifenpflug* und *EggeSaat* zur Verfügung gestellt.

Die Betriebsmittel *Eberswalder Streifenpflug*, *Weilmünster Waldgrubber* mit Saataggregat und die *ÖkoSat/U* konnten vom Pferdeführer bereitgestellt werden. Für die gesamten Pferdearbeiten standen erfahrene Haupt- und Nebenerwerbs-Fuhrleute aus der weiteren Umgebung der Versuchsflächen zur Verfügung.

Bei Ernte, Bereitstellung sowie Qualitätsprüfung der unterschiedlichen Chargen des Rotbuchensaatguts herrschte eine Zusammenarbeit mit dem Forstamt Bad Driburg, der Forstgenbank (Dezernat 41 der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten Nordrhein Westfalen), der Forstbaumschule August Lüdemann (Frankfurt am Main) sowie der Niedersächsischen Forstsaatgut-Beratungsstelle im Forstamt Oerrel.

Bei den tierärztlichen Untersuchungen im Rahmen der Studien konnte auf das fachliche Know-how des Institutes für Tierzucht der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft in Mariensee (Niedersachsen) sowie auf die Unterstützung der Mitarbeiter aus dem Institut für Haustiergenetik und Tierzucht der Georg-August-Universität Göttingen zurückgegriffen werden.

Die Untersuchungen zur Bodenstrukturveränderung durch die eingesetzten Zugmittel erfolgten nach zahlreichen Besprechungen und evaluierenden Tests mit dem Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik – Department für Ökosystem- und Landschaftsmanagement des Wissenschaftszentrums Weihenstephan der TU München sowie dem Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Georg-August-Universität Göttingen.

In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse der Studien zur Buchensaat im engeren Sinn anhand der Vorversuche im Herbst 2000 (vgl. Kapitel 4.2) sowie der Hauptversuche im Frühjahr 2001 (vgl. Kapitel 4.3) vorgestellt. Erhebungen der quantitativen sowie qualitativen Erfolge dieser Saaten fanden im Herbst 2001 sowie Frühsommer 2002 statt. Ein separates Versuchsdesign mit vergleichenden Untersuchungen zur Änderung der Porenstruktur durch Befahrung (Forstschlepper) und Betritt (Zugpferd) kam im Sommer 2001 zur Anwendung.

### 4.2 Vorstudie

Im Oktober 2000 fanden die ersten kombinierten Vorversuche in ausgewählten Fichtenbeständen des Staatlichen Forstamtes Bad Driburg (Nordrhein-Westfalen) mit den Bodenverwundungs- und Saataggregaten für den Pferdezug statt. Die einzelnen Betriebsmittel konnten in dieser Versuchsphase ausgiebig vor dem Hintergrund der Arbeitsaufgaben und Erhebungsmethodik erprobt werden.

Im Rahmen dieser Versuchsanordnung wurde der Trainingszustand und die Zugbereitschaft der Pferde sowie der professionelle Umgang des Pferdeführers mit den Tieren durch eine Tierärztin und einem Mitglied der Interessengemeinschaft Zugpferde e. V. geprüft. Die ange-

troffenen guten Voraussetzungen waren von großer Bedeutung für die Erhebung der animalischen Beanspruchungsparameter sowie das Studium der Arbeitsabläufe der Frühjahrssaaten 2001.

Die Vorversuche dienten darüber hinaus der Evaluation und Etablierung der methodischen Ansätze der zu erhebenden Parameter.

### 4.3 Hauptstudie

Die organisatorische Vorbereitung und Abwicklung der Hauptstudie wurde im Anschluss an die Vorversuche innerhalb von sechs Monaten realisiert. In diesem Zeitraum wurden 40 Versuchsfelder von je 0,1 ha in den Forstämtern Bad Driburg und Paderborn (Nordrhein-Westfalen) ausgewählt und für die Untersuchungen im Mai 2001 vorbereitet, indem sie vermessen und ihre Ausprägungen bzgl. der Verfahrenszuordnung erfasst wurden (vgl. Tabelle 3 und 4).

Die das Verfahren behindernden Faktoren (Stammzahl, Stöcke, Schlagabraum und Äste) wurden gezählt bzw. vermessen. Die Stammzahl, der BHD sowie Baumhöhen wurden durch eine Vollaufnahme ermittelt, zudem wurden alle trittfesten<sup>1</sup> Stöcke mit einer Grundfläche > 78 cm<sup>2</sup> (entspricht einem Durchmesser von 10 cm) erfasst. Bei den Parametern Schlagabraum und Äste wurde die Deckung bestimmt und der Flächenanteil des Kronenmaterials als Behinderungsmerkmal berechnet. Die Zuordnung der Arbeitsverfahren auf die Flächen erfolgte nach der Aufnahme der oben genannten Parameter (vgl. Kapitel 3.4.3).

Grundsätzlich ist ein hoher Anteil an Schlagabraum für die Betriebsmittel *Weilmünster Waldgrubber* und *Eberswalder Streifenpflug* ein bedeutendes Hindernis (vgl. u. a. KWF, 1999; LANDESFORSTVERWALTUNG NORDRHEIN-WESTFALEN, 1997). Beim *Weilmünster Waldgrubber* mit Saataggregat setzen sich die Federzinken mit Ästen und Kronenmaterial zu, es kann in diesem Fall keine kontinuierliche Saattrille gewährleistet werden. Mit zunehmendem Astmaterial sinkt der Bearbeitungsgrad des Verwundungsstreifens beim *Eberswalder Streifenpflug*, zudem bringt Kronenmaterial den Pflug leicht zum Kippen und unterbricht so den Arbeitsablauf. Bei den von Meinberg entwickelten Betriebsmitteln rollen die Scheiben des Pfluges über die Äste und Kronen, so dass die Freilegung des Mineralbodens nur mangelhaft gelingt oder ganz ausbleibt. Für das Betriebsmittel *ÖkoSat/U* sind keine Beeinflussungen des Arbeitsablaufs durch die genannten Schlagabraum-Hindernisse zu erwarten. Der aufstockende Bestand und die Stöcke schränken die Beweglichkeit des Arbeitsgerätes mit den Betriebsmitteln ein, bei Kollisionen mit diesen Hindernissen kann es zu Zugkraftspitzen, die oft ein Anhalten des Pfluges nach sich ziehen, sowie zu einer Beschädigung der verbleibenden Fichten kommen.

Bei der Verfahrenszuordnung wurde neben der Flächenausprägung die räumliche Lage der Flächen berücksichtigt, die mit gleichen Verfahren bestellt werden sollten. Die in einer nach innen führenden Spirale zu bearbeitenden Flächen (vgl. Kapitel 5.2.2) sollten möglichst nur ca. 5–8 m voneinander entfernt liegen, um kurze Umsetzzeiten und somit Praxisnähe gewährleisten zu können. Bei den Flächen für die streifenweisen Zeitstudien (vgl. Kapitel 5.2.2) wurde eine möglichst homogene Ausprägung bzgl. verfahrensbehindernder Faktoren angestrebt, ohne die Umsetzzeiten und damit die räumliche Nähe der Flächen zu präferieren.

Die Forstämter begannen nach der Auswahl und Markierung der Versuchsfelder im Bestand mit dem Zaunbau und stellten diesen zum Versuchsbeginn in der 18. Kalenderwoche 2001 fertig. Der Untersuchungszeitraum dieser Frühjahrssaaten erstreckte sich vom 03. bis 16. Mai

---

<sup>1</sup> Als „trittfest“ werden als Hindernis angesprochene Stöcke bezeichnet, die einem Fußtritt standhalten, ohne ihre Lage und Standhaftigkeit zu verändern.

2001 über je fünf Tage in einem der genannten Forstämter. Aufgrund des versuchsbedingten Aufwands (Umbau der Messtechnik, Blutentnahmen bei den Pferden etc.) wurde pro Tag ein Arbeitsverfahren auf insgesamt acht Teilflächen von je 0,1 ha eingeplant. Daraus ergab sich der in Tabelle 6 näher dargestellte Ablaufplan der durchgeführten Untersuchungen mit den jeweiligen Bodenverwundungs- und Saataggregaten.

**Tabelle 6: Ablaufplan der durchgeführten Außenversuche**

	<i>Eberswalder Streifenpflug</i>	<i>Meinberg Wundstreifenpflug</i>	<i>EggeSaat</i>	<i>ÖkoSat/U</i>	<i>Weilmünster Waldgrubber</i>
<b>Versuchsbestand I (FoA Bad Driburg)</b>	Spiralige Bearbeitung von vier Teilflächen (praxisnah)				
	<i>Bearbeitung von 50 m langen Streifen für die Zeitstudien</i>				
	07. Mai 2001	03. Mai 2001	04. Mai 2001	08. Mai 2001	11. Mai 2001
<b>Versuchsbestand II (FoA Paderborn)</b>	Spiralige Bearbeitung von vier Teilflächen (praxisnah)				
	<i>Bearbeitung von 50 m langen Streifen für die Zeitstudien</i>				
	15. Mai 2001	09. Mai 2001	10. Mai 2001	14. Mai 2001	16. Mai 2001
<b>Pferde</b>	P1 & P2	P1	P1	P1 & P2	P1

#### 4.4 Studie zur Bodenstrukturveränderung

Die Untersuchungen zur Bodenstrukturveränderung fanden losgelöst von den oben erwähnten Hauptuntersuchungen vom 12.–14. Juni 2001 in einem den Kriterien der Bucheckern-Vorausfaat entsprechenden Fichtenbestand des Staatlichen Forstamtes Bad Driburg (NRW) statt.

In der Vorstudie wurde die Veränderung des Porenvolumens unter dem Pferdehuf sowie in der Spur der Aggregate (*Meinberg Wundstreifenpflug* und *ÖkoSat/U*) untersucht. Ein entsprechender Vergleich basierte auf der Entnahme von Bodenproben mit Stechzylindern, die im bodenkundlichen Labor des Institutes für Bodenkunde und Waldernährung der Georg-August-Universität Göttingen bezüglich ihrer Bodenwassercharakteristik untersucht wurden. Bei dem erforderlichen Stichprobenumfang war dieses Vorgehen in der Probenentnahme sowie der Laboraufbereitung enorm zeitaufwändig.

Aus den genannten Gründen kam das separate und von den eigentlichen Hauptversuchen abgekoppelte Versuchsdesign *Boden* zur Anwendung, das die Fahrspur eines für den Forst-einsatz aufgerüsteten landwirtschaftlichen Schleppers (MB-trac 900), den Hufabdruck eines Pferdes und eine ungestörte Referenzfläche vergleichend untersuchte (vgl. Kapitel 5.3.1.2). Eine mobile Messapparatur erfasste vor Ort jeweils die Luftpermeabilität einer definierten Bodenprobe. Hierzu wurde die Versuchsabteilung in zwei Parzellen aufgeteilt, von denen eine mit dem pferdegezogenen *Meinberg Wundstreifenpflug* und die andere mit der schleppergezogenen Variante bearbeitet wurde.

Als Pferdeführer kam in diesem Fall ein Unternehmer aus dem Einzugsgebiet des Forstamtes Bad Driburg mit dem Versuchspferd P3 zum Einsatz (vgl. Tabelle 5). Ein Dienstleistungsunternehmen der Region führte die Bearbeitung mit dem Schlepper durch, der mit Forstausrüstung, (Aufbau-)Doppeltrommelwinde und *Meinberg Wundstreifenpflug* eine Eigenmasse von 6.090 kg erreichte. Der Innendruck der Forstreifen (Typ Nokian 500/60-26,5; 12 PR; TRS-LS2) wurde eigens für eine Bearbeitung unter bodenschonenden Aspekten auf 0,5 bar abgesenkt.

## **5 Methodik**

### **5.1 Erhebungskonzept**

Eine vergleichende Bewertung der aufgeführten pferdegestützten Arbeitsverfahren vor dem Hintergrund ökonomischer, ökologischer und ergonomischer Aspekte stellte insbesondere im Rahmen der vorliegenden Felduntersuchungen komplexe Anforderungen an das Erhebungskonzept. Aus diesem Grund war es notwendig, verschiedene Methoden entsprechender Fachdisziplinen zu prüfen und diejenigen auszuwählen, die in einem kombinierten Versuchsdesign eine möglichst valide Datenbasis sichern konnten. Des Weiteren durften die einzelnen Erhebungen keinen Einfluss auf den Arbeitsablauf ausüben und mussten unter Feldbedingungen praktikabel sein.

Das im Rahmen dieser Arbeit zusammengestellte Instrumentarium kann aufgrund der umfangreichen methodischen Lösungsmöglichkeiten nicht als umfassend und ausschließlich betrachtet werden. Eine nähere Darlegung der Einbindung entsprechender methodischer Ansätze in das verwendete Instrumentarium findet bei der Vorstellung der Einzelkomponenten statt.

### **5.2 Arbeitsablaufstudien**

#### **5.2.1 Ausrichtung der Arbeitszeitstudien**

Zu den wichtigsten Zielkategorien des Arbeitsstudiums zählen Planung, Steuerung, Kontrolle und Entlohnung. Ein Vergleich von Arbeitsverfahren, wie ihn die vorliegende Studie ausführt, wird in diesem Zusammenhang der Planung zugeordnet. Der Fokus dieser vergleichenden Untersuchung liegt hierbei auf der zu optimierenden Sachleistung, also der Flächenleistung je Zeiteinheit pro Arbeitsverfahren, und den Fragestellungen ergonomischer Natur der in ihnen arbeitenden Pferdeführer und Zugpferde. Eine entsprechende Datenerhebung kann sich somit auf die klassischen Voraussetzungen einer Arbeitszeitstudie stützen.

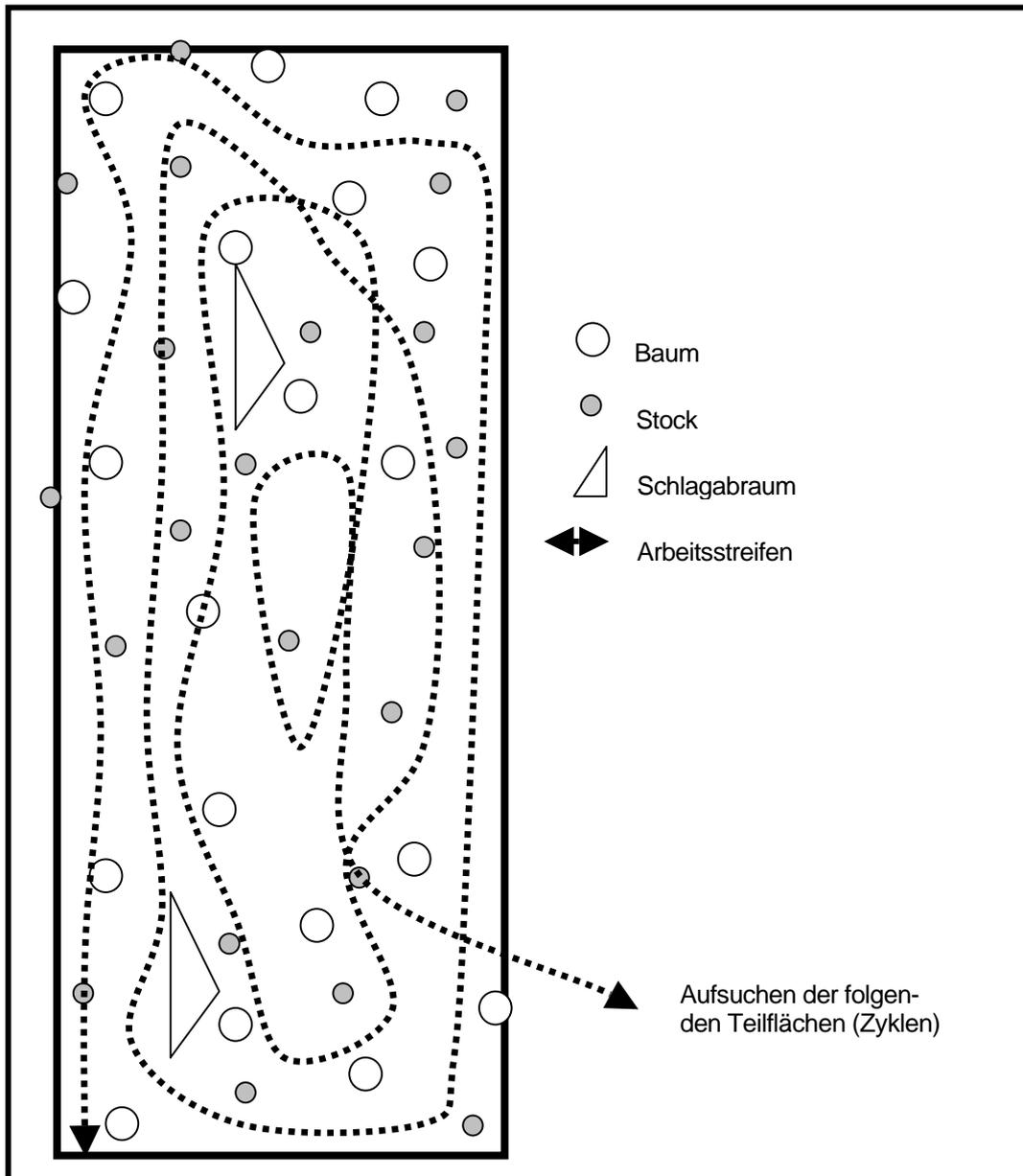
Im Mittelpunkt entsprechender Arbeitszeitstudien – die gemäß der Zielsetzung auf den Menschen, das Betriebsmittel oder den Arbeitsgegenstand ausgerichtet sein können – steht der Arbeitsablauf. Eine Zeitstudie innerhalb entsprechender Abläufe erlaubt neben den oben genannten Hauptzielen auch eine Abschätzung der technisch-funktionalen Voraussetzungen der betrachteten Arbeitsverfahren. In der vorliegenden Arbeit kam die auf den Menschen bezogene Arbeitsablaufanalyse in Betracht, in der die Datenarten Zeit, Bezugsmenge und Arbeitsbedingungen sowie deren Einflussgrößen erfasst wurden.

Die Ökonomie eines Arbeitsverfahrens wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst, auch von solchen, die im Sinne des Arbeitsauftrages nicht durch das zu bearbeitende Objekt bestimmt werden. Zu jenen nicht dem Arbeitsgegenstand (hier: den zu bearbeitenden Teilflächen) zuzuordnenden Einflüssen zählen vor allem die eigene optimale Bewegungsrhythmik von Pferdeführer/Gespann sowie die vermittelnde Konkordanz zwischen Mensch und Tier. Ein Vergleich zwischen den eingesetzten Betriebsmitteln anhand der erfassten Zeitverbräuche sollte es ermöglichen, unter Berücksichtigung teils divergierender äußerer, leistungsbeeinflussender Faktoren mittlere verfahrensspezifische (in diesem Fall Flächen-) Produktivitäten gegenüberzustellen. Diese Produktivität stellt die Basis zur Kalkulation der direkten Kosten eines entsprechenden Arbeitsverfahrens dar und lässt sich im Anschluss ggf. mit dem auftragsinternen Gesamtnutzen (hier z. B. der Auflaufferfolg) zu einem endgültigen, wirtschaftlichen Urteil verschmelzen.

### 5.2.2 Arbeitszyklen

Die vergleichende Datenbasis des registrierten Zeitverbrauchs setzt angesichts stets absehbarer Unterschiede in den äußeren, leistungsbeeinflussenden Faktoren einen hinreichenden Stichprobenumfang voraus, der eine statistische Absicherung zu berechnen erlaubt. Der Umfang besagter Stichprobe wird bestimmt von der Anzahl der auftrags- und objektspezifischen Arbeitszyklen, also eindeutig repetitiv zu bearbeitenden Teilobjekte, die wiederum für sämtliche Verfahren charakteristisch sein müssen.

Nach bewährten Arbeitsgepflogenheiten – an denen sich die vorliegende Studie ausrichten musste – blieb als zyklisch wiederkehrende Einheit lediglich die Teilfläche, die das Gespann spiralförmig von außen nach innen bearbeitete. War das Gespann am spiralförmigen Zentrum einer Teilfläche angelangt, setzte es nach ausreichendem Bearbeitungsgrad in die nächste, i. d. R. benachbarte Teilfläche um, wo sich der Arbeitsablauf wiederholte. Ein solcher Zyklus ist in Abbildung 6 skizziert. Die Erkenntnis, dass diese Gliederung einen für den Vergleich von fünf Verfahren geringen Stichprobenumfang lieferte, war ein wesentliches Ergebnis der Vorstudie aus dem Herbst 2000.



**Abbildung 6: Schematische Darstellung eines Zyklus bei praxisnaher Bearbeitung einer Teilfläche**

Um den Stichprobenumfang zu vergrößern, wurde auf der Hälfte der zur Verfügung stehenden Versuchsflächen ein alternativer Zyklus von fünf streifenweise gegliederten Arbeitszyklen geschaffen, der allerdings der bewährten Praktikabilität entgegen zu stehen schien: Die konsequente Bearbeitung der parallel verlaufenden Streifen (Zyklen) führte zu zeitaufwändigen und insofern störenden und praxisfremden Wendemanövern am Ende der Zyklen, die aus diesem Grund als „Nicht auszuwertende Tätigkeit“ von der Analyse ausgeklammert und separat gewertet wurden.

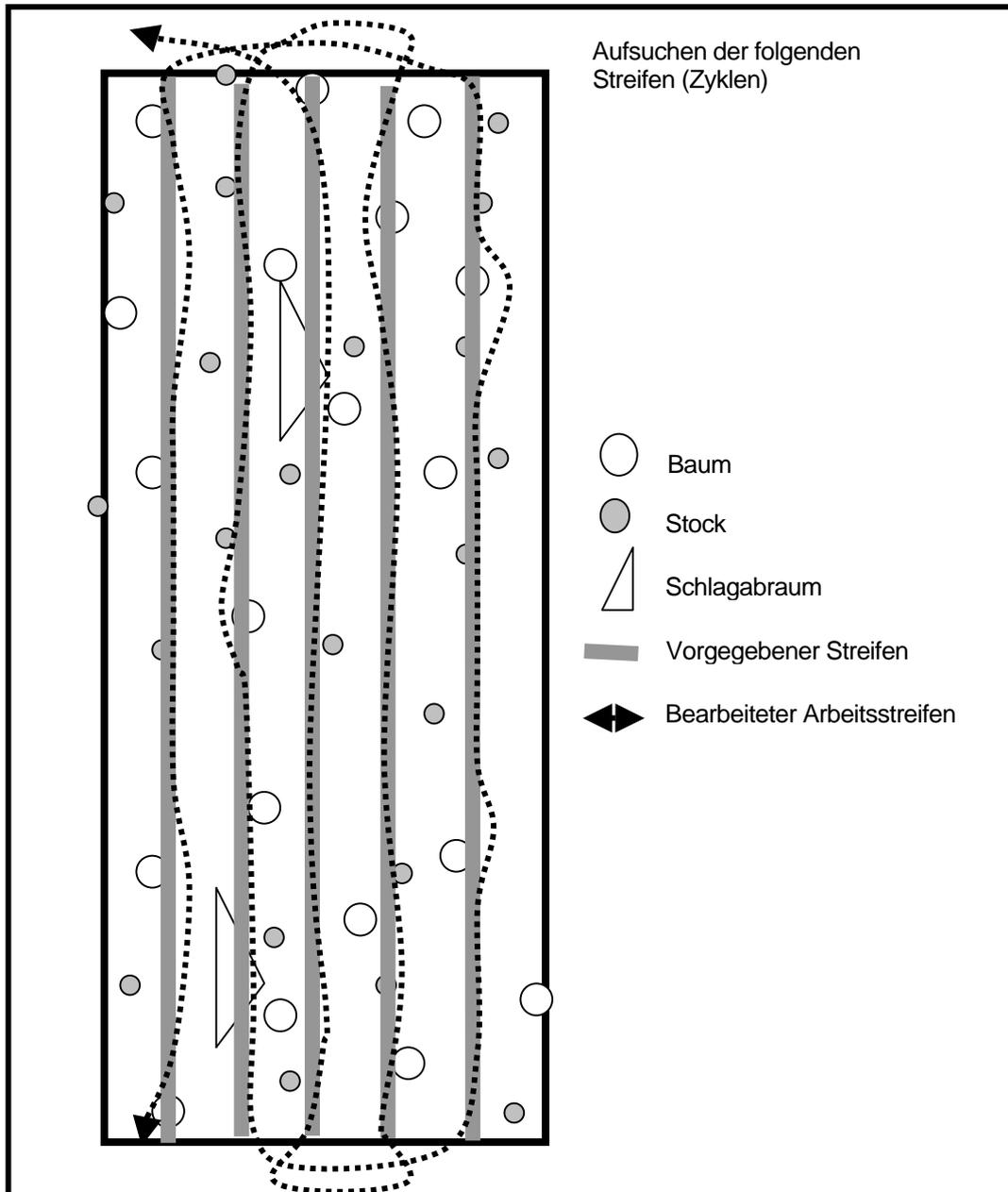


Abbildung 7: Zyklusfolge bei der streifenweisen Bearbeitung einer Teilfläche

Das in Abbildung 7 illustrierte Vorgehen erhöhte den Stichprobenumfang der Vergleichsbasis um den Faktor fünf. Sollen die so gewonnenen Daten (z. B. Zeiten je Meter) in einen Planzeitkatalog einfließen, müssten sie mit jenen Relationen korrigiert werden, die die gleichfalls durchgeführten praxisnahen Studien (spirale Bearbeitung) nahe legen.

Problematisch bei diesem Vorgehen war die Ausscheidung leistungsbeeinflussender Parameter auf den Streifen, also innerhalb jener Zyklus-Grenzen. So konnte eine aufwändige Zuordnung dieser Parameter (Schlagabraum, Stöcke etc.) nicht durchgeführt werden, denn deren prinzipiell störende Wirkung war einerseits verfahrens-, weil betriebsmittelspezifisch, andererseits beurteilte der Gespannführer zur Zeit des Ereignisses eine Behinderung subjektiv und zudem zyklusübergreifend: So belässt er es beispielsweise nicht bei der Beseitigung des aktuellen Hindernisses, wenn es nur wenige Handgriffe erfordert, auch die Behinderung für einen Folgezyklus innerhalb der Streifen-Bearbeitung zu entfernen.

### 5.2.3 Arbeitsablaufabschnitte und Messpunkte

Im Vorfeld der eigentlichen Arbeitsablaufstudien wurden die anfallenden Tätigkeiten bei der Bodenvorbereitung und der kombinierten Rillensaat für die untersuchten Arbeitsverfahren während eines Arbeitstages näher beleuchtet. Hierbei erwies es sich vor allem vor dem Hintergrund des kombinierten Erhebungsinstruments als sinnvoll, grundsätzlich die Tätigkeiten auf den eigentlichen Versuchsflächen zu betrachten.

Der Arbeitsablauf war nach entsprechender Vorbereitung der Aggregate sehr kontinuierlich, d. h. plausible Arbeitsablaufabschnitte konnten im Grunde nicht vorhergesagt werden. Die Kontinuität des Ablaufs (Saat/Bodenverwundung) wurde lediglich durch „Sachlich bedingte Verteilaktivitäten“ unterbrochen, die durch das Arbeitsobjekt oder das Betriebsmittel erzwungen wurden, beispielsweise das Räumen von hinderndem Schlagabraum, kleinere Reparaturen an den Betriebsmitteln oder kommunikative Störungen zwischen Gespannführer und Pferd. Entsprechende Verteilaktivitäten lassen sich nicht wie prognostizierbare Ablaufabschnitte mit eindeutig definierbaren Messpunkten begrenzen, zumindest nicht ad hoc im Feld in sachlich korrekte Kategorien einordnen. Die Festlegung der Arbeitsablaufabschnitte und Definition der Messpunkte erfolgte nach Beobachtung der Ablaufarten des Pferdeführers in Anlehnung an REFA (2004) (vgl. ANHANG II). In Tabelle 7 sind die im Rahmen der vorliegenden Studie ausgewiesenen Arbeitsablaufabschnitte und Messpunkte angegeben.

Die Kontinuität des Arbeitsablaufes sowie die rasche Abfolge und kurze Dauer der definierten Ablaufabschnitte stellte hohe Anforderungen an die anzuwendende Zeitstudientechnik.

**Tabelle 7: Übersicht der Untergliederung von Primär- (Bodenverwundung bzw. Saat) und Sekundärtätigkeiten in definierte Teilereignisse (Arbeitsablaufabschnitte) mit den ausgewiesenen Messpunkten (charakteristische Vorgänge)**

Arbeitsablaufabschnitte (Arbeit/Ereignis)		Messpunkte (Charakteristischer Vorgang)	
<b>1</b> <b>Primärtätigkeit (PT)</b>	AAA 11 (MH) Saat / Verwundung	Anfang der Arbeit nach Unterbrechung, gekennzeichnet durch den beginnenden Bewegungsablauf des Pferdes/Gespans (Schritt) gekoppelt mit Anzug der Zugstränge.	Bearbeitung parallel zu einer der Flächenseiten.
	AAA 12 (MN) Richtungswechsel / Wenden		Das Gespann verändert die Position zum Aggregat seitlich (> 30°).
	AAA 13 (MN) Überfahung Stock		Vom ersten bis zum letzten Kontakt des Aggregates mit einem Stock.
	AAA 14 (MN) Überfahung Schlagabraum		Vom ersten bis zum letzten Kontakt des Aggregates mit Schlagabraum.
	AAA 15 (MN) Überfahung Stammteil		Vom ersten bis zum letzten Kontakt des Aggregates mit einem Stamm/Restrolle.
<b>2</b> <b>Sekundärtätigkeit (ST)</b>	AAA 21 (MZ) Orientierung	Ende/Unterbrechung der Arbeit (Saat), gekennzeichnet durch den Stand des Pferdes (alle 4 Hufe auf dem Boden) gekoppelt mit Entlastung der Zugstränge.	Einschätzung der Flächenbearbeitung, Hindernisumfahrung, Wahl des Streifens.
	AAA 22 (MZ) Räumen		Beseitigung von Schlagabraum auf dem gewählten Arbeitsstreifen.
	AAA 23 (MZ) Betriebsbereitschaft Aggregat		Wiederherstellen der Betriebsbereitschaft des Aggregates.
	AAA 24 (MZ) Betriebsbereitschaft Zugtier		Überprüfung von Geschirr, Zugsträngen oder allgemeinem Gesundheitszustand.
	AAA 25 (MEP) Erholung		Erholzeit z. B. nach Sturz oder Schlagräumung.
	AAA 26 (MZ) Verweigerung Pferd		Pferd stoppt ohne Befehl vom Pferdeführer und ohne erkennbares Hindernis.
	AAA 27 (MS) Pferd vor Hindernis		Pferd stoppt vor einem Hindernis wie z. B. Baum, Schlagabraum etc.

#### 5.2.4 Arbeitszeitstudientechnik

Für die Wahl des Zeitstudienverfahrens ergibt sich aus den dargestellten Erwägungen eindeutig die aufwändigste Lösung: Videoaufzeichnung und spätere (zeitlich versetzte) Arbeitszeitstudie im Videolabor. Diese Technik erlaubt es, die im Vorfeld exakt definierten Messpunkte im Sinn der REFA-Terminologie (vgl. REFA, 2004) bei mehrfacher Begutachtung des Arbeitsablaufs im Videolabor als solche zu identifizieren. So ist beispielsweise die Einleitung einer den kontinuierlichen Arbeitsablauf deutlich beeinflussenden Richtungskorrektur des Gespanns um einen Winkel von mehr als 30° in der Feldstudie niemals rechtzeitig zu erkennen; selbst im Vi-

deolabor des Instituts für Forstliche Arbeitswissenschaften und Verfahrenstechnologie der Georg-August-Universität Göttingen (IFA) bedarf es hierzu mehrfacher Rekonstruktionen.

Während der Versuchsdurchführungen wurden die Arbeiten mit einer Video-Camcorder (PANASONIC; Typ AG-445) aufgezeichnet. Als besondere Ausstattungsmerkmale dieses tragbaren, semi-professionellen Gerätes sind vor allem der Autofokus, der eingebaute Timecode Generator (ermöglicht in entsprechenden Abspielgeräten die Einblendung der exakten zeitliche Zuordnung einer entsprechenden Szene) und die S-VHS-Tauglichkeit zu erwähnen.

Die einzelnen Videobänder wurden in einem Videorekorder mit „Counter“, Standbild sowie langsamen Vor- und Rücklauf („Jog-Dial“) ausgewertet. Die verwendete Videotechnik erlaubte 25 Einzelbilder je Sekunde abzubilden und somit eine Auswertegenauigkeit von 1/25 Sekunden zu erreichen. Weiterführende Informationen zur Ausstattung des IFA-Videolabors sowie der Videozeitstudientechnik sind SCHERER (1995) zu entnehmen.

Der Zeitverbrauch wurde per Fortschrittszeitverfahren registriert. Dabei werden die Ablaufabschnitte mit ihren Zeiten chronologisch in der Reihenfolge ihres Entstehens festgehalten. Die Zeit des Zählerstandes am Messpunkt des Ereignisses wurde stets notiert. Aus den fortschreitend erfassten Zeitpunkten wurde bei der Auswertung durch Differenzbildung die Dauer der definierten Vorgänge errechnet. Hierzu wurde die Counter-Zeit mit den dazugehörigen Aktivitäten in einer digitalen Datei im EXCEL-Format erfasst, um Berechnungen der entsprechenden Zeitverbrauchswerte in Abhängigkeit der Bezugsmengen, Einflussgrößen und Arbeitsbedingungen sowie Verschneidungen mit weiteren Daten, z. B. der Herzfrequenz des Pferdeführers, zu ermöglichen.

## 5.3 Qualität der Arbeitsausführungen

### 5.3.1 Bearbeitung der Saatstreifen

Für das Keimen von Bucheckern, der daran anschließenden Pflanzenentwicklung und dem damit verbundenen waldbaulichen Erfolg einer Buchensaat ist es von großer Bedeutung, dass der Mineralboden ausreichend freigelegt wird. Bei den untersuchten Saatverfahren mit kombinierter Ausbringung des Saatgutes stellen zudem die gleichmäßige Verteilung der Bucheckern in der Saatrille sowie das Übererden zu überprüfende Faktoren der verfahrensbedingten Arbeitsaufgabe dar.

Um diese an die Betriebsmittel gestellten Anforderungen zu überprüfen, wurde zunächst parallel zur praxisnahen Bearbeitung einer Teilfläche die bearbeitete Streckenlänge mit Hilfe eines für Feldmessungen geeigneten Rolltachos ermittelt. Wenn der Pferdeführer bereits bearbeitete Abschnitte erneut überfuhr, um im Rahmen der spiraligen Bearbeitung z. B. zu wenden oder Hindernisse zu umfahren, wurde dies als Doppelbefahrung (Doppelbearbeitung) separat erfasst. Ein die kontinuierliche Arbeitsqualität beeinflussender Faktor besteht im Überfahren von Stöcken, Schlagabraum oder sonstigen den Arbeitsablauf unterbrechenden Hindernissen. Die hieraus verbleibenden unbearbeiteten Teilstücke wurden vermessen und ergaben nach Abzug der Gesamtstrecke die Netto-Bearbeitungsstrecke einer Teilfläche. Innerhalb dieser vorbereiteten Strecken wurde bei den Bodenverwundungsverfahren die Freilegung des Mineralbodens, die Arbeitsbreite und -tiefe erfasst. Bei den Rillensaatverfahren erfolgte zudem die Erfassung vom Abstand der Bucheckern innerhalb der Saatrille, der Bearbeitungstiefe und der Übererdung. Hierzu wurde an Stichprobenpunkten auf einer Strecke von 50 cm der Saatrille die Saatgutabdeckung angesprochen und nach Aufdeckung der Saatrille der Abstand der vorhandenen Bucheckern vermessen. Für die Ansprache der Saatgutabdeckung fand die in Tabelle 8 dargestellte Klassifizierung Anwendung.

**Tabelle 8: Klassifizierung der Saatgutabdeckung**

Code	Klasse	Beschreibung
0	<i>kein Saatgut</i>	Auf der Länge von 50 cm war keine Buchecker vorhanden
1	<i>gut</i>	Das Saatgut war auf mindestens 25 cm vollständig und fest abgedeckt.
2	<i>locker-frei</i>	Das Saatgut war auf mindestens 25 cm leicht abgedeckt
3	<i>frei</i>	Auf einer Länge von 50 cm erfolgte keine Abdeckung der Eckern

Diese qualitativ ausgerichteten Erhebungen fanden bei allen Flächen über zufällig verteilte Stichproben mit 20 Wiederholungen je Teilfläche statt.

### 5.3.2 Auflauf der Buchensaat

Wie bereits erwähnt, ist die Qualität des Arbeitsergebnisses der untersuchten Arbeitsverfahren von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung der Buchensaat. Um Informationen über den ersten, weitgehend von Temperatur und Licht unabhängigen Anwuchs der Keimlinge zu erhalten, wurde die Anzahl und Ausprägung der Buchenkeimlinge auf den Teilflächen erfasst.

Gemäß der ausgesäten Saatgutmenge von durchschnittlich 5 kg/0,1 ha konnte gemäß der vorliegenden Eckernqualität (vgl. Kapitel 3.4.5) von ca. 13.675 Pflanzen/0,1 ha ausgegangen werden. Gesäte Verjüngungen sind jedoch relativ vielen abiotischen und biotischen Gefahren ausgesetzt, die eine erwartete Pflanzenzahl z. T. stark minimieren.

Bei den vorliegenden Erhebungen handelt es sich nicht um eine ausschließlich waldbauliche Wertung der Saaten in Abhängigkeit spezieller standörtlicher Voraussetzungen (vgl. hierzu unter anderem LEDER, 1998; AMMER, 2000 sowie AMMER UND EL KATEB, 2001).

Eine erste Besichtigung der Probeflächen im Juni und Juli 2001 zeigte, dass sowohl die Anzahl als auch die Entwicklung der Buchenkeimlinge starken kleinstandörtlichen Schwankungen unterworfen war. Aus diesem Grund sollte eine Vollaufnahme der 0,1 ha großen Versuchsflächen im September 2001 detaillierte Informationen zu den Keimlingszahlen liefern. Bei der Erhebung wurden die ausgezählten Keimlinge zudem nach drei Vitalitätsklassen unterschieden: *vital* (Keimlinge mit vollständig gesunden Blättern/Knospen), *biotischer Schaden* (Keimlinge sowie Eckern mit biotischer Schädigung z. B. durch Pilzerreger, Mäuse oder Vögel) und *abiotischer Schaden* (Keimlinge mit abiotischer Schädigung durch z. B. Trockenheit oder Spätfrost).

Des Weiteren wurden zehn vitale Keimlinge je Teilfläche zufällig ausgewählt, vermessen und für eine Folgeaufnahme im Sommer 2002 markiert. An diesen jungen Rotbuchen erfolgte eine Erfassung folgender Parameter: Länge des gewachsenen Sprosses bis zum Ansatz der Endknospe (Sprosshöhe), Länge des gestreckten Sprosses bis zum Ansatz der Endknospe (Sprosslänge), Länge der Endknospe, mittlerer Abstand zu den benachbarten Keimlingen, Anzahl der Seiten-äste, Anzahl der Keimblätter sowie der Kronenblätter pro Spross. Zudem wurde an den Stichprobenpunkten die Anzahl der Buchenpflanzen je Platz (Handsaat nach Bodenverwundung) vermerkt und der Abstand von der markierten Buche zur nächsten Pflanze bis maximal 1 m innerhalb der Reihe (Rillensaat) vermessen.

Im Juni 2002 wurden die im Vorjahr markierten Rotbuchen erneut aufgesucht und ihre Vitalität sowie Parameter bzgl. der Pflanzenentwicklung nach dem ersten Jahr erfasst.

### 5.3.3 Mechanische Verletzungen am Fichtenbestand

Hinsichtlich der Arbeitsqualität, die sich anhand der oben aufgeführten Parameter an der Erfüllung der Arbeitsaufgabe orientierte, wurde in der vorliegenden Untersuchung zudem die Beschädigung des verbleibenden Fichtenaltbestandes durch Zugtiere und Betriebsmittel bei der Bearbeitung ermittelt.

Entsprechende Dokumentationen im Rahmen von Bestandsschadensanalysen sind vor allem aus der Bewertung von Arbeitsverfahren der Holzernte und Holzbringung bekannt. Vielfach wurde das Vor- und Endrücken durch selbstfahrende Forstmaschinen unterschiedlicher Konzeption dem Einsatz von Pferden in verschiedenen Arbeitsverfahren gegenübergestellt. Den Pferden als Zugmittel konnten hierbei vielfach ein geringeres Schadprozent sowie kleinere Verletzungsgrößen nachgewiesen werden (vgl. u. a. AGREN, 1969; MENG, 1978; DIETZ, 1981; DENNINGER, 1991; BECK, 1994 sowie SUWALA, 1997).

Stamm- sowie Wurzelverletzungen erhöhen in Fichtenbeständen das Risiko verschiedener biologischer und wirtschaftlicher Folgeschäden, wie sie z. B. von einer Infektion mit dem Wurzelschwamm (*Heterobasidion annosum*) ausgehen. Dieser Basidiomycet verursacht die Rotfäule der Fichte, die das Stammholz bis auf mehrere Meter holztechnologisch und somit wirtschaftlich entwerten kann. Darüber hinaus werden die Wurzeln angegriffen bzw. zerstört, was die Windwurfanfälligkeit vom Einzelbaum bis zum Bestand erhöht. Das Infektionsrisiko sowie der Verlauf der Rotfäule nimmt von Stamm- zu Wurzelverletzungen sowie mit ansteigendem Alter der Fichten zu (vgl. SCHÖNHAR, 2001).

Bei der Bodenbearbeitung in Fichtenbeständen, die vor allem während der Vegetationszeit stattfindet, ist das Risiko einer Verletzung der bodennahen Stammteile durch geringere Haftwiderstände der Rinde gegeben. Für die Hauptinfektion durch *Heterobasidion annosum* über Wurzelverletzungen geht von der Bodenbearbeitung ein besondere Gefahr aus, da der Eingriff in den Mineralboden vielfach mit einer Beschädigung der flachstreifenden Fichtenwurzeln einhergeht und somit die im Boden vorkommenden Sporen des Pilzes Wundstellen besiedeln können.

In der vorliegenden Studie wurden Beschädigungen am Fichtenstamm sowie der Wurzel über zwei separate Erhebungen quantifiziert. Verletzungen an stockenden Fichten durch Abscheren der Rinde und Freilegen des Holzkörpers wurden über eine Vollaufnahme der bearbeiteten Versuchsfächen erfasst. Hierbei wurden alle Fichten bzgl. der Schadensereignisse begutachtet und getrennt nach der Wundgröße in den Klassen  $< 5 \text{ cm}^2$ ,  $5\text{--}10 \text{ cm}^2$ ,  $10\text{--}15 \text{ cm}^2$  und  $> 15 \text{ cm}^2$  an Wurzelanläufen und Stamm dokumentiert. Eine quantitative Erhebung der Verletzung von flach anstehenden Fichtenwurzeln erfolgte an zufällig ausgewählten 20 Stichprobenpunkten je Versuchsfäche. An diesen Punkten wurden *verletzte* (Klasse 1), *durchtrennte* (Klasse 2) und/oder *herausgerissene* (Klasse 3) Wurzeln ab einem Durchmesser von 0,2 cm erfasst, ohne die aufgefundenen Verletzungen nach der Wundgröße zu untergliedern.

### 5.3.4 Strukturänderung des Waldbodens

#### 5.3.4.1 Bodenverdichtung

Auf den Boden übertragene Kräfte treffen auf ein entsprechendes Widerlager, das aus der Festsubstanz sowie wasser- und luftgefüllten Poren besteht. Ist die äußere Kraft größer als die durch den Boden entgegenzusetzende Kraftkomponente, kommt es zu einer Änderung der Struktur des Bodengefüges und damit verbunden zu einer Zunahme des Festmaterialanteils pro Volumeneinheit, d. h. das Gesamtporenvolumen schwindet.

Dieser als Verdichtung bezeichnete Vorgang hängt von verschiedenen Faktoren ab. Im Wesentlichen sind dies die Textur (Bodenart), die Struktur der Tonminerale (ein- oder mehrschichtig), der Wassergehalt, der Porenanteil, die vorliegende Lockerung, frühere Belastungen und die aktuelle Belastung.

Die Bodenart gibt den Umfang für die durch Verdichtung entstehende maximale Lagerungsdichte vor. So existieren bei unterschiedlichen Bodenarten verschiedene Korngrößenverteilungen, welche wiederum zu unterschiedlichen Porenanteilen führen. Eine wichtige Rolle bei der Verdichtung spielen die als Grobporen bezeichneten, durch Bioturbation (z. B. Wühlaktivität von im Boden lebenden Kleinstlebewesen, u. a. Regenwürmer) sekundär entstandenen Poren. Die Aufgabe der Grobporen liegt vor allem in einer ausreichenden Versorgung des Bodens und den in ihm lebenden Organismen mit Sauerstoff bzw. in der Entsorgung von Kohlendioxid. Zudem sind sie Hauptwuchsraum für Wurzelhaare.

Der Anteil der Mittel- und Feinporen beruht in erster Linie auf der Körnung und Korngröße sowie der Pedoturbation (natürlich verursachte sekundäre Veränderungen des Bodengefüges, z. B. Eisbildung und Tauen). In der Regel steht das Wasser der Mittelporen den Pflanzen zur Verfügung, hingegen das der Feinporen nicht. Das Bodenwasser und die Bodenluft füllen die Poren der Bodenmatrix. Zudem enthält das Wasser die für das Pflanzenwachstum wichtigen Nährstoffe in gelöster Form. Wichtig ist die annähernd gleichmäßige Verteilung von Grob- und Mittelporen in einem Boden, damit ein ausreichender Luftaustausch sowie genügend Wasserspeicherung sichergestellt sind. Im Allgemeinen gilt: je höher der Wassergehalt eines Bodens bei einer Belastung (z. B. der Befahrung) ist, desto stärker kann dieser verdichtet werden. Dabei wirkt das freie Bodenwasser wie ein Gleitmittel zwischen den Bodenteilchen und setzt die Scherwiderstände herab. Die Veränderung innerhalb der Porenklassen (Gesamtporenvolumen) durch eine Verdichtung führt zu einer Verschlechterung des Luft- und Wasserhaushalts im Boden (vgl. u. a. HARTGE, 1964; BLUME, 1992; SCHEFFER, 1992 sowie KWETON UND ZUCKER, 1993).

#### **5.3.4.2 Belastung des Waldbodens**

Der Waldboden ist für die Forstwirtschaft ein wichtiger Produktionsfaktor und für zukünftige Waldgenerationen als Basis der nachhaltigen Bewirtschaftung zu schützen. Neben dieser rein forstlich orientierten Betrachtung ist in den vergangenen Jahren das gesellschaftliche Interesse am Erhalt und Schutz der Umwelt gestiegen und somit auch der Einfluss auf die forstliche Bewirtschaftung durch die Etablierung von Richtlinien und Gesetzen. In Bezug auf den Waldboden kommt dies vor allem im Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) vom 17. März 1998 und der Bundes-Bodenschutzverordnung (BBodSchV) zum Ausdruck (vgl. BMJ, 1998). Hierbei ist der Boden relativ spät als drittes Umweltmedium – neben Luft und Wasser – in einem bundeseinheitlichen, rechtlichen Rahmen berücksichtigt worden. Nähere Informationen zum Bundes-Bodenschutzgesetz und den Konsequenzen für die Forst- und Landwirtschaft können ZIESAK (2004) sowie BRAND-SASSEN (2004) entnommen werden.

Eine weitere rechtliche Einflussnahme besteht mit der in der Novelle des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG) vom 01. Februar 2002 formulierten „Gute fachliche Praxis“. Diese Begrifflichkeit konkretisieren WINKEL UND VOLZ (2003) für die Forstwirtschaft u. a. vor dem Hintergrund der Vermeidung einer flächigen Befahrung von Waldböden. Demnach sollen selbstfahrende Arbeitsmaschinen ausschließlich auf einem dokumentierten Erschließungssystem bewegt werden. Viele Landesforstverwaltungen in Deutschland haben dem bereits seit langem verstärkt Rechnung getragen, so enthält z. B. der Runderlass „Waldnutzung und Walderneuerung im Staatswald des Landes Nordrhein-Westfalen“ ein Verbot der flächigen Befahrung mit Forstmaschinen (vgl. MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT NORDRHEIN-WESTFALEN, 1994). Eine vergleichende Gegenüberstellung von

Richtlinien und Merkblätter der deutschen Bundesländer zum Bodenschutz ist MATTHIES (2000) zu entnehmen.

Neben diesen rechtlichen Regelungen haben sich Forstbetriebe verschiedene Nachhaltigkeitszertifizierungskonzepte auferlegt, die ebenfalls – wenn auch nicht bindend wie rechtliche Regelungen – Einfluss auf die Waldbewirtschaftung nehmen. So verbieten auch diese Konzepte wie z. B. FSC, PEFC und Naturland in ihren Vorschriften ein Verlassen der Rückegassen mit selbstfahrenden Forstmaschinen im Rahmen der Holzernte (vgl. FSC, 2001; PEFC, 2001 und Naturland, 1998).

Vor dem Hintergrund der Bestandsbegründung bzw. -umwandlung kommt dem schonenden Umgang mit dem Boden unter dem Gesichtspunkt der Verdichtung eine besondere Bedeutung zu, da bei einer flächigen Befahrung des Waldstandortes durch Forstmaschinen eine Strukturveränderung des Bodens (Verdichtung / Verformung) hingenommen werden muss. Bereits eine erstmalige Überfahrt kann zu 60–80 % der maximalen Verdichtung führen, bei einer weiteren Überfahrt können schon 90 % erreicht werden (vgl. JACKE, 1989). Dieser Verdichtungsprozess besitzt wiederum einen erheblichen Einfluss auf das Wachstum der Pflanzen und somit auf die Entwicklung und Stabilität des Gesamtbestandes (vgl. HILDEBRAND, 1983; HESSE, 1990 sowie KOROTAEV, 1992). Diese Ausführungen verdeutlichen, dass ein Verlassen der Feinerschließungslinien mit selbstfahrenden Forstmaschinen – auch bei Arbeitsverfahren der Bestandsbegründung und Waldpflege – einen erheblichen Einfluss auf die nachhaltige Bestandsentwicklung ausübt und aus diesem Grund vermieden werden sollte.

In diesem Zusammenhang wird bei Aufgaben der flächigen Bearbeitung das Zugmittel Pferd als eine ökologisch positive Alternative betrachtet. BECK (1994) gibt den Druck eines Pferdehufes auf dem Boden mit 1,5 bar an, das entspricht etwa dem ein- bis zweifachen Druck unter einem Schlepperreifen. Der durch das Pferd im Rahmen der Zugarbeit ausgeübte Druck auf den Boden ist nach HÄBERLE (1998) nahezu fünf bis zehnmal höher als der eines beladenen Forwarders. Die Verdichtung geschieht beim Pferd jedoch punktuell, während die Befahrung mit motorgetriebenen Arbeitsmaschinen eine flächige bzw. linienförmige Kompaktierung der Bodenfestsubstanz nach sich zieht. Die räumliche Ausdehnung einer Bodenverformung besitzt eine größere Bedeutung als ihre Intensität, so dass kleinflächige Strukturänderungen im Porensystem die Vernetzung und somit den Luft- und Wasseraustausch noch gewährleisten und darüber hinaus eine raschere Regeneration durch strukturbildende Prozesse erlauben (vgl. HILDEBRAND, 1987; SCHACK-KIRCHNER UND HILDEBRAND, 1994; WALKER, 1994 sowie WILPERT, 1998).

Entsprechend werden heute Harvester, Forwarder sowie Schlepper ausschließlich auf ausgewiesene Feinerschließungslinien bewegt. Die Flächeninanspruchnahme durch diese Fahrlinien wird in Abhängigkeit von der geometrischen Ausformung und des Abstandes mit bis zu 20 % der Gesamtfläche angegeben. Beim Vorrücken mit Zugpferden in Anspruch genommene Fläche ist von der mittleren Huftrittfläche des Pferdes, der zurückzulegenden Distanz, der Menge und dem Stückvolumen des zu rückenden Holzsortiments, der Geländeneigung etc. abhängig. Beim Vorrücken weisen SUWALA ET AL. (2000) eine durch das Pferd betretene Fläche von 3,4 % zwischen den Rückegassen aus. SÜß (2001) ermittelte – ebenfalls beim Vorrücken – mit 3,2 % eine vergleichbare Flächeninanspruchnahme des Waldbodens durch Betritt.

Zur Erfassung der Veränderung der Bodenstruktur nach Befahrung oder Betritt stehen verschiedene Erfassungsmethoden und daraus abgeleitete Parameter zur Verfügung, so z. B. der Abscher- und Eindringwiderstand, die Lagerungsdichte, die intrinsische Luftleitfähigkeit, die gesättigte Wasserleitfähigkeit sowie die O<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Bodenluft. Stellvertretend für die Leitfähigkeiten insgesamt (Bodenluft und -wasser) wurde in der vorliegenden Untersuchung die Luftleitfähigkeit bzw. Luftpermeabilität des (Grob-)Porenraums erfasst.

### 5.3.4.3 Erfassung der Luftpermeabilität

Um die Veränderung der gesamten Porenstruktur durch die eingesetzten Zugmittel (Pferd und Schlepper) von Bodenbearbeitungsaggregaten zu erfassen, wurde in der vorliegenden Studie die auch als  $k_i$ -Wert oder Luftleitfähigkeitsbeiwert bezeichnete Luftpermeabilität bestimmt. Mit diesem Parameter kann die verdichtungsverursachte Beeinträchtigung der Porenstruktur relativ schnell in Abhängigkeit von Gesamtporenvolumen, Porengrößenverteilung und Porenvernetzung charakterisiert werden.

Nähere Informationen zu diesem Parameter, den physikalischen Hintergründen und daraus abgeleiteten Berechnungsgleichungen können KMOCH (1961) entnommen werden. POTSCH (1996) gibt des Weiteren Berechnungsformeln für Geländemessungen am gewachsenen Boden an.

In Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Dr. Matthies (Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik – Departement für Ökosystem- und Landschaftsmanagement des Wissenschaftszentrums Weißenstephan der TU München), die im Rahmen von Geländemessungen bereits zahlreiche Erfahrungen mit der Erfassung der Luftpermeabilität in Anlehnung an POTSCH (1996) gemacht hat, wurde am Institut für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie der Georg-August-Universität Göttingen ein angepasster mobiler Luftpermeameter in dreifacher Ausfertigung konstruiert. Die Abbildung 8 zeigt einen auf ein Nivellierstativ montierten mobilen Permeameter bei Feldmessungen.

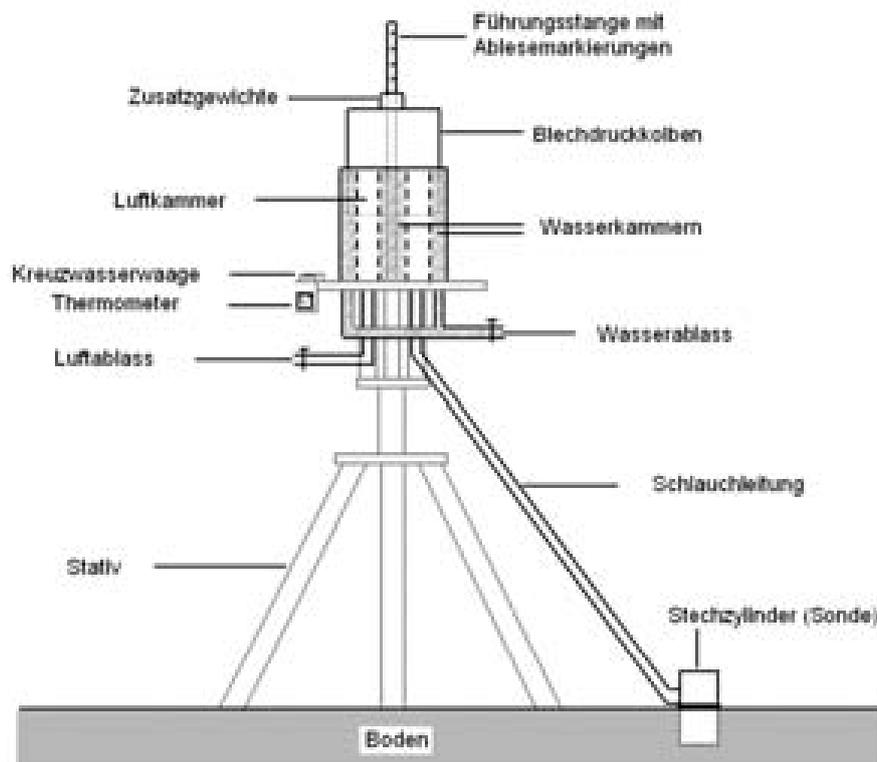


Abbildung 8: Der konstruierte Luftpermeameter im Gelände

Die Hauptkomponenten dieses Messgerätes sind drei konzentrisch auf einer Bodenplatte angeordnete Plexiglaszylinder mit unterschiedlichem Durchmesser, die von innen nach außen eine Wasser- und Luftkammer, eine Luftkammer sowie eine weitere Wasser- und Luftkammer bilden. Im Zentrum dieser Anordnung befindet sich ein zum Luftabschluss in Wasser geführter Blech-Druckkolben,

der beim Eintauchen mit der dünnen Außenwand bis zur Wasseroberfläche ein definiertes Luftvolumen im Inneren des Gerätes einschließt. Die Luftkammer ist über eine Schlauchleitung mit einem Stechzylinder (Sonde) verbunden, der gemäß seinem Innendurchmesser von 8 cm und der Einschlagstiefe von 6 cm eine definierte Bodenprobe umfasst.

Für die Messung der Luftleitfähigkeit wird der Druckkolben an der Führungsstange abgesenkt. Beim Eintauchen der Kolbenwände in das Wasser wird die Luft in der mittleren Kammer mit konstanter Geschwindigkeit und gleich bleibendem Arbeitsdruck – entsprechend der Druckkolben-Eigenmasse von 1,8 cm Wassersäule (WS) oder mit Zusatzgewichten beschwert bis zu einem Druck von 3 cm WS – über die Luftleitung durch die Bodenprobe gepresst. Mit einer digitalen Stoppuhr wird die Zeit registriert, die das Luftvolumen benötigt, um die Bodenprobe zu durchströmen. Weitere Bestandteile dieser Messanordnung sind Nivellierstativ und Kreuzwasserwaage, um auch unter schwierigen Geländebedingungen einen stabilen und waagerechten Stand der Apparatur zu gewährleisten. Ein Thermometer dient der Überwachung der Temperatur während länger andauernder Einzelmessungen und liefert die Lufttemperatur zur Berechnung der dynamischen Viskosität (vgl. Formel 1).

Während der Bodenbearbeitung mit den beiden Arbeitsverfahren wurden die zu bemessenden Stichprobenpunkte mit Farbspray auf dem Waldboden markiert. Hierbei wurden die Varianten *Referenz* (Kontrollvariante, keine Beeinträchtigung des Bodens durch die aktuelle Maßnahme), *Schlepperspur* (im Zentrum der Fahrspur des MB-tracs) und *Hufabdruck* (in dem von der Hufspitze ausgehenden Sohlensegment des Abdruckes) ausgewiesen. An die Bemessung der ersten Tiefenstufe (0–6 cm) mit dem mobilen Permeameter schloss sich die Freilegung und Beprobung der nächsten Ebene (10–16 cm) an. Alle Messungen der Luftleitfähigkeit fanden bei den Versuchsböden im Bereich der Feldkapazität ( $pF$  1,8–2,5) statt. Des Weiteren wurden die Bodenproben für die Bestimmung des gravimetrischen Wasser- und Humusgehaltes sowie für Siebanalysen (Textur) im Labor präpariert.

Aus den vor Ort erhobenen Daten von Zeit und Temperatur sowie den konstruktiven Vorgaben des Permeameters konnte die Luftleitfähigkeit ( $k_i$ -Wert) je Einzelmessung direkt über eine entsprechende Formel des gemessenen Volumenstroms berechnet werden (vgl. POTSCH, 1996). Eingangsgrößen zur Berechnung der Luftleitfähigkeit sind die Höhe ( $l$ ) und Durchtrittsfläche ( $A$ ) der Bodenprobe, der angelegte spezifische Arbeitsdruck ( $p$ ), das durchströmte Luftvolumen je Zeiteinheit ( $Q$ ) und die dynamische Viskosität der Luft ( $\eta$ ).

$$k_i [\mu m^2] = \frac{l}{A} \times \frac{Q}{p} \times \eta \times 1,7 \quad (\text{Formel 1})$$

Neben einer Berechnung der Luftpermeabilität ( $k_i$ -Wert) vor dem Hintergrund eines relativen Vergleiches der untersuchten Varianten kann die jeweilige konvektive Durchlässigkeit der Bodenluft über verschiedene Klassifikationen weiter bewertet werden. KWETON UND ZUCKER (1993) verwendeten die Klassifikation der Luftleitfähigkeit nach KMOCH UND HANUS (1965) zur Einschätzung von Verdichtungsschäden in Waldböden, die POTSCH (1996) in der Klasse *sehr geringdurchlässig* stärker zu differenzieren empfiehlt. Eine angepasste  $k_i$ -Klassifikation nach Brüggewert findet sich in Tabelle 9.

**Tabelle 9: Permeabilitätsklassen nach Bruggenwert (Quelle: Eijkelkamp, 1983)**

Permeabilitäts- klasse	Werte der konvektiven Luftleitfähigkeiten (ki) [ $\mu\text{m}^2$ ]	Beschreibung der Luftleitfähigkeit
I	< 3	sehr gering
II	3–15	gering
III	15–60	mäßig gering
IV	60–170	mittel
V	170–350	mäßig hoch
VI	350–700	hoch
VII	> 700	sehr hoch

In Tabelle 10 sind die drei Permeabilitätsklassen nach KREMER (1998) dargestellt. Diese Klassifikation orientiert sich neben den gasbezogenen Transferparametern auch an den Auswirkungen der forstlichen Vegetation (Naturverjüngung, Volumenzuwachs, Wurzelentwicklung etc.).

**Tabelle 10: Abschätzung der klassierten Bodenbelüftungssituation nach KREMER (1998)**

Permeabilitäts- klasse	Werte der konvektiven Luftleitfähigkeiten (ki) [ $\mu\text{m}^2$ ]	Beschreibung der Bodenbelüftung
I	< 50	kritisch
II	50–200	beeinträchtigt
III	> 200	unbeeinträchtigt

## 5.4 Humanphysiologische Messungen

### 5.4.1 Belastungssituation

Bei den eingesetzten Arbeitsverfahren wurden die Pferde vom Boden aus an der Kreuzleine geführt. Der Pferdeführer ging versetzt hinter dem Gespann, so dass es ihm möglich war, das Verhalten der Pferde und die Funktion des Betriebsmittels bei der Arbeit zu kontrollieren und Komplikationen (z. B. das Verstopfen des Saatgutauswurfes) frühzeitig zu erkennen. Bei Geschwindigkeiten zwischen 0,8 und 1,2 m/s musste der Pferdeführer parallel das zu bearbeitende Gelände im Auge behalten. Ihm wurden bei der Arbeit mit den zu untersuchenden Bodenbearbeitungs- und Saataggregaten eine gute Kondition und eine konzentrierte und vorausschauende Orientierung im Gelände abverlangt.

Neben den Primäraktivitäten der Führung von Pferd und Gespann war er noch durch die zusätzlichen Tätigkeiten der Schlagräumung und Fehlerbereinigung gefordert. Abgesehen von den bewusst gesetzten Erholzeiten ergaben sich für den Pferdeführer Kurz-Erholungspausen, z. B. während der durch die Pferde hervorgerufenen Unterbrechungen (vgl. Kapitel 5.2.3).

## 5.4.2 Herzfrequenz

### 5.4.2.1 Herzfrequenzen beim arbeitenden Menschen

Die Herzfrequenz, auch Herzschlag- oder Pulsfrequenz genannt, bezeichnet die Anzahl von Kammerkontraktionen pro Minute in  $\text{min}^{-1}$ . Beim Menschen beträgt die Ruheherzfrequenz in Abhängigkeit von Alter, Trainingszustand und Einfluss des vegetativen Nervensystems bei gesunden Erwachsenen ca.  $60\text{--}80 \text{ min}^{-1}$  (vgl. TRIEBIG ET AL., 2003).

Die spezifische Herzfrequenz einer konkreten Arbeitsaufgabe ergibt sich durch das Zusammenwirken komplexer physiologischer und psychologischer Ursachen. Auf sie wirken energetisch-metabolische, thermische, sensorische, mentale und emotionale Beanspruchungskomponenten ein. Für die auf muskuläre Leistung zurückzuführenden, energetisch-metabolischen sowie thermisch bedingten Komponenten liegen bereits seit Jahrzehnten gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen der Belastungsgröße und der daraus resultierenden Herzfrequenz (Beanspruchungsparameter) vor (vgl. u. a. KAMINSKY, 1960; SCHMID-VIELGUT, 1985; BÖLTZ, 1988; HOß, 1994; STAMPFER, 1996 und BERGER, 2003). Unter psychischen Belastungen nachgewiesene Veränderungen der Herzfrequenz sind als alleinige Beurteilungsgröße entsprechender Beanspruchungen umstritten (vgl. u. a. LAURIG ET AL., 1971; KLIMMER UND RUTENFRANZ, 1983; HENGSTENBERG, 1996; NACHREINER, 2002 sowie NICKEL ET AL., 2002).

Die Herzfrequenz sowie ihre Zuordnung zu entsprechenden Teilarbeiten ist demnach ein geeigneter zentralphysiologischer Parameter, um die individuelle, situative Gesamtbeanspruchung des arbeitenden Pferdeführers zu beurteilen.

### 5.4.2.2 Erfassung der Herzfrequenz

Vor Beginn der Hauptstudie musste sich der Pferdeführer einer arbeitsmedizinischen und leistungsphysiologischen Untersuchung im Zentrum für Umwelt- und Arbeitsmedizin (Abteilung Arbeits- und Sozialmedizin) der Georg-August-Universität Göttingen unterziehen. Hierbei wurden der Allgemeinzustand, die Lungen- und Atemfunktion sowie das kardiovaskuläre System untersucht. Der Befund wies einen seinem Alter entsprechenden neutralen Zustand der Versuchsperson aus.

Die Erfassung der Herzfrequenz im Rahmen der durchgeführten Feldversuche erfolgte über die Aufzeichnung des bioelektrischen Signals der Herzmuskelerregung, dem Elektrokardiogramm (EKG). Hierbei wird die typische Zackengruppe, im speziellen die sog. R-Zacke der Herzstromkurve, zur Berechnung der Momentanfrequenz (zeitliche Differenz zwischen zwei R-Zacken) herangezogen.

Bei der gewählten bipolaren Brustwandableitung bestand das primäre Ziel nicht darin, pathologische Erscheinungen im EKG nachzuweisen, sondern während der dynamischen Tätigkeit ein zur Frequenz-Integration zuverlässiges und durch möglichst wenig Artefakte (insbesondere Bewegungsartefakte und Muskelströme) verzerrtes EKG zu erhalten. Aus diesem Grund wurde von der Einthoven-Ableitung (I) nach folgendem Schema abgewichen: die positiv gepolte Elektrode (rot) wurde am rechten Schlüsselbein, die negativ gepolte Elektrode (gelb) unterhalb der linken Brust und die neutrale Elektrode (schwarz) auf dem Brustbein platziert.

Um während der körperlichen Aktivität des Probanden eine gute elektrische Leitfähigkeit zu gewährleisten und den Elektroden-Haut-Übergangswiderstand möglichst gering zu halten, wurden an den Elektroden-Positionen die Körperhaare entfernt und die Klebestellen mit Alkohol gereinigt. Die verwendeten Sauna-Einweg-Elektroden wiesen auch bei schweißnasser

Haut noch sehr gute Hafteigenschaften auf, dennoch wurden sie zusätzlich mit Klebeband gesichert.

Die Messungen während der vorliegenden Untersuchung wurden mit einem PhysioLogger-System der Firma med-NATIC GmbH (München) durchgeführt. Hierbei handelte es sich um einen vom Probanden getragenen physiologischen Mehrkanal-Messwertspeicher mit einem Telemetrie-Modul. Neben der kontinuierlichen Speicherung der Daten über eine ganze Tages-schicht inkl. der Pausen ermöglichte dieses Gerät, den EKG-Verlauf in Echtzeit online auf einem tragbaren Rechner zu überwachen. Die das EKG verzerrenden Muskelartefakte traten vor allem bei Bewegungen auf, in denen der Pferdeführer seinen Rumpf beugte/streckte und/oder seitlich drehte, dies wurde vor allem bei der Fehlerbereinigung an den Aggregaten oder dem Beseitigen von Hiebsresten registriert. Entsprechende Ereignisse konnten bei der Online-Überwachung markiert und im Nachhinein mit einer Artefakt-Unterdrückung der verwendeten Auswertungssoftware kontrolliert bzw. gefiltert werden. Nach Arbeitsende wurden die Messdaten auf einem PC für die nachfolgenden Auswertungsschritte gesichert.

## 5.5 Tierphysiologische Messung

### 5.5.1 Zugkraft

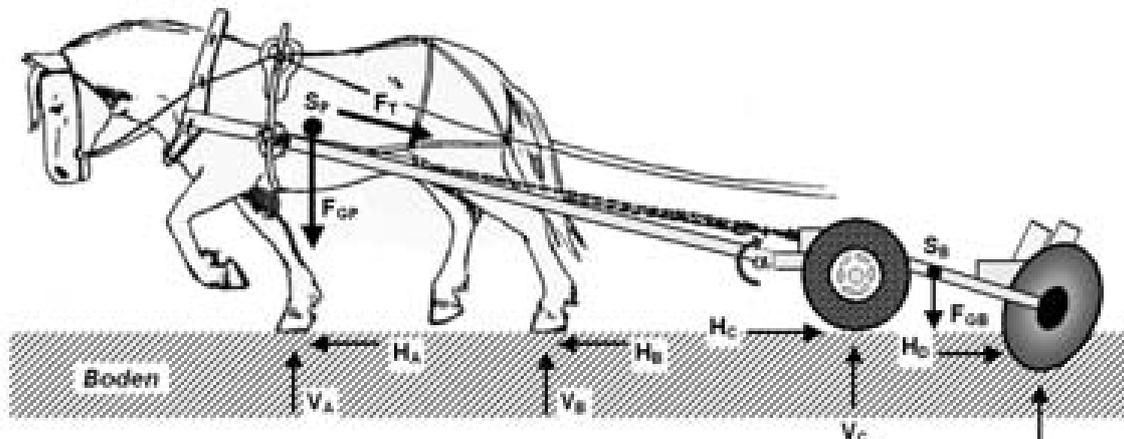
#### 5.5.1.1 Zugkraft von Pferden

Die auf die Zugpferde einwirkenden Belastungen ergeben sich im Vergleich zum arbeitenden Menschen aus der Arbeitsumgebung und der Arbeitsaufgabe. Der jeweiligen Umgebung zuzuordnende Faktoren sind vor allem Flächenzugänglichkeit, Geländeneigung, Klimaeinflüsse, Lärm sowie das verstärkte Auftreten von Insekten in den Sommermonaten. Im Rahmen der jeweiligen Arbeitsaufgabe (hier: Bodenverwundung und kombinierte Rillensaat) existieren des Weiteren physische und psychische Belastungsgrößen. Zu den physischen Faktoren zählt vor allem die dynamische Muskelarbeit im entsprechenden Arbeitsverfahren, die in Abhängigkeit der Zugkraft sowie der Arbeitsgeschwindigkeit des Pferdes variiert. Psychische Belastungskomponenten ergeben sich für Pferde maßgeblich aus dem Vertrauensverhältnis zum Pferdeführer sowie der erforderlichen Konzentration.

Beim Ziehen der verschiedenen Bodenverwundungs- und Saataggregate muss das Pferd bzw. das Pferdegespann bestimmte Kräfte überwinden. In ebenem Gelände werden diese Zugwiderstände vor allem durch die Eigenmasse des jeweiligen Aggregates und der Traktionsresistenz zwischen Gerät und Untergrund bestimmt. Der zu überwindende Zugwiderstand ergibt sich aus dem Rollwiderstand an den Rädern und vor allem den Kräften an den im Boden eingreifenden Bauteilen. Letztgenannte Kraftkomponenten variieren in Abhängigkeit der Bearbeitungstiefe, Bodenart, Feuchte, temporärer Widerstände durch im Boden vorhandene Wurzeln und Skelettanteile sowie der Konstruktion und dem Zustand (Schärfe) dieser Werkzeuge (vgl. OWENDE UND WARD, 1998). Ein weiterer Faktor, der die Zugkraft im Pferdezug beeinflusst, ergibt sich aus der Betrachtung von Abbildung 9. Hier ist unter anderem dargestellt, wie sich das Pferd in das Geschirr stemmt und sich die aufzubringende Zugkraft vom Anhängepunkt am Aggregat hinten unten über die Zugstränge in das Kummet nach vorne oben erstreckt. Der sich aus dem Verlauf der Zugstränge und deren Montage am Aggregat ergebende Winkel bestimmt den Anteil der horizontalen und vertikalen Vektoren der Zugkraft. Je größer (steiler) dieser Zugwinkel ist, desto höher ist die vertikale Komponente, d. h. die anhebende Wirkung der durch das Pferd aufzubringenden Zugkraft. Ein steiler Zugwinkel wird durch kurze Anspannung des Tieres vor dem Gerät, das verwendete Geschirr oder durch eine Höhenverstellung am Anhängepunkt des Aggregates erreicht.

INNS (1990, 1991) hat für tiergezogete Pflüge nachgewiesen, dass eine Verdoppelung des Winkels auf  $30^\circ$  die aufzubringende Zugkraft bei gleicher Bearbeitungsqualität um die Hälfte reduziert. Der Zugwinkel sollte für das Schleifrücken von Rohholz und beim Pflügen mit einfachen Schwing- und Stelzpflügen zwischen  $15^\circ$  und  $20^\circ$  gewählt werden. Beim Ziehen von Geräten mit Radfahrgestellen (Saataggregate, Kalkstreuer etc.) ist der Winkel hingegen in Abhängigkeit von der verwendeten Rad/Reifen-Kombination, deren Montage sowie dem Untergrund in der Regel flacher zu wählen (vgl. DEGREIF, 1987; MACMILLAN, 1992). Bei handgestützten Geräten (i. d. R. Pflüge unterschiedlicher Konstruktion) ergeben sich darüber hinaus Einwirkungen auf die Zugkraft durch Manipulationen des Menschen, in dem der Pflug in die Erde gedrückt, herausgehoben oder abgebremst wird (vgl. STARKEY, 1989).

Die Abbildung 9 stellt vereinfacht die Kräfte dar, die an und zwischen dem Pferd und dem zu ziehenden Aggregat in der Ebene bei gleich bleibender Geschwindigkeit wirken.



**Abbildung 9:** Darstellung der am Pferd und am pferdegezogenen Bodenverwundungsaggregat wirkenden Kräfte; FT = Zugkraft, FGP = Gewichtskraft des Pferdes, FGB = Gewichtskraft des Betriebsmittels, SP = Schwerpunkt des Pferdes, SB = Schwerpunkt des Betriebsmittels,  $\alpha$  = Zugwinkel, horizontale (H) und vertikale (V) Bodenstützkräfte der Vorder- (A) bzw. Hinterbeine des Pferdes (B), horizontale (H) und vertikale (V) Bodenstützkräfte des Reifens (C) und der Scheibenege (D)

Die Anspannung sowie das Geschirr und damit einhergehend der Zugwinkel tragen neben der Eigenmasse des Aggregates bedeutend dazu bei, dass die sich über einen Pferdearbeitstag ergebenden Belastungen in einem für das Tier erträglichen physiologischen Rahmen verbleiben. Die innere Leistungsfähigkeit des Pferdes wird hauptsächlich durch Art/Rasse, Größe, Eigenmasse und Kondition beeinflusst (vgl. STARKEY, 1989).

Die durch das Tier zu erbringende Dauerzugkraft oder die maximale Zugkraft wird häufig im Verhältnis zur Eigenmasse des Zugtieres angegeben. Die über einen Arbeitstag durchschnittlich zu erbringende Zugkraft wird für Pferde im Bereich von 10–15 % der Gewichtskraft angegeben (vgl. u. a. HOPFEN, 1969; GOE UND MCDOWELL, 1980; KWF, 1990; HOFFMANN, 1992).

Für die Konstruktion von entsprechenden Aggregaten für den tierischen Zug sind die auftretenden maximalen Kräfte in Zugrichtung von Bedeutung, wie sie z. B. bei einem Kontakt mit Steinen oder Wurzeln auftreten. Hier kann plötzlich das 5–10fache der Gewichtskraft des Tieres auftreten und zu Verletzungen des Tieres und/oder zu Beschädigungen am Geschirr und Betriebsmittel führen (vgl. VARO UND VAINKAINEN, 1958; STARKEY, 1989).

Die Leistungshergabe des Pferdes oder allgemeiner des Zugtieres hängt wesentlich von den Fertigkeiten und Fähigkeiten des jeweiligen Führers ab. Die Bereitschaft des Pferdes, die indi-

viduelle Zugleistung effektiv im Verfahren umzusetzen, bestimmt der Führer neben der angepassten Anspannung und der korrekten Wahl sowie dem Zustand des Geschirrs auch durch die Arbeitsweise (z. B. die Bearbeitungsgeschwindigkeit). Darüber hinaus ist die Wahl des Pausenregimes bedeutend für eine über den Arbeitstag vertretbare Zugbelastung. Das Pferd dokumentiert die Schwere des Zuges durch die Körperhaltung, die dem Fuhrmann Informationen über entsprechende Überforderungen gibt, die es über entsprechende Stellgrößen wie die Geschwindigkeit zu verhindern gilt (vgl. BUHLE, 1923; BJÖRCK, 1958; PEARSON ET AL., 1989; STARKEY, 1989).

### 5.5.1.2 Erfassung der Zugkraft

Die Zugkraft wurde durch eine DMS-basierte Zugkraftanlage (*dynafor<sup>®</sup> LLXTR 50 kN*) der Firma Greifzug Hebezeug GmbH (Bergisch Gladbach) erfasst. Diese messtechnische Lösung zeichnet sich vor allem durch eine kompakte Bauweise mit integriertem Messverstärker aus. Die Spannungsversorgung geschieht durch Akkus und der Messvorgang kann via Funk-Fernablesegerät sowohl kontrolliert als auch parametrisiert werden.

Die Anbringung des Messgerätes erfolgte innerhalb des Gespanns zwischen dem Ortscheit des Pferdes P1 und dem jeweiligen Aggregat bzw. bei Zweispännern der Spielwaage. So konnten die durch dieses Pferd aufzubringenden Kräfte in Zugrichtung kontinuierlich registriert werden.

Das Messsignal wurde intern verstärkt, digitalisiert und per Funk an einen zusätzlich entwickelten Empfänger des physiologischen Datenloggers (PhysioLogger, vgl. Kapitel 5.4.1) gesendet und zeitlich synchron im 4-Hz-Intervall mit den physiologischen Daten des Pferdeführers gespeichert. Die Erfassung der Zugkraft konnte ebenfalls parallel mit dem EKG auf einem Notebook zeitgleich überwacht werden.

## 5.5.2 Herzschlagfrequenz

### 5.5.2.1 Herzschlagfrequenz bei Pferden

Die Herzschlagfrequenz ist auch in der Tiermedizin ein wissenschaftlich akzeptierter Parameter zur Erfassung der physiologischen Reaktion des kardiovaskulären Systems von Pferden auf einwirkende Belastungen (vgl. u. a. BAYER, 1968; EHRLEIN, 1970; GOTTLIEB ET AL., 1988).

Wie beim Menschen ergibt sich die spezifische Herzfrequenz durch komplexe physiologische Regulationsmechanismen (vgl. Kapitel 5.4.2.1). Die Herzfrequenz unterliegt bei Pferden – je nach Art und Individuum – relativ großen Schwankungen. Beeinflussende Faktoren sind hier vor allem Rasse, Größe, Alter, Geschlecht, Einflüsse auf das zentrale Nervensystem, Krankheiten, Tages- und Jahreszeit sowie Witterung (vgl. REICHERT, 1909; EHRLEIN, 1970; SCHEUNERT UND TRAUTMANN, 1976; ROSE ET AL., 1990). Der maßgebliche Einfluss auf die Herzschlagfrequenz bei Arbeitspferden resultiert aus muskulärer (energetisch-metabolischer) Arbeit, die auf das kardiovaskuläre System eine positiv dromotrope<sup>2</sup> Wirkung ausübt. Hierbei stehen Arbeitsgeschwindigkeiten und aufzubringende Zugkräfte seit Jahrzehnten im Fokus der tiermedizinischen Erforschung der Leistungsphysiologie von Pferden.

---

<sup>2</sup> Bei körperlicher Belastung wird die Herzleistung durch die Einwirkung *sympathischer* Nervenfasern gesteigert. Die Wirkung der freigesetzten Katecholamine (Noradrenalin und Adrenalin) am Herzen besteht aus einer Steigerung der Kontraktionskraft des Herzens (*positiv inotrop*), einer Erhöhung der Herzfrequenz (*positiv chronotrop*) und einer rascheren Überleitungsgeschwindigkeit im Vorhofkammer-Knoten (*positiv dromotrop*) (vgl. SCHRADER, 1996).

Zugpferde, die den Kaltblütern zuzuordnen sind, weisen mit durchschnittlich  $42 \text{ min}^{-1}$  in Ruhe eine leicht höhere Herzfrequenz auf als Warmblüter mit ca.  $28\text{--}40 \text{ min}^{-1}$  (vgl. HINTZ ET AL., 1989).

Den Beginn einer Belastung spiegelt i. d. R. ein Ansteigen der Herzschlagfrequenz wider. Bei spontan einsetzender, intensiver Belastung erfolgt ein Anstieg der Herzfrequenz, gefolgt von einem langsamen, stetigen Abfall auf einen der Intensität der Belastung angepassten Erhaltungswert (vgl. KRZYWANEK ET AL., 1970; LINDHOLM UND SALTIN, 1974; FREGIN UND THOMAS, 1983; HARKINS UND KAMERLING, 1991). Bei einer submaximalen Belastung kann wie beim Menschen ein entsprechender Plateauwert (*Steady State*) ohne eine anfängliche, überschießende Reaktion erreicht werden (vgl. VALBERG ET AL., 1989). BAYER (1968), PERSSON UND ULLBERG (1974), WILSON ET AL. (1983), ART ET AL. (1990) sowie HARRIS UND SNOW (1992) beobachteten einen fortgesetzten Anstieg der Herzfrequenz innerhalb definierter Belastungsphasen über den Erhaltungswert hinaus.

Die Herzfrequenz steigt in einem Frequenzbereich zwischen  $120$  und  $210 \text{ min}^{-1}$  in einer linearen Beziehung zur Belastung (z. B. Laufgeschwindigkeit) an (vgl. LINDHOLM UND SALTIN, 1974; PERSSON UND ULLBERG, 1974). Unterhalb von  $120 \text{ min}^{-1}$  wirken individuelle Umwelteinflüsse sowie psychische Faktoren auf die Herzfrequenz ein und sind die Ursache für die in einzelnen Studien beschriebene Variabilität sowie den starken Anstieg der Herzschlagfrequenz vor dem eigentlichen Beginn der Belastung (vgl. PERSSON, 1983; THORNTON, 1985; ART ET AL., 1990; SCHÄFER, 2000). Oberhalb von  $210 \text{ min}^{-1}$  wird die individuelle maximale Herzfrequenz erreicht, die in der Regel zwischen  $210$  und  $250 \text{ min}^{-1}$  liegt (vgl. LINDHOLM UND SALTIN, 1974; PERSSON, 1983; SNOW, 1990).

Nach dem Ende der Belastung sinkt die Herzfrequenz innerhalb der ersten Minute sehr rasch und im Anschluss wesentlich langsamer bis zur physiologischen Herzfrequenz in Ruhe ab. Die Rate des Abfalls ist u. a. abhängig von Fitness, Umgebungstemperatur, Rasse sowie zuvor vollbrachter körperlicher Arbeit. Bis zum Wiedererreichen der Ruheherzfrequenz vergehen bei submaximaler Arbeit etwa 20 bis 30 Minuten, nach Belastung von Pferden im Rennsport werden hierfür nach PHYSICK-SHEARD (1985) mindestens 60 Minuten benötigt (vgl. PERSSON, 1967; STEWART, 1972; AITKEN ET AL., 1973; EHRLEIN ET AL., 1973; ROSE, 1983). Während beim Menschen eine trainingsbedingte Bradykardie<sup>3</sup> als gesichert nachgewiesen gilt, wird beim Pferd die Anpassung des kardiovaskulären Systems an Trainingsanforderungen kontrovers diskutiert (vgl. u. a. SEXTON ET AL., 1987; PHYSICK-SHEARD, 1985; GOTTLIEB-VEDI et al., 1995; SCHÄFER, 2000).

### 5.5.2.2 Erfassung der Herzschlagfrequenz

Im Rahmen der Untersuchungen wurde die Herzfrequenz der Versuchspferde kontinuierlich in 5-Sekunden-Intervallen mit Hilfe des Messsystems ‚*Horsetrainer*‘ (Firma Polar Eelectro Oy, Finnland) gemessen. Dieses System besteht aus einem Sender (Transmitter-Set für Pferde) und einem Empfänger (Polar Accurex Plus™). Der Empfänger in Gestalt einer Armbanduhr besitzt eine integrierte Uhr mit Stoppfunktion sowie einen Speicher für entsprechend konfigurierte Datenaufzeichnungen. Über Metallelektroden wird die Herzfrequenz in Form von elektrischen Impulsen an den Sender weitergeleitet, per Funksignal an den Empfänger gesendet und dort gespeichert.

Die positive Elektrode des Transmitter-Sets wurde auf der linken Körperseite etwa 10 cm distal des Widerristes, die negative Elektrode ventral auf der rechten Seite unter einem elastischen

<sup>3</sup> Unter einer Bradykardie versteht man eine regelmäßige oder unregelmäßige (*Bradyarrhythmie*) Verlangsamung der Herzfrequenz (beim Menschen  $< 50 \text{ min}^{-1}$ ).

Gurt zusätzlich zum Kummetschirr befestigt. Um einen möglichst guten Kontakt zur Haut herzustellen, wurde das Fell an den Elektrodenpositionen mit destilliertem Wasser angefeuchtet. Der Sitz und die Feuchtigkeit der Elektroden wurden während der Versuche regelmäßig (ca. alle 5 Minuten) kontrolliert. Der Empfänger war am Kummetschirr des Pferdes in Höhe des Widerristes befestigt.

Nach Abschluss der Versuche während eines Arbeitstags wurden die Daten über ein Interface (Polar Interface Plus™) auf einen Computer übertragen und mit einer entsprechenden Software (Polar Advisor Software™) weiterverarbeitet bzw. in gängige Dateiformate (z. B. ASCII) exportiert.

### 5.5.3 Blutlaktat

#### 5.5.3.1 Der biochemische Parameter Laktat

Laktat entsteht als Zwischenprodukt der anaeroben Glykogenolyse und Glykolyse und wird neben vielen anderen Körperzellen vor allem in den Skelettmuskelzellen unter einwirkenden Belastungen in Abhängigkeit von der Intensität, Dauer und Kontinuität der Belastung produziert. In zahlreichen tiermedizinischen Veröffentlichungen ist die Blutlaktatkonzentration bei unterschiedlichen (i. d. R. Sport-) Pferden als geeigneter Parameter zur Überprüfung der Fitness bzw. des Trainingszustandes dokumentiert (vgl. u. a. SNOW, 1990; HARRIS UND SNOW, 1992; SCHÄFER, 2000; LEWING, 2001).

Der Laktatruhwert im Blut von Pferden wird zwischen  $< 1,0$  mmol/l und  $1,5$  mmol/l angegeben (vgl. LINDNER, 1997).

Mit Beginn der Belastung bei geringer Intensität steigt der Laktatgehalt im Blut nur in sehr geringem Umfang an, bis der anaerobe Schwellenwert erreicht wird. Nach HODGSON UND ROSE (1994) kann bei diesem Wert, dem OBLA (Onset of blood lactate accumulation), eine Laktatkonzentration von  $2-4$  mmol/l im Blut nachgewiesen werden. Nach dem Erreichen des anaeroben Schwellenwertes steigt der Laktatgehalt im Blut steil an (vgl. VALBERG ET AL., 1989; ROSE, 1991; HARRIS UND SNOW, 1992). Dieser Anstieg wird durch eine exponentielle Beziehung zwischen Belastung (z. B. Laufgeschwindigkeit) und Blutlaktatgehalt beschrieben (vgl. LINDNER, 1997).

Der Zeitpunkt des Auftretens der maximalen Laktatkonzentration im Blut ist abhängig von der vorangegangenen Intensität der Belastung und der physiologischen Konstitution des Pferdes. Bei starken Belastungen wird die maximale Blutlaktatkonzentration 6 bis 10 Minuten nach dem Ende der Belastung erreicht (vgl. KRZYWANIEK ET AL., 1976; MILNE, 1982 und HARRIS ET AL., 1991). Andere Autoren differenzieren den Zeitpunkt für den Eintritt des maximalen Laktatgehaltes im Blut nach der Intensität der erbrachten Leistung. Hierbei wird von einem erreichten Maximum der Blutlaktatkonzentration ausgegangen. Unterhalb einer Konzentration von  $8$  mmol/l tritt der maximale Wert unmittelbar am Ende der Belastung auf, oberhalb von  $8$  mmol/l hingegen kann der Laktatgehalt noch bis zu 15 Minuten danach weiter ansteigen (vgl. LINDNER, 1997). In Abhängigkeit der Belastung werden in der Literatur Laktatkonzentrationen im Blut des Pferdes von  $2$  mmol/l bis zu mehr als  $30$  mmol/l angegeben (vgl. SNOW ET AL., 1983; GOTTLIEB ET AL., 1989; MARLIN ET AL., 1995; LINDER, 1997).

Die Blutlaktatkonzentration sinkt unterschiedlich schnell (zwischen  $0,3$  und  $3,0$  Stunden). Die Geschwindigkeit ist von Faktoren wie Handling und Aktivität der Pferde nach Belastung, der Fitness sowie der Höhe der erreichten Laktatkonzentration abhängig (vgl. KRZYWANIEK, 1974; KEENAN, 1979; MILLER UND LAWRENCE, 1987 sowie LINDNER ET AL., 1992).

### 5.5.3.2 Blutentnahme und Laktatbestimmung

Bei der Untersuchung der Laktatkonzentration konnte veterinärmedizinische Unterstützung durch das Institut für Tierzucht und Haustiergenetik der Georg-August-Universität Göttingen gewonnen werden. Die Probenentnahme erfolgte vor Belastung, d. h. vor der ersten zu bearbeitenden praxisnahen Teilfläche, und kurz nach der Bearbeitung der vierten Fläche. Zusätzlich wurden Blutproben nach einer zehnmütigen Pause genommen. Bei der streifenweisen Bearbeitungsvariante wurde analog dazu vorgegangen.

Die Blutentnahme geschah nach Desinfektion durch die Punktion der *Vena jugularis externa* (Äußere Drosselvene, äußere Halsvene) mit 2 ml-Einmalspritzen und Einwegkanülen (0,9 x 40 mm). Die Laktat-Bestimmung wurde mit einem Miniphotometer (*plus LP20*) der Dr. Bruno Lange GmbH & Co. KG (Düsseldorf) durchgeführt, dessen Messwellenlänge 520 nm beträgt.

Zur Analyse wurden 10 µl Blut unmittelbar nach der Entnahme in eine Einzeltestküvette pipettiert, die eine Pufferlösung (4-Chlorphenol 1,8 mmol/l; Natriumazid < 0,1 %; PIPES-Puffer 20 mmol/l), enthielt, wodurch das Blut sofort und vollständig hämolysierte. Die Messung folgte der LOD-PAP-Methode, d. h. der hämolysierten Lösung wurde ein Startreagenz bestehend aus Laktatoxidase (LOD), Peroxidase (POD) und 4-Aminophenazon beigegeben, was folgende Reaktionen auslöste: Laktat reagiert unter Sauerstoff zu Pyruvat und Wasserstoffperoxid. Diese Reaktion wurde durch die Laktatoxidase katalysiert. Das Wasserstoffperoxid wurde dann mit Hilfe des 4-Aminophenazon in den Chinoniminfarbstoff überführt (POD als Katalysator). Dieser Farbkomplex konnte photometrisch gemessen werden. Die Messung dauerte in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur 2–12 Minuten. Zur Qualitätssicherung wurden vor jeder Bestimmung entsprechende Standardlösungen als Referenzen gemessen.

## 5.6 Statistische Datenanalyse

Einen ersten Überblick der jeweiligen Untersuchungsergebnisse gestatten gängige Parameter der deskriptiven Statistik wie Stichprobenumfang (SP), Summe (SUM), arithmetischer Mittelwert (MW), Median (Z), Minimalwert (MIN), Maximalwert (MAX), Standardabweichung (SD) und Variationskoeffizient (CV)<sup>4</sup>.

Die Beurteilung der Mittelwertdifferenzen verschiedener Gruppen fand mit Verfahren der schließenden Statistik statt. Beim Vergleich normalverteilter, unabhängiger Daten wurde der t-Test (zwei Stichproben) bzw. innerhalb der einfaktoriellen ANOVA der Tukey-Test für den multiplen Mittelwertvergleich (k Stichproben) angewandt. Die Überprüfung gesicherter Unterschiede von Mittelwerten aus gepaarten Stichproben erfolgte mit der t-Test Variante für verbundene Stichproben.

Daten, die keiner Normalverteilung folgten, wurden mit dem U-Test nach Mann und Whitney (zwei Stichproben) bzw. dem Kruskal-Wallis-H-Test (k Stichproben) vergleichend analysiert. Bei Daten aus abhängigen Stichproben wurde auf den Wilcoxon-Test für Paardifferenzen zurückgegriffen. Im Fokus der genannten nichtparametrischen Verfahren stand dabei weniger der Vergleich der empirischen Verteilungen bzw. Rangsummen, als vielmehr die Aussage einer zentralen Tendenz zu kleineren oder größeren Werten.

Ob die Messwerte bzw. die arithmetischen Mittelwerte innerhalb der gewählten Stichproben die Bedingungen einer Normalverteilung erfüllten, wurde mit Hilfe des Kolmogoroff-Smirnoff-Einstichprobentests geprüft. Weitere notwendige Voraussetzungen dieser statistischen Verfahren wurden im Vorfeld kontrolliert, so z. B. die Varianzhomogenität der Daten über den Leve-

---

<sup>4</sup> Die in der vorliegenden Arbeit gewählten Abkürzungen der mathematisch-statistischen Notation weichen von den üblicherweise angewandten Kürzeln ab. Dieses Vorgehen war nötig, um eine doppelte Belegung der Abkürzungen für Parameter der deskriptiven Statistik mit den verwendeten SI-Einheitenzeichen für physikalische Größen zu vermeiden.

ne-Test. Als Signifikanzniveau wurden innerhalb der aufgeführten statistischen Testverfahren jeweils 5 % unterstellt ( $\alpha = 0,05$ ). Die herangezogenen statistischen Verfahren sind in den tabellarischen Übersichten der Ergebnisse inklusive der ermittelten Überschreitungswahrscheinlichkeiten (p-Werte) angegeben.

Des Weiteren gaben multiple lineare Regressionen Auskunft über die Beziehungen zwischen Zielgröße (Prädiktor) und Einflussgrößen (Regressoren). Zu den zur Beurteilung der Güte und Anpassung der Modelle verwendeten Parametern zählten v. a. das korrigierte Bestimmtheitsmaß sowie die p-Werte des Regressionsmodells und die in das Modell integrierten Regressoren. Weiterhin wurden die berechneten Faktoren (Konstante und Koeffizienten) der entsprechenden Regressionsgleichungen wiedergegeben.

Für die statistischen Berechnungen wurde das Programm SPSS (Version 8.0 for WINDOWS, englischsprachige Fassung; SPSS Inc, Chicago – USA) verwendet.

Weitere Informationen zu den erwähnten statistischen Testverfahren sind unter anderem BACKHAUS ET AL. (2000), BRUNNER UND MUNZEL (2002) und SACHS (2002) sowie der in diesen Quellen angegebenen Literatur zu entnehmen.

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Arbeitsablaufstudien

#### 6.1.1 Zeitverbrauch der streifenweisen Bearbeitungsvariante

##### 6.1.1.1 Datenbasis

Ziel der Arbeitsablaufstudien in dieser standardisierten Bearbeitungsvariante war es, die absolute und relative Dauer der Tätigkeiten innerhalb des Arbeitsablaufes der einzelnen Verfahren zu erfassen. Darüber hinaus sollte anhand dieser Datenbasis ein Überblick der leistungs- und produktivitätsrelevanten Faktoren gewonnen werden.

Die im Rahmen der Fortschrittszeitstudien am Video erstellten Tabellen wurden jeweils nach Arbeitsverfahren, Bestand und Teilflächen separat in EXCEL-Arbeitsmappen festgehalten. Innerhalb der jeweiligen Dateien wurden die erfassten Zeiten getrennt nach der Nummer der bearbeiteten Streifen sowie Zwischenfelder und der ausgeschiedenen Tätigkeiten abgespeichert (vgl. Tabelle 7). Mit Hilfe der Kontrollzeiten aus den Feldstudien erfolgte die Korrektur und Ableitung der Uhrzeit zu dem einzelnen Arbeitsablaufabschnitt (Ereignis).

Diese Datenbasis diente darüber hinaus der zeitlich synchronen Verschneidung mit weiteren in der vorliegenden Untersuchung registrierten Daten, wie z. B. der Herzfrequenz der Pferde oder der Zugkraft zwischen Pferd und Betriebsmittel. Somit wurde z. B. die Herzschlagfrequenz der Pferde den jeweiligen Tätigkeiten zugeordnet, die für eine weitere vergleichende Analyse herangezogen werden konnte. Jeder Datensatz wurde zudem um die gemessenen Längen sowie die Hangneigung der ausgeschiedenen Reihen ergänzt.

Wie bereits in Kapitel 5.2.3 beschrieben, konnten je Teilfläche fünf dieser streifenweise gegliederten Arbeitszyklen ausgewiesen werden. Die Berechnung des Zeitverbrauches der jeweiligen Arbeitsablaufabschnitte wurde durch die Bildung von Differenzen der Uhrzeiten gewährleistet. Hierbei wurde die Reine Arbeitszeit (RAZ) für die im Folgenden aufgeführten Berechnungen herangezogen. Die erfassten Allgemeinen Zeiten (AZ) waren durch einen hohen Anteil versuchsbedingter Zeiten belastet und wurden von weiteren Analysen ausgeklammert. Die konsequente Bearbeitung dieser parallel verlaufenden Strecken führte zu zeitaufwändigen und insofern störenden und praxisfremden Wendemanövern am Ende dieser Zyklen innerhalb der ausgewiesenen Zwischenfelder, so dass die anfallenden Zeiten als Nicht Auswertbare Zeiten (NAZ) ebenfalls von weiteren Analysen ausgeschlossen wurden.

Eine detaillierte statistische Betrachtung der Zeitverbrauchswerte erfolgte nach der Überprüfung auf Normalverteilung mit dem K-S-Einstichprobentest, der für die einzelnen Stichproben keine Normalverteilung auswies. Um die Unterschiede der Mittelwerte statistisch abzusichern, wurde der U-Test nach Mann und Whitney bzw. bei multiplen Vergleichen der H-Test nach Kruskal-Wallis herangezogen. Bei den Berechnungen wurde jeweils ein Signifikanzniveau von 5 % ( $\alpha = 0,05$ ) gewählt.

Um den Einfluss der erfassten Störungen innerhalb der Primärtätigkeit im Rahmen der Arbeitsaufgabe statistisch beurteilen zu können, fand die Berechnung von multiplen linearen Regressionen statt. Hierzu wurde ein statistisch eher ungewöhnlicher Weg beschritten, indem die metrisch skalierten Zeitverbrauchswerte für die ausgewiesenen Tätigkeiten und die zyklus-spezifischen Unterbrechungen (vgl. Tabelle 7) geclustert wurden, um sie dann mit dem Zeitverbrauch je Reihe (Zyklus) vergleichen zu können. Die Clusterung erfolgte in äquidistanten und halboffenen Zeitintervallen mit einer Intervallbreite von 5 s. Dieser auf den Rohwerten der Erhebung basierende Datensatz umfasste 12 Spalten, die die jeweiligen Tätigkeiten (Prädikto-

ren) auswiesen, eine Spalte führte den Regressor (Zeitverbrauch/Zyklus) sowie vier Spalten die Gruppierungsvariablen Arbeitsverfahren, Bestand, Teilfläche und Reihe auf. Nach Abschluss von zwei Zyklen konnten insgesamt 198 Fälle für die weitere Analyse innerhalb des Base-Modules des Statistik-Programmpaketes SPSS genutzt werden.

Die theoretische Voraussetzung für den im Folgenden dargestellten regressionsanalytischen Ansatz ist die Normalverteilung. Die zur Auswertung herangezogenen Variablen dieses Datensatzes wurden wiederum mit dem K-S-Einstichprobentest auf diese Bedingung geprüft. Die Normalverteilung des vorliegenden Datenmaterials konnte nur vereinzelt als ausreichend gesichert nachgewiesen werden, bei den meisten Variablen kann nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden. Aufgrund dieser Ergebnisse müssten mehrere Variablen von der multiplen Regressionsanalyse ausgeschlossen werden. Vor dem Hintergrund einer weitgehenden Auswertung des Datenmaterials für eine Identifikation der den Verfahrensablauf störenden Tätigkeiten wurden allerdings auch für den Fall, dass die Werte nur annähernd bzw. nicht normalverteilt sind, Regressionen berechnet. Die Ergebnisse dieser Analyseschritte müssen daher mit der nötigen Vorsicht interpretiert werden.

### 6.1.1.2 Zusammensetzung des Zeitverbrauchs

Die durchschnittlichen Zeitverbrauchswerte je Reihe, untergliedert nach Tätigkeitsgruppen innerhalb der streifenweisen Bearbeitungsvariante, sind in Abbildung 10 für die Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* und *Meinberg Wundstreifenpflug* getrennt nach den Beständen aufgeführt.

Beim Arbeitsverfahren *Eberswalder Streifenpflug* in der ersten Bestandsvariante benötigte das Pferdegespann im Mittel 52,9 s für die Bodenverwundung eines Zyklus mit der durchschnittlichen Länge von 50,3 m. 87,5 % des Zeitverbrauchs entfielen hier auf die Primärtätigkeit, während 12,7 % für unterschiedliche Unterbrechungsereignisse (Sekundärtätigkeit) aufgewendet werden mussten. Betrachtet man eine weitere Untergliederung innerhalb der ausgewiesenen Tätigkeiten, so konnten im Mittel 83,5 % für die Bodenverwundung im engeren Sinn (AAA 11) verbucht werden. Dieses Ereignis war mit einer Dauer von durchschnittlich 18,8 s auch das kontinuierlichste. Die Sekundärtätigkeit lag mit durchschnittlich 4,5 s/Reihe bei diesem Arbeitsverfahren hauptsächlich in der Orientierung (AAA 21), also in der Wahrung einer produktivitätssteigernden Übersicht zu Arbeitsobjekt und Gespann. Die Fehlerbereinigung (AAA 23) hat am gesamten Zeitverbrauch im Mittel 2,4 % beansprucht. Es handelte sich hierbei in vier Fällen um das Wiederaufrichten des Betriebsmittels nach Kontakten mit Resten der vergangenen Hiebsmaßnahmen.

Im Versuchsbestand II benötigte die Bodenverwundung mit dem *Eberswalder Streifenpflug* im Durchschnitt 96,5 s je Reihe bei einer mittleren Streifenlänge von 51,1 m. Dabei entfielen 56,8 % des Zeitverbrauchs je Zyklus auf die Primärtätigkeiten, die übrigen 43,2 % wurden den Sekundärtätigkeiten zugerechnet. Einer weiteren Aufschlüsselung in Teilereignisse kann man entnehmen, dass die Bodenverwundung (AAA 11) einen Anteil von 49 % am gesamten Zeitverbrauch ausmachte. Auf die Überführung von Schlagabraum entfielen insgesamt 23 Beobachtungen mit einem Zeitverbrauch von durchschnittlich 6 s je Zyklus. Stocküberführungen traten mit 0,9 s/Reihe insgesamt sechsmal auf. Bei den Verteilaktivitäten hat das Räumen von Schlagabraum (AAA 22) durchschnittlich 19,7 s/Reihe in Anspruch genommen, während das Orientieren des Pferdeführers (AAA 21) bei 46 Beobachtungen mit durchschnittlich 11,3 s je Arbeitszyklus erfasst wurde. Die insgesamt 15 Verweigerungen des Pferdes ohne ersichtlichen Grund (AAA 26) konnten mit durchschnittlich 1,7 s/Reihe verbucht werden. Bei der Betrachtung der Dauer einzelner Teilereignisse benötigte die Verwundung ('AAA 11') im Mittel 9,9 s, bevor ein anderes Ereignis dieses ablöste. Am längsten dauerten das Räumen (AAA 22) mit 35,7 s sowie die Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft des Aggregats (AAA 23) mit

18,2 s. Bei den insgesamt neun Fehlerbereinigungen am Aggregat musste in sechs Fällen der umgekippte Pflug wieder aufgerichtet werden und dreimal erfolgte die Registrierung einer in den Hiebsresten verhedderten Führerleine.

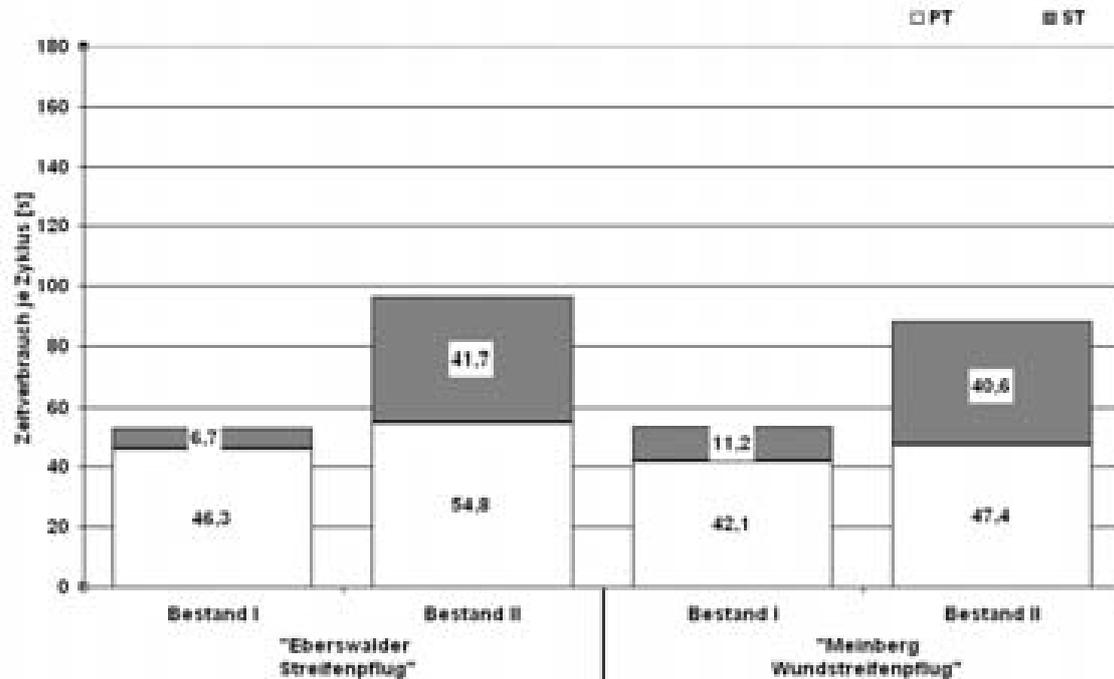


Abbildung 10: Mittlerer Zeitverbrauch je Zyklus mit Aufschlüsselung nach Tätigkeitsgruppen (PT = Primärtätigkeit, ST = Sekundärtätigkeit) für die Bodenverwendungsverfahren in beiden Bestandsvarianten

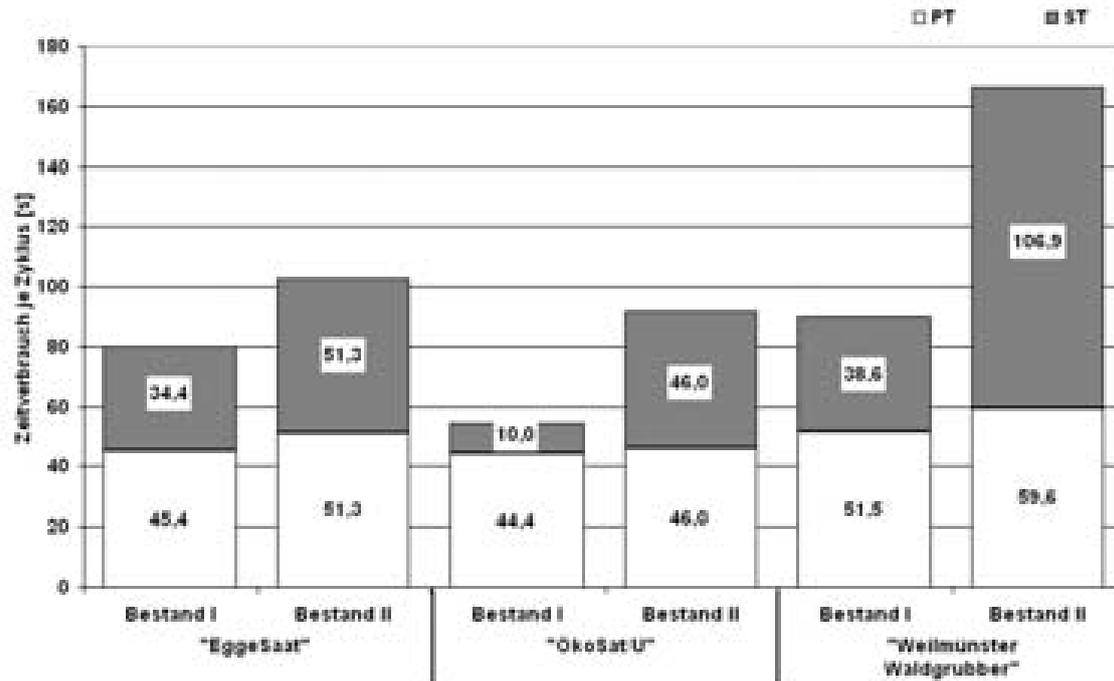
Die Ergebnisse innerhalb dieser Bearbeitungsvariante für das Arbeitsverfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* sind ebenfalls in Abbildung 10 dargestellt. Der Zeitverbrauch je Zyklus betrug 53,3 s bei einer mittleren Streifenlänge von 50,6 m. Dabei konnten 79 % auf die Primär- und 21 % auf die Sekundärtätigkeiten gebucht werden. Die weitere Untergliederung der Ereignisse in Anlehnung der Tabelle 7 zeigt, dass bei der Primäraktivität 4,9% des Zeitverbrauchs auf insgesamt 24 Stocküberfahrungen (AAA 13) entfielen. Die Hälfte der Registrierungen dieses Ereignisses war auf Kontakte mit Wurzelanläufen der Stöcke zurückzuführen. Auch Überfahrungen von Schlagabraum (AAA 14) und Endrollen (AAA 15) kamen während der Primärtätigkeit bei diesem Verfahren vor. Bei den Verteilaktivitäten wurde die Orientierung (AAA 21) mit einem mittleren Zeitverbrauch von 4,1 s je Reihe insgesamt 12-mal erfasst. Der Räumvorgang verbrauchte 4,3 s je Arbeitszyklus, im Mittel unterbrach das Räumen von Schlagabraum (AAA 22) mit 21,5 s die Primärtätigkeit innerhalb eines Streifens. Die dem Pferd zugeordneten Tätigkeiten wurden insgesamt vierzehn Mal notiert. Im Mittel verharrte das Pferd ohne ersichtlichen Grund (AAA 26) 1,7 s/Reihe und das Stoppen vor einem Hindernis (AAA 27) mittelte sich auf 1,0 s je Zyklus. Die Dauer der Teilereignisse schwankte zwischen 2,0 s bei Überfahrungen von Stammteilen und 21,5 s für das Räumen von Hiebsresten (AAA 22). Der Verwundungsvorgang (AAA 11) dauerte im Durchschnitt 9,7 s, bevor dieser durch ein störungsbedingtes Teilereignis abgelöst oder durch eine der Verteilaktivitäten unterbrochen wurde.

Im zweiten Versuchsbestand erhöhte sich der Zeitverbrauch je Reihe bei diesem Verfahren auf durchschnittlich 88,0 s bei einer mittleren Streifenlänge von 51,3 m. Der Anteil der Primärtätigkeiten am Zeitverbrauch betrug 53,9 %, Sekundärtätigkeiten machten 46,1 % des Zeitverbrauchs je Zyklus aus. Eine Untergliederung der Ereignisse zeigt, dass ca. 10 % des Zeit-

verbrauchs der Primäraktivität auf störungsbedingte Teilereignisse entfielen. Die Überführung von Schlagabraum (AAA 14) war mit einem mittleren Zeitverbrauch von 6,7 s/Reihe bei 25 Beobachtungen ein bedeutendes Ereignis der Sekundärtätigkeiten. Die Überführung eines Stockes (AAA 13) kam während der Bodenverwundung insgesamt dreizehn Mal vor (1,5 s/Zyklus), viermal wurde hierbei der Wurzelanlauf tangiert. Bei der Sekundärtätigkeit wurde die Orientierung (AAA 21) mit einem mittleren Zeitverbrauch von 10,2 s je Reihe insgesamt 28-mal erfasst. Der Räumvorgang (AAA 22) verbrauchte innerhalb eines Streifens 28,4 s je Reihe. Die Dauer des Arbeitsablaufabschnittes Bodenverwundung (AAA 11) betrug durchschnittlich 8,3 s, während die Überführung von Hiebsresten (AAA 14) im Mittel 5,4 s andauerte. Der einzelne Räumvorgang (AAA 22) unterbrach den Arbeitsablauf für 22,7 s.

Bei dem Rillensaatterfahren *EGGE* ergab sich im Bestand I bei der Bearbeitung einer Reihe von durchschnittlich 50,4 m Länge ein mittlerer Zeitverbrauch von 79,8 s/Zyklus. Die in Abbildung 11 zusammengefassten Ergebnisse zeigen, dass sich für dieses Verfahren der Zeitverbrauch auf 56,9 % Primär- und 43,1 % Sekundärtätigkeiten verteilte. Die weitere Untergliederung der Zeiten wies aus, dass bei der Primäraktivität 2,5 % des Zeitverbrauchs je Zyklus auf insgesamt 15 Stocküberführungen (AAA 13) entfielen, 40 % dieses Ereignisses bestanden aus Teilkontakten mit Wurzelanläufen. Ebenfalls traten Überführungen von Schlagabraum (2,2 %) und Stammteilen (1,8 %) auf. Bei den Verteilaktivitäten wurde die Fehlerbereinigung am Betriebsmittel (AAA 23) mit einem mittleren Zeitverbrauch von 13,7 s je Reihe bei 3 Registrierungen erfasst. Hierbei handelte es sich um zweimaliges Wiederaufrichten des umgestürzten Aggregates, einmal musste die Kette der Saatdosierung neu aufgezogen werden. Die Orientierung (AAA 21) mit 23 Ereignissen beanspruchte bei Zyklusbetrachtung im Mittel 9,1 s. In fünf Fällen wurde der Schlagabraum als hindernd angesprochen und geräumt (6,2 s/Zyklus). Die dem Pferd zugeordneten Verteiltätigkeiten kamen insgesamt 23-mal vor. Dabei betrug der mittlere Zeitverbrauch beim Stoppen ohne ersichtlichen Grund (AAA 26) 2,0 s und beim Stoppen vor einem Hindernis (AAA 27) 3,5 s. Der Arbeitsablaufabschnitt Saat (AAA 11) dauerte durchschnittlich 10,8 s, bevor dieser durch ein anderes Ereignis abgelöst wurde. Im Mittel beanspruchten das Räumen (AAA 22) mit 24,6 s und die Fehlerbereinigung (AAA 23) mit 91,0 s die meiste Zeit.

Im Bestand II stieg der durchschnittliche Zeitverbrauch je Zyklus von im Mittel 51 m auf 102,6 s an. Die ausgewiesenen Tätigkeitsgruppen von Primär- und Sekundärtätigkeit beanspruchten bei diesem Verfahren je die Hälfte am gesamten Zeitverbrauch. Eine nähere Aufschlüsselung zeigt, dass bei der Primärtätigkeit ca. 12 % auf störungsbedingte Ereignisse verbucht wurden. 7,8 s/Reihe nahm das Überfahren von Schlagabraum (AAA 14) mit insgesamt 24 Beobachtungen ein. Richtungsänderungen und somit ein Abweichen von den vorgegebenen Streifen (AAA 12) wurden 7-mal registriert und betrogen im Mittel 2,3 s je Reihe. Die insgesamt neun Stocküberführungen beanspruchten 1,5 s vom Zeitverbrauch je Reihe. Bei den Sekundärtätigkeiten wurde die Fehlerbereinigung (AAA 23) mit einem mittleren Zeitverbrauch von 19,0 s/Zyklus insgesamt fünfmal notiert. Hierbei war es dreimal nötig, das umgestürzte Aggregat wieder aufzurichten und zweimal musste die Kette der Saatdosierung neu aufgezogen werden. 14 Registrierungen entfielen auf das Räumen von Hiebsresten (AAA 22), das bedeutet auf die Reihe umgerechnet durchschnittlich 16,3 s. Die Orientierung des Pferdeführers mit 32 erfassten Ereignissen beanspruchte durchschnittlich 12,3 s/Zyklus. Die dem Pferd zugeordneten Unterbrechungen kamen insgesamt 17-mal vor. Dabei betrug der mittlere Zeitverbrauch zykluskonform bei unerklärlicher Verweigerung (AAA 26) 2,3 s und beim Anhalten vor einem Hindernis (AAA 27) knapp eine Sekunde. Die Dauer der Teilereignisse zeigt, dass die Saat (AAA 11) durchschnittlich 9,2 s beanspruchte, bevor sie durch ein anderes Ereignis abgelöst wurde. Im Mittel dauerten die Herstellung der Betriebsbereitschaft des Aggregats mit 76,0 s und das Räumen mit 23,3 s wiederum am längsten.



**Abbildung 11: Mittlerer Zeitverbrauch je Zyklus mit Aufschlüsselung nach Tätigkeitsgruppen (PT = Primärtätigkeit, ST = Sekundärtätigkeit) für die Saatverfahren in beiden Bestandsvarianten**

Der Zeitverbrauch je Reihe im Bestand I mit dem Arbeitsverfahren *ÖkoSaar/U* betrug im Mittel 54,4 s bei einer durchschnittlichen Streifenlänge von 50,6 m. Der Anteil der Primärtätigkeit am Zeitverbrauch je Zyklus wurde bei diesem Verfahren mit 81,6 % erfasst, die übrigen 18,4 % wurden den Sekundärtätigkeiten zugeordnet. Bei der Betrachtung einer weiteren Untergliederung der Primäraktivität entfielen 10 % des Zeitverbrauchs auf sonstige Teilereignisse. Hierbei konnten 23 Stocküberfahrungen (davon einmal ein Wurzelanlauf) beobachtet werden, die im Mittel auf die Reihe betrachtet 2,8 s beanspruchten. Das Überfahren von Schlagabraum (AAA 14) trat mit 1,9 s/Zyklus insgesamt zehnmal auf. Bei den Verteilaktivitäten beanspruchte die Orientierung (AAA 21) mit 16 Ereignissen im Mittel 3,4 s je Reihe. Zweimal wurde der Schlagabraum als hindernd angesprochen und geräumt, was 10,0 s und 24,0 s dauerte. Dem Pferd zuzuordnende Verteilaktivitäten kamen insgesamt sechsmal vor. Erwähnenswert war das Stoppen des Gespanns vor einem Hindernis (AAA 27) mit einem mittleren Zeitverbrauch je Reihe von 0,7 s bei 5 Beobachtungen. Die Betrachtung der Dauer einzelner Teilereignisse ergab, dass die Saat (AAA 11) im Mittel 12,6 s andauerte. Bei der Untersuchung der 20 Zyklen musste einmal die Betriebsbereitschaft des Aggregats (AAA 23) durch das Nachziehen der Befestigungsschelle des Auswurfschlauches wiederhergestellt werden.

In der zweiten Bestandsvariante konnte für das Verfahren *ÖkoSaar/U* ein Zeitverbrauch je Reihe von durchschnittlich 91,9 s erfasst werden. Der Anteil der Primärtätigkeit am Zeitverbrauch je Zyklus betrug bei diesem Verfahren ca. 50 %. Bei den Sekundärtätigkeiten konnten 15 Überfahrungen von Schlagabraum beobachtet werden, deren Dauer im Mittel 3,9 s betrug. Das Überfahren von Stöcken (AAA 13) mit durchschnittlich 1,0 s/Zyklus trat insgesamt achtmal auf. Eine Richtungsabweichung von den vorgegebenen Streifen (AAA 12) wurde sechsmal registriert, was einem mittleren Zeitverbrauch von 1,5 s/Zyklus entsprach. Bei den Sekundärtätigkeiten beanspruchte das Beseitigen von Schlagabraum (AAA 22) mit 11 Beobachtungen je Reihe im Mittel 27,0 s. Der Pferdeführer orientierte sich insgesamt 31-mal innerhalb der Streifen, was mit einem Zeitverbrauch von 12,9 s/Zyklus verbucht werden konnte. Die Betrachtung der Dauer der Teilereignisse ergibt, dass die Saat im Mittel 10,6 s andauerte. Bei der Untersuchung

der 20 Zyklen musste die Betriebsbereitschaft des Aggregats (AAA 23) einmal durch das Nachziehen der Auswurfschlauch-Schelle (70,0 s) und zweimal durch das Entfernen eines Astes aus dem Aggregat (je ca. 20,0 s) wiederhergestellt werden.

Beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* ergab sich innerhalb des Bestandes I bei der Rillensaat eine durchschnittliche Strecke von 50,9 m bei einem Zeitverbrauch von 90,1 s je Arbeitszyklus. Abbildung 11 zeigt, dass bei diesem Verfahren 57,1 % auf die Ereignisse der Primärtätigkeit entfielen. Betrachtet man deren weitere Untergliederung, so ergibt sich, dass ca. 7 % als störungsbedingte Teilereignisse erfasst wurden. Hierbei kam der Überführung von Hiebsresten mit 4,3 s je Zyklus und insgesamt 16 Registrierungen die größte Bedeutung zu. Ebenfalls 16-mal wurden Stocküberführungen (1,4 s/Reihe) erfasst, fünfmal handelte es sich hierbei um den Kontakt mit einem Wurzelanlauf. Die Herstellung der Betriebsbereitschaft (AAA 23) beanspruchte durchschnittlich 20,3 s je Reihe. Insgesamt kam es zu 38 Beobachtungen dieses Teilereignisses, wobei es sich in 34 Fällen um das Aushebeln der Federzinken handelte, da sich dort gehäuftes Astmaterial sammelte und entfernt werden musste, oder um das leichtere Anziehen des Pferdes nach einem sonstigen Unterbrechungsereignis zu ermöglichen. Die Orientierung des Pferdeführers (AAA 21) beanspruchte im Mittel 8,8 s und der Räumvorgang (AAA 22) 5,2 s je Arbeitszyklus. Bei den Verteilaktivitäten, die dem Pferd zugesprochen werden konnten, existierten 25 Beobachtungen einer unerklärlichen Verweigerung (2,9 s/Zyklus) und neun eines Stoppens vor einem Hindernis (1,6 s/Zyklus). Der Arbeitsablaufabschnitt Saat (AAA 11) dauerte im Mittel 7,8 s an, bevor ein nachfolgendes Ereignis eintrat. Der Räumvorgang (25,8 s) und die Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft (AAA 24) benötigten mit durchschnittlich 10,7 s die meiste Zeit. Bei der Fehlerbereinigung nahm das zweimalige Reinigen des Auswurfrohres (Verstopfung durch Humus) 23,0 s und 54,0 s in Anspruch.

Unter den Verhältnissen im Bestand II konnte für das Saatverfahren *Weilmünster Waldgrubber* ein mittlerer Zeitverbrauch von 166,4 s je Zyklus mit einer durchschnittlichen Länge von 52,9 m registriert werden. Für dieses Verfahren entfielen lediglich 35,8 % des Zeitverbrauchs auf die Primärtätigkeit. Eine weitere Untergliederung zeigt, dass ca. 4,6 % als störungsbedingte Teilereignisse erfasst wurden. Hierbei besaß die Überführung von Schlagabraum mit 3,8 s je Zyklus und insgesamt 22 Beobachtungen neben der Saat die größte Bedeutung. Zehnmal wurde das Ereignis der Stocküberführung (1,3 s/Reihe) erfasst, wobei es sich um sieben Kontakte mit Wurzelanläufen handelte. Aus den deutlich zeitintensiveren Sekundärtätigkeiten ist abzulesen, dass in 14 Fällen Schlagabraum beseitigt werden musste (AAA 22). Dies wurde mit durchschnittlich 55,5 s/Zyklus aufgezeichnet und ist mit 33,4 % des Zeitverbrauchs deutlich aufwändiger als die Saat (AAA 11). Die Herstellung der Betriebsbereitschaft (AAA 23) beanspruchte im Mittel 33,8 s je Reihe. Insgesamt existierten 69 Notierungen dieses Teilereignisses. In 51 Fällen mussten entweder die Federzinken ausgehebelt werden, um Astmaterial vor den Zinken zu entfernen oder das Anziehen des Pferdes nach einer Unterbrechung zu erleichtern. Die Orientierung des Fuhrmanns (AAA 21) beanspruchte 11,8 s bei 35 Beobachtungen. Die dem Pferd zuzuordnenden Verteilaktivitäten (Verweigerung sowie Stoppen vor Hindernissen) betragen im Mittel je Reihe etwa 3,0 s bei insgesamt 31 Registrierungen. Betrachtet man die einzelnen Teilereignisse, so zeigt sich, dass die Saat im Mittel 6,8 s andauerte, bevor ein anderes Ereignis eintrat. Die insgesamt 152 Beobachtungen dieses Ablaufabschnittes weisen auf den diskontinuierlichen Ablauf der Saat mit diesem Verfahren hin. Der Räumvorgang (79,3 s) und die Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft des Aggregats (9,8 s) nahmen im Mittel als mehrmalige Ereignisse die längste Zeit in Anspruch. Bei der Fehlerbereinigung erforderte das siebenmalige Reinigen des Auswurfrohres (Verstopfung durch Humus) zwischen 10,0 s und 78,0 s.

### 6.1.1.3 Vergleichende Gegenüberstellung der Arbeitsverfahren

Bei den Ausführungen im Kapitel 6.1.1.2 zeigte sich, dass während der Bearbeitung die vorgegebene Streckenlänge von 50 m bei den unterschiedlichen Verfahren variierte und z. T. deutlich überschritten wurde. Für einen näheren Vergleich der Mittelwerte des Zeitverbrauchs der unterschiedlichen Arbeitsverfahren innerhalb der ausgeschiedenen Bestände war es daher erforderlich, die Mittelwerte für die Reine Arbeitszeit (RAZ) innerhalb der ausgewiesenen Reihe (Zyklus) auf die Bezugsstrecke von einem Meter zu berechnen. In Tabelle 11 sind die Mittelwerte sowie Standardabweichungen des Zeitverbrauchs ( $s\ m^{-1}$ ) für die Bodenverwundungsverfahren in den Versuchsbeständen gegenübergestellt.

Wie im Kapitel 6.1.1.2 erläutert, wiesen die zur Bodenvorbereitung untersuchten Arbeitsverfahren *Eberswalder Streifenpflug* und *Meinberg Wundstreifenpflug* in den jeweiligen Bestandsvarianten ähnliche Leistungen auf. Im Bestand I betrug die reine Arbeitszeit je Bezugsstrecke von einem Meter beim Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* im Mittel  $1,23\ s\ m^{-1}$ , während beim Arbeitsverfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* ein um  $0,18\ s$  geringerer Zeitverbrauch je Meter registriert wurde. Diese Differenz der Mittelwerte wies der U-Test mit einem p-Wert von  $0,860$  bei einem gewählten Signifikanzniveau ( $\alpha = 0,05$ ) als nicht gesichert aus.

**Tabelle 11: Mittelwert und Standardabweichung des Zeitverbrauchs je Meter bei den untersuchten Bodenverwundungsverfahren in beiden Bestandsvarianten**

Verfahren / Bestand		MW [ $s\ m^{-1}$ ]	SD [ $s\ m^{-1}$ ]	MW-Diff <sup>1)</sup> [ $s\ m^{-1}$ ]
<i>Eberswalder Streifenpflug</i>	I	1,23 a	0,93	-0,66*
	II	1,89 A	0,82	
<i>Meinberg Wundstreifenpflug</i>	I	1,05 a	0,26	-0,66*
	II	1,71 A	0,49	

<sup>1)</sup> Differenz der Mittelwerte (MW) zwischen den Versuchsbeständen I und II; \* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$

Verschiedene Buchstaben weisen auf signifikante ( $\alpha = 0,05$ ) Mittelwertdifferenzen hin (U-Test). Kleinbuchstaben beziehen sich auf den Vergleich der Mittelwerte eines Arbeitsverfahrens innerhalb des Bestandes I und Großbuchstaben auf analoge Vergleiche innerhalb des Bestandes II

Im Bestand II stieg der Zeitverbrauch für die Bearbeitung eines Meters beim Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* um 53 % und beim Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* um 66 %. Die sich hieraus ergebende signifikante Mittelwertdifferenz der Zeitverbrauchswerte betrug für beide Verfahren  $0,66\ s\ m^{-1}$ . Für den Verfahrensvergleich im Bestand II konnte mit dem U-Test hingegen kein signifikanter Unterschied ( $p = 0,607$ ) zwischen den mittleren Zeitverbrauchswerten bestätigt werden.

Die Unterschiede der dargelegten Mittelwerte zwischen den Beständen zeigten sich vor allem in der Kontinuität des Arbeitsablaufabschnittes Bodenverwundung (AAA 11) begründet. Dieser dauerte beim Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* im Bestand I mit durchschnittlich  $18,8\ s$  nahezu doppelt so lange als beim Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug*. Im Bestand II nahm die Häufigkeit der Registrierungen dieses Arbeitsablaufabschnittes beim Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* deutlich zu, während sich die mittlere Dauer halbierte. Der Ablaufabschnitt Bodenverwundung (AAA 11) reagierte beim Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* weniger empfindlich auf die ungünstigeren Bestandsverhältnisse in der zweiten Variante. Hier verringerte sich die Dauer lediglich um  $1,4\ s$  im Bestand II. Der ausgewiesene Mittelwert betrug somit  $8,3\ s$ , das war gut  $1,6\ s$  kürzer als der registrierte Zeitverbrauch für das Bodenverwundungsverfahren *Eberswalder Streifenpflug*.

Die Bauweise des *Eberswalder Streifenpfluges* war dafür verantwortlich, dass der Ablauf dieses Verfahrens sensibler auf die im Bestand II verstärkt auftretenden Hindernisse reagierte. Dies spiegelte sich u. a. auch bei den Überfahrungen von Hiebsresten und Stöcken wider. So wurden im Versuchsbestand I mit dem *Meinberg Wundstreifenpflug* insgesamt 24 Stöcke überfahren, während diese Aktivität beim *Eberswalder Streifenpflug* lediglich viermal auftrat. Ebenfalls kamen die Überfahrungen von Schlagabraum und Endrollen mit dem *Meinberg Wundstreifenpflug* im ersten Bestand häufiger vor. Der Kontakt des *Meinberg Wundstreifenpfluges* mit diesen Ausprägungen ist im Vergleich zum *Eberswalder Streifenpflug* weniger problematisch. Dieser Umstand gründet wiederum in der unterschiedlichen Konzeption beider Aggregate: während die Scheiben des *Meinberg Wundstreifenpfluges* über Hindernisse rollen und zudem vertikal beweglich an einer Tragachse befestigt sind, reicht ein leichter Kontakt mit Hindernissen aus, um den sich durch das Schar selbst führenden *Eberswalder Streifenpflug* umzukippen, was stets ein korrigierendes Eingreifen des Pferdeführers erforderlich machte. Die jeweilige Überfahrung von Hiebsresten hatte stets auch Auswirkungen auf die Arbeitsqualität bei der Freilegung des Mineralbodens, auf die im Kapitel 6.3.1 noch näher eingegangen wird.

Im Vergleich zu den Bodenverwundungsverfahren wurden bei den untersuchten Arbeitsverfahren zur kombinierten Rillensaat im Durchschnitt höhere Mittelwerte für den Zeitverbrauch je Meter errechnet. In Tabelle 12 sind die entsprechenden Ergebnisse der beschreibenden Statistik dieser Variable für die untersuchten Verfahren gegenübergestellt.

**Tabelle 12: Mittelwert und Standardabweichung des Zeitverbrauchs je Meter bei den untersuchten Saatverfahren in beiden Bestandsvarianten**

Verfahren/Bestand		MW [s m <sup>-1</sup> ]	SD [s m <sup>-1</sup> ]	MW-Diff <sup>1)</sup> [s m <sup>-1</sup> ]
<i>EggeSaat</i>	I	1,81 a; b	1,56	-0,20
	II	2,01 A	1,25	
<i>ÖkoSat/U</i>	I	1,08 a	0,40	-0,72*
	II	1,80 A	0,95	
<i>Weilmünster Waldgrubber</i>	I	1,91 b	0,74	-1,44*
	II	3,35 B	1,99	

<sup>1)</sup> Differenz der Mittelwerte (MW) zwischen den Versuchsbeständen I und II; \* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$   
 Verschiedene Buchstaben weisen auf signifikante ( $\alpha = 0,05$ ) Mittelwertdifferenzen hin (H-Test). Kleinbuchstaben beziehen sich auf den Vergleich der Mittelwerte eines Arbeitsverfahrens innerhalb des Bestandes I und Großbuchstaben auf analoge Vergleiche innerhalb des Bestandes II

Im Bestand I erreichte das Verfahren *ÖkoSat/U* mit einem durchschnittlichen Zeitverbrauch von 1,08 s m<sup>-1</sup> annähernd einen Wert, der mit den dargestellten Ergebnissen der Bodenverwundungsverfahren vergleichbar ist, während die Verfahren *EggeSaat* mit 1,81 s m<sup>-1</sup> und *Weilmünster Waldgrubber* (1,91 s m<sup>-1</sup>) deutlich länger für die Saat von einem Meter benötigten. Die Mittelwertdifferenz von 0,83 s m<sup>-1</sup> zwischen den Ergebnissen der Verfahren *ÖkoSat/U* und *Weilmünster Waldgrubber* konnte mit dem H-Test nach Kruskal und Wallis als gesichert nachgewiesen werden. Die Unterschiede in den Mittelwerten der übrigen Verfahren unterschieden sich in dieser Bestandsvariante nicht signifikant voneinander.

Im Versuchsbestand II stieg der mittlere Zeitverbrauch je bearbeiteten Meter bei allen Saatverfahren an. Beim Arbeitsverfahren *EggeSaat* erhöhte sich die Reine Arbeitszeit innerhalb eines Meters um 11 % auf 2,01 s m<sup>-1</sup>. Die Mittelwerte zwischen den Versuchsbeständen unterschieden sich nur gering. Der U-Test bestätigt, dass die Bestandssituation keinen signifikanten Ein-

fluss auf den Zeitverbrauch ausübte. Bei den Verfahren *ÖkoSat/U* (66 %) und *Weilmünster Waldgrubber* (75 %) wich der mittlere Zeitverbrauch in den Flächen des Bestandes II dagegen signifikant von dem des ersten Bestandes ab.

Betrachtet man die Ergebnisse des Verfahrensvergleichs anhand des H-Tests in dieser Fläche, so zeigt sich, dass beim Verfahren *ÖkoSat/U* ( $1,80 \text{ s m}^{-1}$ ) und *EggeSaat* ( $2,01 \text{ s m}^{-1}$ ) keine signifikanten Unterschiede der Mittelwerte vorlagen ( $p = 0,607$ ). Mit Abstand die meiste Zeit beanspruchte das Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* mit  $3,35 \text{ s m}^{-1}$ . Die Unterschiede zu den Mittelwerten der anderen Saatverfahren wurden mit dem H-Test als signifikant ausgewiesen.

Die Zunahme des Zeitverbrauchs in dieser Bestandsvariante ist wiederum auf die ungünstigere Flächenausprägung (Hangneigung, Schlagabraum) zurückzuführen. Betrachtet man in diesem Zusammenhang noch einmal die Zusammensetzung der Tätigkeiten und hier die Veränderung des Anteils der Sekundärtätigkeit am Zeitverbrauch, so wird deutlich, dass die den Arbeitsablaufabschnitt Saat (AAA 11) unterbrechenden Ereignisse im Bestand II zunahm (vgl. Kapitel 6.1.1.2). Bei den Verfahren *EggeSaat* (+ 7 %) und *ÖkoSat/U* (+ 31 %) beanspruchten die Sekundärtätigkeiten im Bestand II gut die Hälfte der Zeit, während beim Saatverfahren *Weilmünster Waldgrubber* der Anteil der Sekundärtätigkeit sogar 64,2 % betrug, was im Vergleich zum Bestand I eine Steigerung um gut 20 % war.

Wie bereits für die Verfahren zur Bodenverwundung dargestellt, litt im Bestand II maßgeblich die Kontinuität des Arbeitsvorganges der Saat. Aus häufigen Unterbrechungen resultierte die Abnahme der durchschnittlichen Dauer dieses Arbeitsablaufabschnittes. Der höhere Anteil an Schlagabraum von ca. 15 % im Bestand II spiegelte sich u. a. in den Zeitverbrauchswerten und der Häufigkeit der Ereignisse Schlagabraum-Überfahung (AAA 14) und Räumen (AAA 22) wider. So wurden mit dem Aggregat *EggeSaat* 17-mal, mit dem *Weilmünster Waldgrubber* sechsmal und mit der *ÖkoSat/U* insgesamt fünfmal häufiger entsprechende Hiebsreste überfahren. Der Anteil der partiellen Flächenräumung (AAA 22) an der Sekundärtätigkeit nahm beim Verfahren *ÖkoSat/U* um 41 %, beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* um 38 % und beim Verfahren *EggeSaat* um 13 % gegenüber der Flächen im Bestand I zu. Ebenfalls auf die Bestandssituation zurückzuführen ist die absolute Zunahme des Ereignisses Orientierung (AAA 21). So musste der Pferdeführer alle Saataggregate häufiger stoppen, um den Überblick der zu bearbeitenden Reihen zu behalten. Besonders deutlich zeigte sich dies beim Verfahren *ÖkoSat/U*: hier vervierfachte sich der Zeitverbrauch je Reihe.

Die Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft des Aggregats (AAA 23) wurde am häufigsten beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* beobachtet. Dies lag hauptsächlich im Aushebeln der Federzinken (Entfernen von Ästen) sowie dem Reinigen der Saatgutauswurfrohre (Verstopfung durch Humus) begründet. Hinsichtlich der Reihe bedeutete dies im zweiten Versuchsbestand im Mittel 33,7 s, das entsprach einer Steigerung von 13,0 s gegenüber dem Zeitverbrauch im Bestand I. Im Vergleich zum ersten Bestand beanspruchten die Verfahren *EggeSaat* 6,0 s (19,0 s/Reihe) und *ÖkoSat/U* 1,0 s (5,5 s/Reihe) länger für das Wiederherstellen der Betriebsbereitschaft des Aggregats (AAA 23).

Bei der Gegenüberstellung der Verfahren wird deutlich, dass im Verfahren *ÖkoSat/U* auch bei für den Pferdeinsatz ungünstigeren Flächenausprägungen die höchsten Bearbeitungsgeschwindigkeiten erreicht wurden. Das Betriebsmittel arbeitete kontinuierlich, und auch ein Überfahren von Schlagabraum und Stöcken erzwang keine Unterbrechung des Arbeitsablaufs. Beim Verfahren *EggeSaat* ergab sich im Vergleich beider Bestände die geringste Veränderung des Zeitverbrauchs. Die Kontinuität ist mit einer mittleren Dauer des Saatvorganges von 10,0 s etwas kürzer als beim Saatverfahren *ÖkoSat/U* (12,0 s). Der Zeitverbrauch beim Verfahren *EggeSaat* wird durch das selten auftretende, aber sehr zeitaufwändige Wiederherstellen der Betriebsbereitschaft des Aggregats (AAA 23) beeinflusst. Die geringste Leistung wies das am Betriebsmittel *Weilmünster Waldgrubber* ausgerichtete Arbeitsverfahren auf. In der zweiten

Bestandsvariante wurden hier die vergleichsweise größten Probleme erfasst. Vor allem der Schlagabraum beeinflusste den gesamten Arbeitsablauf sehr stark. Die schon geschilderten Arbeiten zur Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft (AAA 23) und die sonstigen häufigen Unterbrechungen ließen nur eine geringe Kontinuität des Saatvorgangs (AAA 11) mit ca. 7,0 s zu.

#### **6.1.1.4 Identifizierung produktivitätsrelevanter Faktoren**

##### **6.1.1.4.1 Clusterung der Verteil-Aktivitäten**

Die leistungs- oder produktivitätsrelevanten Faktoren (Schlagabraum, Stöcke usw.) in der streifenweisen Bearbeitungsvariante konnten auch mit höheren Stichprobenumfängen nur bedingt im Vorfeld der Erhebungen identifiziert werden, da die Hindernisse der Primärtätigkeit nicht selten auch benachbarte Arbeitsstreifen (Zyklen) involvierten. Eine Klassifizierung dieser Faktoren war bereits vor der eigentlichen Arbeitsablaufstudie mit Problemen behaftet und machte eine eindeutige Zuordnung der davon betroffenen Arbeitsablaufabschnitte in dieser Studie nahezu unmöglich. Dies lag in der Tatsache begründet, dass der Gespannführer solche Hindernisse stets zyklusübergreifend beseitigte bzw. beseitigen musste.

Die Störung der Primärtätigkeit (Bodenverwundung oder deren Kombination mit der Bucheckernsaat) wirkte sich über eine rein zeitliche Unterbrechung des Arbeitsablaufes (z. B. beim Beseitigen von Hindernissen durch den Gespannführer) und durch eine funktionelle Unterbrechung des eigentlichen Arbeitsauftrages auf den Zeitverbrauch aus. Zu solchen funktionellen Unterbrechungen gehört beispielsweise die mangelhafte oder nicht ausgeführte Bodenverwundung beim Überfahren von Hiebsresten oder Stöcken. Letztgenannte Umstände sind bei Feldstudien schwer messbar, daher war man hierbei auf die intensive Auswertung im Videolabor angewiesen.

Um den Einfluss der erfassten Störungen covarianzanalytisch beurteilen zu können, wurden die metrisch skalierten Zeitverbrauchswerte für die Aktivitäten und zyklenspezifischen Unterbrechungen ordinalisiert, um somit in größeren Clustern mit dem Zeitverbrauch je Reihe (Zyklus) verglichen werden zu können. Die Cluster umfassten jeweils einen Zeitraum von 5 s.

Die Regressionsanalysen wurden als multiple lineare Mehrfachregressionen mit dem schrittweisen Vergleichsmodus (SPSS-Modus: STEPWISE) erstellt. Innerhalb dieses Berechnungsmodus erfolgt die Auswahl der unabhängigen Variablen, die im Regressionsmodell berücksichtigt werden, automatisch. Hierbei wird für jede der zur Verfügung stehenden Variablen im Vorfeld der F-Wert berechnet. Die Variable mit dem höchsten F-Wert des partiellen Korrelationskoeffizienten zwischen Prädiktor und Regressand wird als erster Regressor in das Regressionsmodell aufgenommen. Die Implementierung oder auch der Ausschluss einer Prädiktorgröße orientiert sich an der gewählten Implementierungsgrenze der F-Verteilungswahrscheinlichkeit von höchstens 0,05. Ein Ausschluss erfolgte bei Überschreiten dieser Wahrscheinlichkeit von 0,10. Dieses Vorgehen wiederholt sich so häufig, bis keine der bis dahin verbleibenden Variablen die Signifikanzschwelle mehr überschreitet. Aus der Reihenfolge der Implementierung entsprechender Regressoren lässt sich die statistische Wichtigkeit dieser Variable erkennen.

Es sei ausdrücklich vermerkt, dass mit diesem Vorgehen kein prognostisch verwertbares Regressionsmodell entworfen werden soll, denn in diesem Fall steht allein die wahrscheinlichkeitstheoretische Prüfung der *ceteris paribus* Relevanz jener Störfaktoren unter den gegebenen Versuchsbedingungen zur Disposition. Vor diesem Hintergrund ist es unerheblich, bei den interkorrelativen Bewertungen zwischen Regressoren (entsprechenden Cluster-Variablen) und Zielgröße (Zeitverbrauch je Reihe, weiterhin metrisch skaliert) neben kausalen Zusammen-

hängen auch Beziehungen einer gemeinsamen rechnerischen Basis berücksichtigen zu müssen – auch um letztere zu reduzieren, wurde der geschilderte Umweg über die Regressorencusterung gewählt (vgl. JACKE, 1980).

#### 6.1.1.4.2 Kreuztabellarischer Vergleich der Arbeitsverfahren

Im Vorfeld der eigentlichen Regressionsanalysen bieten kreuztabellarische Gegenüberstellungen der Häufigkeiten geclusterter Zeitverbrauchswerte zwischen den Arbeitsverfahren und Arbeitsablaufabschnitten einen Überblick, der die bereits in Kapitel 6.1.1.2 gewonnenen Einsichten bestätigt (vgl. ANHANG III).

Entsprechende Kreuztabellen eines Vergleichs der Bodenverwundungsverfahren versus ordinalisierte Zeitverbräuche der Teilereignisse zeigen in den überfahrenden Hindernissen bestätigt, dass die Flächen des Verfahrens *Eberswalder Streifenpflug* weniger Hiebsreste aufwiesen als die des Verfahrens *Meinberg Wundstreifenpflug*. Unterbrechungen durch das Räumen von Schlagabraum (AAA 22) durch den Pferdeführer wurden demzufolge sehr viel häufiger beim Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* registriert. Ebenfalls durch die Hindernisse begründet konnte das Stoppen des Pferdes vor einem solchen nur beim Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* erfasst werden. Die Verweigerungen der Pferde ohne erkennbaren Grund traten in beiden Verfahren ähnlich häufig und verzögernd auf. Bei dem im Gespann gezogenen *Eberswalder Streifenpflug* zeigten sich deutlich mehr Orientierungsphasen des Pferdeführers. Dies kann u. a. auf eine erschwerte Übersicht zurückgeführt werden, die die Breite des Gespanns gegenüber dem Einzelpferd verursacht. Die Bauart des *Eberswalder Streifenpfluges* dominierte die Überprüfung bzw. Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft des Aggregats eindeutig.

Die Kreuztabellen der Clusterhäufigkeiten für die kombinierten Saatverfahren (*EggeSaat*, *ÖkoSat/U* und *Weilmünster Waldgrubber*) sind detailliert im ANHANG III dargestellt. Der Verfahrenvergleich unter Berücksichtigung der geclusterten Zeitverbrauchswerte der Teilereignisse zeigt u. a., dass man mit dem Verfahren *EggeSaat* ein Überfahren von Hindernissen früherer Eingriffe in Kauf nahm. Die Räumung von Schlagabraum (AAA 22) beanspruchte evident längere Zeitanteile des Pferdeführers in den Verfahren *ÖkoSat/U* und *Weilmünster Waldgrubber*. Die Betriebsbereitschaft des pferdegezogenen Aggregates (AAA 23) musste durch separate Eingriffe des Führers im Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* deutlich häufiger korrigiert werden. Die Anzahl der Zugverweigerungen des Pferdes war im Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* am höchsten.

#### 6.1.1.4.3 Regressionsanalytische Bewertung einzelner Verfahren

Die Regressionstabellen der Berechnungen für die Arbeitsverfahren zur Bodenvorbereitung sind ausführlich im ANHANG IV aufgeführt. Tabelle 13 stellt zusammenfassend die Reihenfolge und Relevanz der Störfaktoren für die beiden Arbeitsverfahren dar. Es zeigt sich, dass für beide Verfahren das Räumen (AAA 22) und die Orientierung des Pferdeführers (AAA 21) einen signifikanten Einfluss auf den Zeitverbrauch hatten. Beim Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* beeinflusste die Stocküberfahung (AAA 13) den Zeitverbrauch signifikant, während beim Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* die Bereitstellung des Aggregates (AAA 23) eine größere Bedeutung einnahm.

**Tabelle 13: Reihenfolge und Relevanz der in das Regressionsmodell implementierten Störfaktoren der Bodenverwundungsverfahren**

Störfaktoren	Arbeitsverfahren	
	<i>Eberswalder Streifenflug</i>	<i>Meinberg Wundstreifenflug</i>
<i>Räumen</i>	* (1)	* (1)
<i>Orientierung</i>	* (2)	* (2)
<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>	* (3)	
<i>Überfahung Stock</i>		* (3)

\* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$

Im Verfahren *Eberswalder Streifenflug* behinderten die zwei Sekundärtätigkeiten Räumen und Orientierung den kontinuierlichen Arbeitsablauf (vgl. Tabelle IV\_1) am stärksten. Der dritte in das Regressionsmodell eingehende Störfaktor war in diesem Fall das Herstellen der Betriebsbereitschaft (AAA 23). Betrachtet man die Zusammensetzung des Zeitverbrauchs der Zyklen in Kapitel 6.1.1.2, so zeigte sich insbesondere im Bestand II eine identische Reihenfolge dieser Einflussfaktoren. Hier erwies sich, dass 20 % des Zeitverbrauchs auf das Räumen von Hiebsresten (AAA 22) entfielen, ca. 12 % auf die Orientierung (AAA 21) und 9 % auf das Wiederherstellen der Betriebsbereitschaft des Pfluges (AAA 23). In den Versuchsflächen des ersten Bestandes hielten neben der Primärtätigkeit insbesondere die Orientierung (8 %) vor der Betriebsbereitschaft des Aggregats (2 %) und dem Räumen mit ebenfalls 2 % die bedeutenden Anteile am Zeitverbrauch je Zyklus. Diese Faktoren erklärten innerhalb der Regression insgesamt 59 % der Streuung der abhängigen Variablen (Zeitverbrauch/Zyklus). 32 % der Varianz konnten durch das Räumen, ca. 22 % über die Orientierungsaktivitäten (AAA 21) in Schritt 2 erklärt werden (*Änderung in  $R^2 = 0,218$* ), während die Betriebsbereitschaft des Aggregats (AAA 23) noch 5,2 % ausmachte. Die übrigen Prädiktoren übten in ihrer partiellen Korrelation zum Zeitverbrauch bei der gewählten Implementierungsgrenze ( $p_F \leq 0,05$ ) keinen weiteren signifikanten Einfluss aus. Die in der Prädiktorenwahl ausschlaggebenden partiellen Korrelationen zur Zielgröße werden für die Aufbaustufen detailliert in Tabelle IV\_3 vorgestellt. Diese Aufstellung berücksichtigt nicht mehr die für die Wahl des Primärprädiktors ausschlaggebenden Ursprungskorrelationen, die man noch in Tabelle IV\_2 findet. Aus dem Tabellenvergleich von V\_3 mit V\_2 wird deutlich, dass nach der Übernahme des Räumens (AAA 22) in das Modell nun der Zeitverbrauch für die Orientierung über die partielle Korrelation an Bedeutung gewann. Nach der Implementierung des Faktors Orientierung nahm der Einfluss der Betriebsbereitschaft des Aggregats zwar um 0,074 etwas ab, die ordinalisierte Zeit konnte aber noch mit einer Signifikanz von 0,04 in das Modell übernommen werden. Nach der Berücksichtigung jener drei Prädiktoren brach die autoselektive Regression ab, da die linearen Zusammenhänge zwischen den nun erreichten Residuen und den restlichen Größen zu schwach für signifikante Erklärungsansätze waren. Die in Kapitel 4.3 dargestellten Anteile des Zeitverbrauchs für das Überfahren von Schlagabraum (6 %) und von Stöcken (1 %) verloren bereits nach dem ersten Modellschritt deutlich an Bedeutung.

Tabelle IV\_4 (vgl. ANHANG IV) ist die Reihenfolge der in dem erklärenden Regressionsmodell berücksichtigten Störfaktoren für das Verfahren *Meinberg Wundstreifenflug* zu entnehmen. Die beiden Teilereignisse Räumen und Orientierung hinderten den kontinuierlichen Arbeitsablauf, das dritte Ereignis beeinträchtigte den funktionellen Arbeitsauftrag durch das Überfahren von Stöcken aus vorhergehenden Eingriffen. Die ursprüngliche Korrelation nullter Ordnung zwischen Zielgröße (Regressand: *Zeit je Reihe*) und ordinalisiertem Zeitverbrauch für den Räumvorgang (AAA 22) war hier am höchsten (vgl. Tabelle IV\_5), daher wurde das Räumen im ersten Schritt des Modellaufbaus implementiert. Das Bestimmtheitsmaß wies eine fast 70%-

ige Erklärung der Zielgrößenstreuung ( $R^2=0,694$ ) auf. Über die Orientierungsaktivitäten (AAA 21) ließen sich nochmals nahezu 20 % der ursprünglichen Zielgrößenstreuung in Schritt 2 erklären (*Änderung in  $R^2=0,192$* ), während die Stocküberquerungen (AAA 13) in dieser Hinsicht nur noch eine Verbesserung von 1,3 % erbrachten.

Für dieses Bodenverwundungsverfahren können über die genannten Einflussfaktoren 89 % der Varianz des Zeitverbrauchs/Zyklus erklärt werden. Betrachtet man die Verteilung des relativen Zeitverbrauchs in Kapitel 6.1.1.2, so zeigt sich, dass das Räumen mit 32 % und die Orientierung mit 12 % jeweils in beiden Beständen den größten Zeitverbrauch neben der Haupttätigkeit aufwiesen, im Besonderen traf dies innerhalb der zweiten Bestandsvariante zu. Das Überfahren von Stöcken (5 %) konnte bei dieser Betrachtung im Bestand I als dritt wichtigste Einflussgröße erfasst werden, in der zweiten Bestandsvariante hatte hingegen das Überfahren von Schlagabraum mit 8 % einen größeren Einfluss.

Die restlichen Prädiktoren spielten in ihrer partiellen Korrelation zur Zielgröße keine signifikante Rolle mehr. Aus einem Vergleich der Tabellen V\_6 mit V\_5 wird deutlich, dass nach Erklärung des Zeitverbrauchs je Reihe durch die ordinalisierte Zeit für das Räumen der über die partielle Korrelation gemessene Einfluss des Zeitverbrauchs für die Orientierung deutlich zunahm. Er wurde mit Abstand zum zweitwichtigsten Prädiktor für den Regressanden. Nach seiner Aufnahme in die Gleichung wuchs die Bedeutung des Überfahrens von Stöcken nahezu um den Faktor 4, so dass diese ordinalisierte Zeit für die Störung des eigentlichen Arbeitsauftrages noch in das Modell übernommen werden konnte. Durch die Berücksichtigung jenes Zeitverbrauchs für die Stocküberquerung (AAA 13) kam es im Gefüge partieller Korrelationen zu keinen weiteren Einflussgewinnen der verbleibenden möglichen Prädiktoren: Selbst die in Stufe 2 noch Erfolg versprechende Größe Zeitverbrauch für die Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft Aggregat schrumpfte nunmehr auf ein unbedeutendes Niveau. Der in Kapitel 4.3 ausgewiesene hohe Anteil am Zeitverbrauch für das Ereignis Überfahren von Hiebsresten (AAA 14) gewann auch in dem Regressionsmodell bis zum zweiten Modellschritt leicht an Einfluss, bevor die partielle Korrelation nach Implementierung der Stocküberführung (AAA 13) deutlich abnahm.

Die Tabellen mit den Regressionsergebnissen der ordinalisierten Zeitverbrauchswerte der Teilereignisse und dem Regressand der Saatverfahren sind ausführlich im ANHANG IV aufgeführt. Tabelle 14 vermittelt einen Überblick der Reihenfolge und Relevanz der erfassten Störfaktoren für die Arbeitsverfahren.

**Tabelle 14: Reihenfolge und Relevanz der in das Regressionsmodell implementierten Störfaktoren der Saatverfahren**

Störfaktoren	Arbeitsverfahren		
	<i>EggeSaat</i>	<i>ÖkoSat/U</i>	<i>Weilmünster Waldgrubber</i>
<i>Räumen</i>	* (2)	* (1)	* (1)
<i>Orientierung</i>		* (3)	* (2)
<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>	* (1)	* (2)	* (3)

\* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$

Anhand Tabelle 14 ist zu erkennen, dass das Räumen über alle Verfahren eine große Bedeutung für den Zeitverbrauch der Saatverfahren besaß. Primären und damit hochsignifikanten Einfluss hatte diese ordinalisierte Zeit auf den Zeitverbrauch der Verfahren *ÖkoSat/U* und *Weilmünster Waldgrubber*. Beim Arbeitsverfahren *EggeSaat* nahm diese Position das Wieder-

herstellen der Betriebsbereitschaft des Aggregats ein. Für das Arbeitsverfahren *ÖkoSat/U* hatte dieser Faktor die zweitwichtigste Bedeutung, jedoch auch der ordinalisierte Zeitverbrauch der Orientierung als dritte und letzte Größe beeinflusste den Zeitverbrauch ebenfalls hochsignifikant. Beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* übte das Orientieren durch den Pferdeführer (AAA 21) den zweitwichtigsten Einfluss auf den Zeitverbrauch vor dem Wiederherstellen der Betriebsbereitschaft (AAA 23) aus.

Tabelle IV\_7 (ANHANG IV) zeigt die Reihenfolge der in das Regressionsmodell übernommenen beiden Teilereignisse für das Verfahren *EggeSaat*. Die beiden den Ablauf der Rillensaat (Primärtätigkeit) unterbrechenden Tätigkeiten Betriebsbereitschaft Aggregat (AAA 23) und Räumen von Hiebsresten (AAA 22) gehen nacheinander als Prädiktoren in das Modell ein. Wie Tabelle IV\_8 verdeutlicht, ist die ursprüngliche Korrelation zwischen dem Zeitverbrauch je Reihe (Regressand) und der ordinalisierten Zeit für die Betriebsbereitschaft des Aggregats am größten. Rund 68 % der Varianz kann durch diesen Prädiktor, weitere 9 % über die Räumaktivitäten erklärt werden. Betrachtet man die in Kapitel 4.3 getroffenen Aussagen, so zeigt sich wiederum, dass die Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft Aggregat (AAA 23) mit 17 % und 18 % einer hohen Bedeutung zugeordnet wurde. Während in den Flächen des Bestandes II die Räumung durch den Pferdeführer (AAA 22) mit 16 % einen erheblichen Anteil am Zeitverbrauch einnahm, konnte in den Flächen der ersten Bestandsvariante dieses Ereignis mit 8 % am Zeitverbrauch nach der Orientierung mit 11% eingegliedert werden. In Tabelle IV\_9 sind die partiellen Korrelationen der übrigen in Frage kommenden Prädiktoren dargestellt. Es wird deutlich, dass diese nach der Implementierung der beiden Einflussgrößen in das Modell keinen signifikanten Einfluss mehr auf den Zeitverbrauch hatten. Vergleicht man die ursprüngliche Korrelation des Störfaktors Räumen (vgl. Tabelle IV\_8) mit der partiellen Korrelation nach der Implementierung des ersten Störfaktors, so ist zu erkennen, dass dieser um gut 65 % an Bedeutung gewann. Bei diesem Verfahren hat die autoselektive Regression nach den zwei aufgeführten signifikanten Prädiktoren keine weiteren linearen Zusammenhänge zwischen den verbleibenden Residuen und den übrigen Größen ausgewiesen. Der in Kapitel 4.3 noch dargestellten Bedeutung der Orientierung des Pferdeführers (AAA 21) wurde in diesem Modell kein Einfluss beigemessen. Die Überfahrung von Schlagabraum (8 % am Zeitverbrauch) und Stöcken (2 %) nahm nach der Implementierung des Räumens um den Faktor 3 in der partiellen Korrelation zu. Diese Faktoren hatten jedoch keinen signifikanten Einfluss.

Für das Arbeitsverfahren *ÖkoSat/U* ist die Reihenfolge der in das erklärende Regressionsmodell übernommenen Störfaktoren in Tabelle IV\_10 (vgl. ANHANG IV) aufgeführt. Es handelte sich hierbei um das Räumen mit einer ursprünglichen Korrelation von 0,736 (vgl. Tabelle IV\_11). Als zweiter Faktor wurde das Wiederherstellen der Betriebsbereitschaft des Aggregats ( $R = 0,431$ ) und als dritter Störfaktor das Orientieren des Pferdeführers mit einer ursprünglichen Korrelation von 0,460 in die Gleichung implementiert. Zieht man vergleichend die Erkenntnisse aus der Zusammensetzung des Zeitverbrauchs (Kapitel 4.3) heran, so wird deutlich, dass die auf den Schlagabraum zurückzuführenden Tätigkeiten vor allem in der zweiten Bestandsvariante einen hohen Anteil am Zeitverbrauch einnahmen. Das Räumen von Hiebsresten (AAA 22) beanspruchte im Bestand II nahezu 30 % am Zeitverbrauch, während in der ersten Bestandsvariante diese Tätigkeit mit nur 3 % eine untergeordnete Rolle spielte. Im Bestand I kam dem Wiederherstellen der Betriebsbereitschaft des Aggregats mit 7 % besondere Bedeutung zu, während diese Tätigkeit im zweiten Bestand erst nach der Orientierung einzugliedern war. Die im Modell berücksichtigten Störfaktoren begründeten insgesamt 76 % der Zielgrößenstreuung. Der Korrelationskoeffizient für das Räumen sicherte nach dem ersten Aufbauschritt eine nahezu 54%-ige Erklärung der Varianz. Über die Arbeiten im Rahmen der Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft am Aggregat (AAA 23) wurden nochmals 21 % der ursprünglichen Streuung in Schritt 2 erklärt, während die Orientierung in dieser Hinsicht nur noch eine Verbesserung von ca. 1 % erbrachte. Die restlichen Prädiktoren spielten in ihrer partiellen Korrelation zur Zielgröße keine signifikante Rolle mehr. Die in der Prädiktorenwahl aus-

schlaggebenden partiellen Korrelationen zur Zielgröße werden für die Aufbaustufen detailliert in Tabelle IV\_12 vorgestellt. Ein Vergleich der Tabellen V\_12 und V\_11 zeigt, dass nach Erklärung des Zeitverbrauchs je Reihe durch die ordinalisierte Zeit für das Räumen der Einfluss des Zeitverbrauchs für die Betriebsbereitschaft des Aggregats über die partielle Korrelation deutlich zunahm. Nach der Implementierung dieses Prädiktors wuchs der Einfluss des Orientierens noch einmal deutlich an, so dass diese ordinalisierte Zeit für die Störung des eigentlichen Arbeitsauftrages noch in die Gleichung übernommen wurde. Durch die Berücksichtigung jenes Zeitverbrauchs kam es im Gefüge partieller Korrelationen zu keinen weiteren signifikanten Einflussgewinnen verbleibender möglicher Prädiktoren. Der in Stufe 2 noch bedeutende Zeitverbrauch für die Überführung von Schlagabraum von 4 % schrumpfte in der dritten Stufe auf ein unbedeutendes Niveau. Die Regression brach nach dem dritten Modellschritt ab.

Im ANHANG IV sind die Tabellen der Regressionsergebnisse für das Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* aufgeführt. Tabelle IV\_13 kann entnommen werden, dass das Räumen von Schlagabraum der vergangenen Hiebsmaßnahmen den Arbeitsablauf signifikant behinderte. Als ebenfalls gesicherter Einfluss erwies sich das Wiederherstellen der Betriebsbereitschaft des Betriebsmittels (AAA 23) vor dem dritten in das Regressionsmodell implementierten Störfaktor, der Orientierung durch den Pferdeführer. Der Korrelationskoeffizient des Räumens sicherte bereits eine 50%-ige Erklärung der Streuung des Zeitverbrauchs/Reihe. Über den Faktor der Betriebsbereitschaft des Aggregats ließen sich nochmals 28 % der Zielgrößenstreuung in Schritt 2 erklären, während die Implementierung des ordinalisierten Zeitverbrauchs des Orientierens weitere 4 % der Varianz erklärte. Über diese Einflussgrößen können demnach 82 % der gesamten Streuung des Zeitverbrauchs erklärt werden. Im Vergleich zur Zusammensetzung des Zeitverbrauchs (vgl. Kapitel 4.3) zeigt sich, dass im Versuchsbestand II die Bedeutung gemessen am Anteil des Zeitverbrauchs dem gleichen Schema folgte. Das Räumen beanspruchte 33 %, die Betriebsbereitschaft des Aggregats 20 % und das Orientieren noch deutliche 7 %. In den Flächen des Bestandes I hatten diese Faktoren ebenfalls die größten Anteile am Zeitverbrauch, jedoch in einer anderen Abfolge: das Wiederherstellen der Betriebsbereitschaft des Betriebsmittels (AAA 23) wurde mit 22 % vor dem Orientieren mit 10 % und dem Räumen von Hiebsresten mit 6 % erfasst. Die übrigen Prädiktoren hatten in ihrer partiellen Korrelation zum Zeitverbrauch keinen weiteren signifikanten Einfluss (vgl. Tabelle IV\_15). Der Vergleich von Tabelle V\_15 mit V\_14 zeigt deutlich, dass nach der Übernahme der ordinalisierten Zeit für das Räumen in das Modell die Betriebsbereitschaft des Aggregats über die partielle Korrelation an Bedeutung gewann. Nach der Implementierung dieses Faktors nahm die partielle Korrelation für das Orientieren des Pferdeführers noch zu, so dass die ordinalisierte Zeit in das Modell übernommen wurde. Nach der Berücksichtigung jener drei Prädiktoren kam es bei den partiellen Korrelationen der übrigen Faktoren nicht zu weiteren Zunahmen und die autoselektive Regression brach nach dem dritten Schritt ab. Die linearen Zusammenhänge zwischen den nun erreichten Residuen und den restlichen Größen waren zu schwach für weitere signifikante Erklärungsansätze.

## 6.1.2 Zeitverbrauch der praxisnahen Bearbeitungsvariante

### 6.1.2.1 Datenbasis

Im Gegensatz zur standardisierten Bearbeitungsvariante der 50 m-Streifen wurden bewährte Arbeitsgepflogenheiten und somit vor allem sämtliche Wendemanöver bei der Teilflächen-Bearbeitung in der praxisnahen Versuchsvariante berücksichtigt (vgl. Kapitel 6.1.13). Mit der Fortschrittszeitstudie wurde der Zeitverbrauch der zyklisch wiederkehrenden Teilfläche registriert. Aus diesem Vorgehen ergab sich eine verhältnismäßig geringe Anzahl an Wiederholungen von vier Stichproben (Teilflächen) je Verfahrens- und Bestandsvariante.

Die Datenhaltung und -aufbereitung der am Video erstellten Fortschrittszeitstudien erfolgte entsprechend dem unter Kapitel 6.1.1 dargestellten Vorgehen.

Die statistische Analyse der Messwerte beschränkte sich aufgrund des geringen Datenumfanges auf die Darstellung ausgewählter Parameter der deskriptiven Statistik.

### 6.1.2.2 Bodenverwundungsverfahren

Die Ergebnisse der Arbeitsablaufstudien aus den praxisnahen Bearbeitungen für die Bodenverwundungsverfahren *Eberswalder Streifenpflug* und *Meinberg Wundstreifenpflug* sind auszugswise in Tabelle 15 aufgeführt. Die beiden Verfahren wiesen im Bestand I identische Mittelwerte der Gesamtarbeitszeit (451 s/TF) auf. Aus den spiralförmigen Bearbeitungen ergab sich im Bestand I für das Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* je Teilfläche eine Länge von 368,4 m. Im Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* wurden im Mittel ca. 50 m je Teilfläche (321,0 m) weniger bearbeitet. In der ersten Bestandsvariante wiesen demnach die beiden Bodenverwundungsverfahren einen vergleichbaren Zeitverbrauch je Meter mit durchschnittlich 1,4 s auf.

**Tabelle 15: Mittelwert und Standardabweichung des Zeitverbrauchs und der zurückgelegten Strecken während der praxisnahen Bearbeitungsvariante bei den untersuchten Bodenverwundungsverfahren in beiden Bestandsvarianten**

Verfahren / Bestand		Zeit/TF [s]		m /TF [m]		Zeit/m [s m <sup>-1</sup> ]	
		MW	SD	MW	SD	MW	SD
<i>Eberswalder Streifenpflug</i>	I	451	49,28	368,4	21,93	1,2	0,09
	II	876	199,91	352,9	58,46	2,6	0,89
<i>Meinberg Wundstreifenpflug</i>	I	451	13,08	321,0	43,25	1,4	0,18
	II	500	62,31	349,6	26,91	1,4	0,13

Im Versuchsbestand II wurde eine Zunahme der Gesamtarbeitszeit je Teilfläche registriert. Die Arbeitszeit nahm beim Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* um 94 % und beim Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* um 11 % zu. Während sich beim Bodenverwundungsverfahren *Eberswalder Streifenpflug* die zurückgelegte Strecke je Teilfläche um durchschnittlich 4 % auf 352,9 m verringerte, konnte beim Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* eine Streckenerhöhung von 9 % erfasst werden.

Für die angeführten bestandesbezogenen Unterschiede kann die ungünstigere Flächenausprägung angeführt werden (vgl. Kapitel 3.2.4). So beanspruchte der Schlagabraum im Mittel 66 % mehr Fläche bei den für das Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* ausgewählten Teilflächen als bei den Flächen für das andere Bodenverwundungsverfahren im Bestand II. Der auf die Strecke von einem Meter bezogene Zeitverbrauch erhöhte sich beim Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* im zweiten Versuchsbestand bei vergleichbarer Flächenleistung deutlich auf 2,6 s m<sup>-1</sup>, während beim Bodenverwundungsverfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* der auf den bearbeiteten Meter umgelegte Zeitverbrauch mit dem Mittelwert aus der ersten Bestandsvariante identisch war.

### 6.1.2.3 Saatverfahren

Mittelwert und Standardabweichung für die erfassten Zeitverbrauchswerte sowie die bearbeiteten Strecken für die Arbeitsverfahren der kombinierten Rillensaat sind in Tabelle 16 aufgeführt. Im Bestand I benötigte der Pferdeführer im Verfahren *ÖkoSat/U* für die Bearbeitung von 0,1 ha mit durchschnittlich 531 s am wenigsten Zeit. Im Vergleich hierzu benötigte das Saatverfahren *EggeSaat* bei der Bearbeitung eines Zyklus ca. 90 s länger. Der Mittelwert des Zeitverbrauchs für das Arbeitsverfahren *Weilmünster Waldgrubber* fiel mit 1.054 s für die Saat einer Versuchsfäche am höchsten aus. Eine vergleichbare Reihung der Arbeitsverfahren ergibt sich bei Betrachtung der bearbeiteten Strecke je Teilfläche. Mit der *ÖkoSat/U* wurden mit dem Arbeitsgespann im Mittel 376,1 m, mit der *EggeSaat* 391,9 m und mit dem *Weilmünster Waldgrubber* 494,2 m auf 0,1 ha zurückgelegt. Bei den Verfahren *ÖkoSat/U* und *EggeSaat* war es möglich, die vereinbarten 5 kg Bucheckern je Teilfläche auszubringen, während dies auch bei dem dargelegten deutlich höheren Bearbeitungsgrad mit dem *Weilmünster Waldgrubber* nicht gelang. Bei diesem Verfahren konnten lediglich 2,6 kg/TF gesät werden. Dies war darauf zurückzuführen, dass der Waldgrubber im Gegensatz zu den anderen Saataggregaten über keine Verstellmöglichkeit der Saatgutdosierung verfügte (vgl. Kapitel 3.2.5) und zudem große Probleme durch das Verstopfen der Saatauswurfrohre mit Humus auftraten. Die Angaben des berechneten mittleren Zeitverbrauchs pro Meter der untersuchten Saatverfahren zeigen für den Bestand I, dass mit dem Verfahren *ÖkoSat/U* für die Bearbeitung von einem Meter 1,4 s benötigt wurde. Das Saatverfahren *EggeSaat* benötigte 0,2 s mehr und mit Abstand den größten Zeitverbrauch wies das Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* mit 2,1 s auf.

**Tabelle 16: Mittelwert und Standardabweichung des Zeitverbrauchs und der zurückgelegten Strecken während der praxisnahen Bearbeitungsvariante bei den untersuchten Saatverfahren in beiden Bestandsvarianten**

Verfahren / Bestand		Zeit/TF [s]		m /TF [m]		Zeit/m [s m <sup>-1</sup> ]	
		MW	SD	MW	SD	MW	SD
<i>EggeSaat</i>	I	622	90,19	391,9	36,61	1,6	0,13
	II	1254	308,34	455,1	19,73	2,8	0,78
<i>ÖkoSat/U</i>	I	531	78,74	376,1	46,85	1,4	0,16
	II	961	134,17	385,5	25,85	2,5	0,26
<i>Weilmünster Waldgrubber</i>	I	1054	216,26	494,21	82,40	2,1	0,14
	II	1513	734,0,3	412,08	26,73	3,7	1,76

Im Bestand II wirkte sich wiederum die ungünstige Flächenausprägung auf die Leistung dieser Arbeitsverfahren aus. Die geringsten Unterschiede zum Bestand I konnten beim Verfahren „Weilmünster Waldgrubber“ erfasst werden. Hier stieg der mittlere Zeitverbrauch je Teilfläche um 44 %, beim Arbeitsverfahren „ÖkoSat/U“ um 87 % und beim Verfahren „EggeSaat“ verdoppelte sich der Zeitverbrauch je Teilfläche. Der Bearbeitungsgrad verringerte sich beim Verfahren „Weilmünster Waldgrubber“ um ca. 17 % auf 412,1 m, bei den anderen Verfahren wurde hingegen eine Zunahme der zurückgelegten Strecke von ca. 3 % („ÖkoSat/U“) und 16 % („EggeSaat“) erfasst. Der auf die Strecke von einem Meter berechnete Zeitverbrauch nahm im Vergleich zum Bestand I in der zweiten Bestandsvariante über alle Verfahren durchschnittlich um 76 % zu. Beim Verfahren „ÖkoSat/U“ belief sich der Mittelwert auf 2,5 s m<sup>-1</sup>, während beim Verfahren „EggeSaat“ dieser Wert um 0,3 s m<sup>-1</sup> höher ausfiel. Mit Abstand den größten Zeit-

verbrauch je bearbeiteten Meter wurde mit 3,7 s beim Verfahren „Weilmünster Waldgrubber“ registriert. Dem Verfahren „ÖkoSat/U“ konnte auch im Bestand II die höchste Leistung nachgewiesen werden, obwohl die mit Hiebsresten bedeckte Fläche um 46 % größer war als beim Verfahren „EggeSaat“ und sogar 131 % höher als beim Verfahren „Weilmünster Waldgrubber“.

## 6.2 Ökonomische Bewertung der Arbeitsverfahren

### 6.2.1 Datenbasis

Nach den verfahrensspezifischen Auswertungen der Zeitstudien vor dem Hintergrund der Zusammensetzung des Zeitverbrauchs sowie der Aufdeckung von leistungsbeeinflussenden Faktoren auf Basis der Arbeitsablaufabschnitte wird im Folgenden ein ökonomischer Vergleich zwischen den eingesetzten Betriebsmitteln vorgenommen. Ein solcher Vergleich muss sich an bewährten praxisnahen Arbeitsgepflogenheiten orientieren und somit auf die Produktivität dieser Teilflächen-Bearbeitung aufbauen. Die erfassten Produktivitäten (Zeit/m) der einzelnen Arbeitsverfahren waren jedoch – bedingt durch das Versuchsdesign – durch geringe Wiederholungen gekennzeichnet. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse der streifenweisen Bearbeitung auf Flächenbearbeitungs-Produktivitäten hochgerechnet und bei den Auswertungen zusätzlich berücksichtigt. Durch diese Maßnahme erhielt man nach Abzug von einem nicht repräsentativen Zyklus (Verfahren: *Meinberg Wundstreifenpflug*) insgesamt 79 Zyklen von 790,8 Minuten Dauer für die fünf Arbeitsverfahren in beiden Bestandsvarianten.

Die bereits in Kapitel 4.1 geschilderten Besonderheiten der Erhebungsmethodik erlaubten keine repräsentativen Ganztagsstudien. Die vorgestellten Ausführungen dienen lediglich einer orientierenden Leistungsdatenermittlung der untersuchten Betriebsmittel.

Bei den angeführten Zeiten handelt es sich um die Reine Arbeitszeit (RAZ) je Bearbeitungsmeter. Die Allgemeinen Zeiten (AZ) wurden während der Teilflächenbearbeitung sowie zwischen den Flächen erfasst, waren jedoch durch einen hohen Anteil versuchsbedingter Zeiten belastet, die bei den folgenden Betrachtungen ausgeklammert werden mussten. Die nicht auswertbaren Zeiten (NAZ) während einer Teilflächenbearbeitung ergaben sich vor allem aus Tätigkeiten wie z. B. Ab- und Rücksprachen des Probanden mit dem Versuchsleiter oder der Überprüfung von Messgeräten usw. Bei den vorgenommenen Auswertungen wurde diese Zeitart nicht weiter berücksichtigt.

Mit Hilfe eines multiplen linearen Regressionsansatzes wurden die Zusammenhänge zwischen mehreren Einflussgrößen (Arbeitsbedingungen/Flächenausprägungen) und der Zielgröße (RAZ/m) untersucht. Hiermit sollte überprüft werden, ob Variablen existieren, die die Varianz des Zeitverbrauchs gesichert erklären und sich in einem Modell verknüpfen lassen, welches erlaubt, sichere Erkenntnisse auf den Zeitverbrauch abzuleiten. Die Berechnung der Regressionen erfolgte entsprechend der im Kapitel 6.1.1.1 beschriebenen Vorgehensweise. Die Implementierung einer Variablen (Regressor) orientierte sich wiederum am F-Wert des partiellen Korrelationskoeffizienten zwischen Regressor und Regressand. Die Implementierungsgrenze ist an der F-Verteilungswahrscheinlichkeit von höchstens 0,05 ausgerichtet. Ein Ausschluss erfolgt bei Überschreiten der Wahrscheinlichkeit von 0,10.

## 6.2.2 Regressionsmodell zur Erklärung des Zeitverbrauchs

### 6.2.2.1 Überprüfung und Auswahl möglicher Regressoren

Der Zeitverbrauch einer Teilflächenbearbeitung wird zum einen durch die individuelle Leistungshergabe des Pferdeführers und der Tiere, zum anderen durch den Arbeitsgegenstand (Teilfläche) beeinflusst. Die beobachtete Leistung des Fuhrmanns konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht mit den weiteren Pferdeführern verglichen werden. Der Streueffekt des Zeitverbrauchs durch diesen Faktor wurde durch Beurteilung des Leistungsgrades verringert.

Die sich aus der Arbeitsumgebung, d. h. im engeren Sinn der zu bearbeitenden Teilfläche, ergebenden Arbeitsbedingungen resultieren vor allem aus der Deckung der Hiebsreste vergangener forstlicher Eingriffe sowie der Hangneigung. Diese Einflussgrößen des Zeitverbrauchs wurden im Vorfeld der Studie erfasst und unterschieden sich deutlich zwischen den Versuchsbeständen (vgl. Kapitel 3.2).

Die Bearbeitungszeit je Teilfläche wird durch das Vorhandensein von Schlagabraum beeinflusst, zum einen durch einen erhöhten Bearbeitungsgrad und zum anderen durch das partielle Räumen der Hiebsreste durch den Pferdeführer (vgl. Kapitel 4.3.4.3). Die Variable *Gesamtdeckung Schlagabraum* (in  $m^2$ ) wurde aus der Flächendeckung des Schlagabraums (Zopf und Äste) berechnet und im Regressionsmodell berücksichtigt. In Abbildung 12 sind die Zusammenhänge der Zielgröße und des möglichen Regressors *Gesamtdeckung Schlagabraum* in einem Scatterplot dargestellt. Es zeigt sich, dass im Bestand II deutlich mehr Schlagabraum auf den Teilflächen vorhanden war als in der ersten Bestandsvariante.

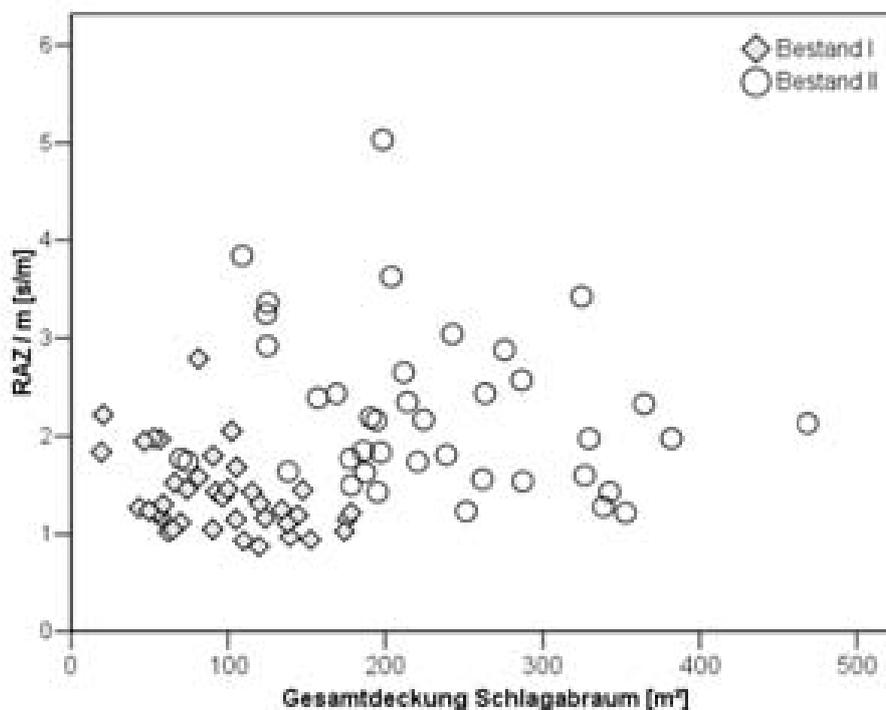


Abbildung 12: Scatterplot des möglichen Regressors *Gesamtdeckung Schlagabraum* versus der Zielgröße *RAZ/m* getrennt nach Bestandsvarianten

In den für den Pferdeeinsatz ungünstigeren Bestandsverhältnissen (Bestand II) lagen zudem die Zeitverbrauchswerte höher und wiesen eine größere Streuung auf. Im Modellaufbau der Regression wird sich zeigen, ob dieser Regressor innerhalb der Arbeitsverfahren gesichert die  $RAZ/m$  erklären kann.

Die in Längsrichtung alle 50 m gemessene Hangneigung der Versuchsfelder in Prozent stand ebenfalls als Einflussgröße der  $RAZ/m$  für jede Teilfläche zur Verfügung. Mit zunehmender Hangneigung wirkt die Bearbeitung beanspruchender auf Mensch und Tier, so dass die Bearbeitungsgeschwindigkeit wahrscheinlich sinkt, was mit einer Steigerung des Zeitverbrauchs  $RAZ/m$  einhergeht. Der Scatterplot in Abbildung 13 zeigt vor allem, dass die Hangneigung in der zweiten Bestandsvariante höhere Werte aufwies. Innerhalb der abgetragenen Hangneigungen streute jedoch die  $RAZ/m$  deutlich.

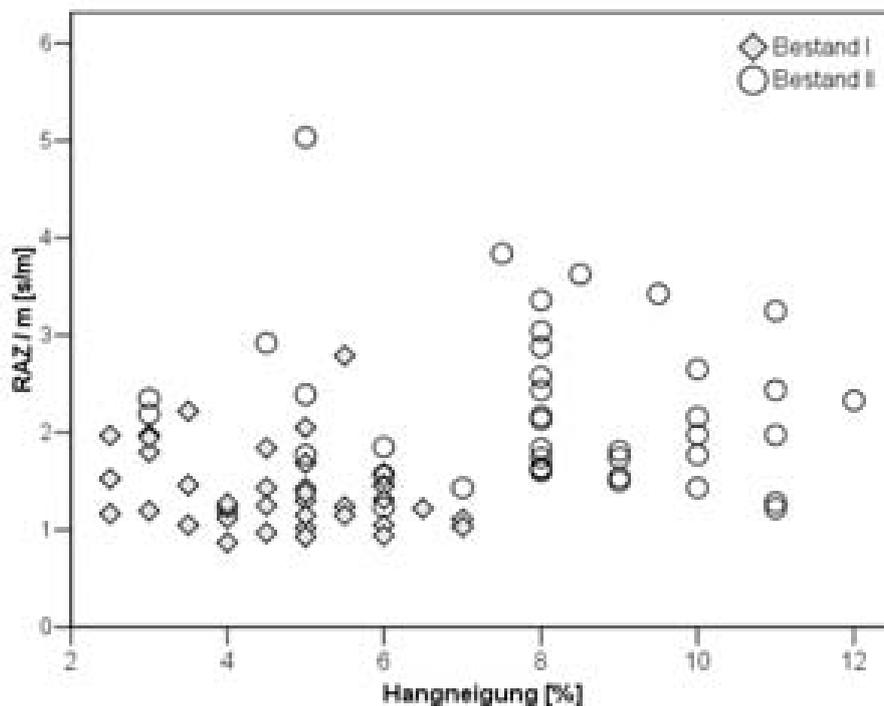


Abbildung 13: Scatterplot des möglichen Regressors *Hangneigung* versus der Zielgröße *RAZ/m* getrennt nach Bestandsvarianten

Die unterstellte Beeinflussung des Zeitverbrauchs durch die Stammzahl beruht vor allem auf der eingeschränkten Bewegungsfreiheit des Gespanns mit den jeweiligen Betriebsmitteln. Mit zunehmender Stammzahl erhöhte sich der Zeitverbrauch für die Orientierung des Pferdeführers auf der noch zu bearbeitenden Fläche. Abbildung 14 gibt einen Einblick in den Zusammenhang von Stammzahl und Zeitverbrauch  $RAZ/m$  über alle Verfahren. Es zeigt sich hier lediglich die Aussage des Kapitels 3.2 bestätigt, dass in Bestand II weniger Fichten stockten als im ersten Versuchsbestand. Ob dies bei einzelnen Verfahren einen gesicherten Einfluss auf den Zeitverbrauch ausübte, muss der Aufbau der Regressionsmodelle zeigen.

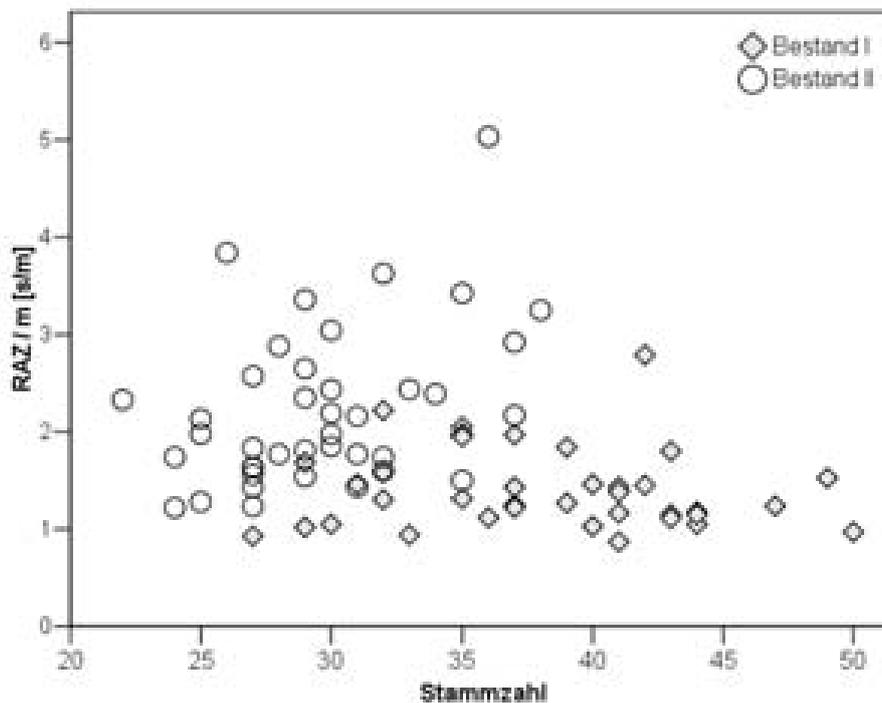


Abbildung 14: Scatterplot des möglichen Regressors *Stammzahl* versus der Zielgröße *RAZ/m* getrennt nach Bestandsvarianten

Den auf den Teilflächen vorhandenen Stöcken kann ein ähnlicher Einfluss auf die Zielgröße unterstellt werden wie den auf den Flächen stockenden Fichten, weil auch sie erhöhte Zeiten durch die Orientierung und Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft des Aggregats nach Überfahung von Hindernissen provozierten. Als möglicher Regressor musste jedoch die Stockzahl vernachlässigt werden, da in diesem Fall im Versuchsbestand II weniger Stöcke erfasst werden konnten als in den Flächen des Bestandes I. Der Grund hierfür war, dass Stöcke unter den noch teilweise restbenadelten Kronen bei der Flächenaufnahme nicht erfasst werden konnten, jedoch nach partieller Räumung der Hiebsreste durch den Pferdeführer eine Einflussgröße der Arbeitsbedingung darstellten. Diese Interkorrelation zwischen Hiebsresten und Stockzahl kann im Regressionsmodell zu unplausiblen Aussagen führen.

Wie in Abbildung 15 dargestellt, nehmen sowohl die Hangneigung als auch die *Gesamtdeckung* des Schlagabraums in den Flächen der zweiten Bestandsvariante zu. Diese Korrelation der im Modell zu berücksichtigenden Variablen lässt vermuten, dass bereits die Summe der Bestandsdifferenzen die Streuung der Zielgröße ausreichend erklärt. Um zu überprüfen, ob tatsächlich nur solche Differenzen bestehen, die mit den modellinternen möglichen Regressoren (*Gesamtdeckung Schlagabraum*, *Hangneigung* und *Stammzahl*) erklärt werden konnten, wurde die Datenmatrix um die Dummy-Variable *Dummy-Bestand* (vgl. JACKE, 1980) ergänzt, die für den Bestand I generell den Wert 0 und für den Bestand II den Wert 1 erhielt.

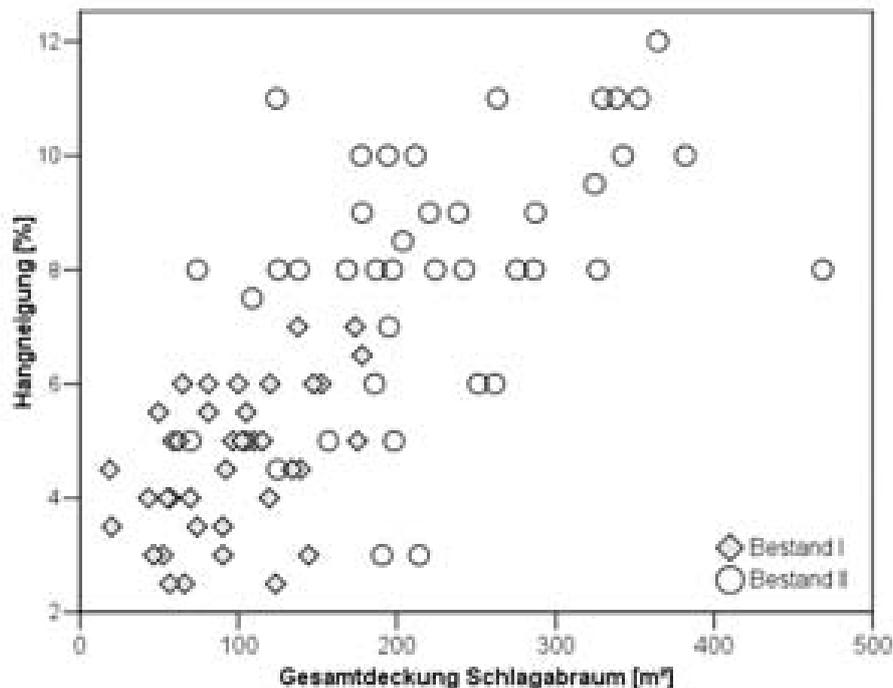


Abbildung 15: Scatterplot der möglichen Regressoren *Gesamtdeckung Schlagabraum* versus *Hangneigung*

Nach dem im vorherigen Absatz geschilderten Vorgehen wurde eine weitere Dummy-Variable geschaffen, mit der überprüft werden sollte, ob neben den möglichen Regressoren noch weitere interkollektive Unterschiede durch die Bearbeitungsvariante (praxisnah vs. streifenweise) existierten. Die Variable *Dummy-Bearbeitung* erhielt für die praxisnahe Bearbeitung generell den Wert 0 und für die streifenweise Bearbeitung entsprechend den Eintrag 1.

### 6.2.2.2 Regressionsmodelle der Bodenverwundungsverfahren

Um im Vorfeld der eigentlichen Regressionsanalyse eine Vorstellung über die Korrelationen zwischen den Variablen zu erhalten, wurde eine Korrelationsmatrix erstellt. Mit ihr kann der lineare Zusammenhang der Variablen aufgedeckt und bereits grob eingeschätzt werden, inwieweit die möglichen Regressoren zu einer Varianzerklärung der Zielgröße beitragen.

Die Korrelationsmatrix der Variablen für das Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* ist in Tabelle 17 dargestellt. Betrachtet man die erste Spalte (*RAZ/m*) bzw. erste Zeile der Matrix, so sind die Primärkorrelationen zwischen der Zielgröße und den möglichen Regressoren abzulesen. Dabei ist eine deutliche Korrelation ( $r = 0,857$ ) zwischen der Zielgröße und der Variablen *Gesamtdeckung Schlagabraum* zu erkennen, die bereits die Varianz des Zeitverbrauchs hochgradig erklärt. Ebenfalls von Bedeutung könnte die Variable *Hangneigung* mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,697 sein. Daneben zeichnet sich auch die Variable *Dummy-Bestand* ( $r = 0,745$ ) durch einen starken Zusammenhang zur Zielgröße aus. Auffällig ist die hohe Interkorrelation zwischen diesen drei möglichen Regressoren. Dies kann während des Modellaufbaus zur Elimination einzelner Variablen aus dem Regressionsmodell führen. Eine Entscheidung über den Ausschluss von Variablen bleibt dem schrittweisen Aufbau des Regressionsmodells über die Entwicklung der partiellen Korrelation zwischen Zielgröße und Regressoren vorbehalten. Die Variable *Stammzahl* zeigt keinen Zusammenhang zur Zielgröße, jedoch weist sie eine negative signifikante Korrelation mit der *Hangneigung* auf.

Tabelle 17: Matrix der Pearsonschen Korrelationskoeffizienten der originären Modellvariablen für das Bodenverwundungsverfahren *Eberswalder Streifenpflug*

Korrelation nach Pearson	<i>RAZ/m</i> [s/m]	Gesamtdeckung Schlagabraum [m <sup>2</sup> ]	Hangneigung [%]	Stammzahl [N]	Dummy-Bestand	Dummy-Bearbeitung
<i>RAZ/m</i> [s/m]	1,000	0,857*	0,697*	-0,239	0,745*	-0,266
Gesamtdeckung Schlagabraum [m <sup>2</sup> ]	0,857*	1,000	0,773*	-0,294	0,678*	-0,366
Hangneigung [%]	0,697*	0,773*	1,000	-0,634*	0,783*	-0,183
Stammzahl [N]	-0,239	-0,294	-0,634	1,000	-0,564*	-0,063
Dummy-Bestand	0,745*	0,678*	0,783	-0,564*	1,000	0,000
Dummy-Bearbeitung	-0,266	-0,366	-0,183	-0,063	0,000	1,000

\* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$ .

Betrachtet man den schrittweisen Modellaufbau der linearen Regression für das Arbeitsverfahren *Eberswalder Streifenpflug*, so zeigt sich, dass wie erwartet die Gesamtdeckung des Schlagabraums im ersten Modellschritt in das Modell implementiert wird. Tabelle 18 zeigt die Modellzusammenfassung für den Regressor mit dem entsprechenden Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ).

Tabelle 18: Modellzusammenfassung der Regressionsanalyse mit der abhängigen Variable *RAZ/m* für das Bodenverwundungsverfahren *Eberswalder Streifenpflug*

Modellzusammenfassung (b)

Modell	$r$	$R^2$	Korrigiertes $R^2$	Standardfehler des Schätzers
1	0,857(a)	0,734	0,715	0,38996

a Einflussvariablen: (Konstante), Gesamtdeckung Schlagabraum [m<sup>2</sup>]

b Abhängige Variable: *RAZ/m* [s]

Das Bestimmtheitsmaß lässt erkennen, dass bereits der lineare Zusammenhang zwischen der Gesamtdeckung des Schlagabraums und *RAZ/m* ca. 73 % der gesamten Streuung der Zielgröße erklärt. Nach diesem ersten Schritt wird keiner der übrigen möglichen Regressoren in das Modell aufgenommen, da ihre partiellen Korrelationen gemäß der Implementierungsgrenze von  $p_F \leq 0,05$ ) keinen weiteren signifikanten Einfluss auf die Zielgröße ausweisen. Tabelle 19 gibt Auskunft über den Koeffizienten des Regressionsmodells zur Erklärung des Zeitverbrauchs *RAZ/m*, der partiellen und der ursprünglichen Korrelationen nullter Ordnung des Regressors.

**Tabelle 19: Parameter des Regressionsmodells für das Bodenverwundungsverfahren *Eberswalder Streifenpflug* mit den ursprünglichen und partiellen Korrelationskoeffizienten der Modellgröße**

**Koeffizienten (a)**

Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		t	Signifikanz	Korrelationen	
		B	Standardfehler			Nullter Ordnung	Partiell
1	(Konstante)	0,737	0,177	4,157	0,001		
	Gesamtdeckung Schlagabraum	0,008	0,001	6,216	,0,000	0,857	0,857

a Abhängige Variable: RAZ/m [s]

Aus Tabelle 19 sind die Parameter der Regressionsgleichung des Verfahrens *Eberswalder Streifenpflug* zu entnehmen. Die Gleichung für den Zeitverbrauch RAZ/m lautet demnach:

$$RAZ/m_{\text{Eberswalder Streifenpflug}} = 0,737 + 0,008 * \text{Gesamtdeckung Schlagabraum [m}^2\text{]}$$

Nach diesem Modell wird lediglich die Gesamtdeckung des Schlagabraums als Regressor in der entsprechenden Gleichung berücksichtigt, um den Zeitverbrauch zu erklären. Tabelle 20 gibt weiter Auskunft darüber, wie sich nach dem Modell Aufbau die übrigen Regressoren in ihren partiellen Korrelationen gegenüber der ursprünglichen Korrelation zur Zielgröße verändert haben.

**Tabelle 20: Partielle Korrelationskoeffizienten zwischen den verbleibenden Regressoren und der Zielgröße RAZ/m für das Bodenverwundungsverfahren *Eberswalder Streifenpflug***

**Ausgeschlossene Variablen (a)**

Modell		t	Signifikanz	Partielle Korrelationen
1	Hangneigung [%]	0,376	0,713	0,104
	Stammzahl	0,092	0,928	0,026
	Dummy-Bestand	1,732	0,107	0,433
	Dummy-Bearbeitung	0,360	0,725	0,099

a Abhängige Variable: RAZ/m [s]

Vergleicht man die Ergebnisse aus Tabelle 17 mit denen der Tabelle 20, so wird deutlich, dass nach der Übernahme der *Gesamtdeckung* des Schlagabraums in das Regressionsmodell alle weiteren möglichen Regressoren an Bedeutung verloren haben. Insbesondere zeigte sich dies bei den Variablen *Hangneigung* und *Dummy-Bestand*. Die linearen Zusammenhänge zwischen den nun erreichten Residuen und den übrigen Größen sind zu schwach für weitere signifikante Erklärungsansätze. Die hohe Interkorrelation zwischen den potenziellen Regressoren *Dummy-Bestand* und *Hangneigung* zum berücksichtigten Regressor *Gesamtdeckung Schlagabraum* hat das Modell beeinflusst.

Die Ausgabetafeln der Regression für das Arbeitsverfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* sind dem ANHANG V zu entnehmen. Tabelle V\_5 liefert die Korrelationsmatrix der berechneten Koeffizienten nach Pearson. Hier fällt auf, dass die Variablen *Dummy-Bestand* und *Hang-*

*neigung* eine signifikante Korrelation mit dem Zeitverbrauch aufweisen. Sehr ausgeprägt sind hier wieder die Korrelationen zwischen den möglichen Regressoren *Gesamtdeckung Schlagabraum* und *Hangneigung* mit einer Korrelation von  $r = 0,837$ . Ebenfalls weisen diese beiden Variablen jeweils hohe Primärkorrelationen mit der Variablen *Dummy-Bestand* (*Gesamtdeckung Schlagabraum*  $r = 0,827$  und *Hangneigung*  $r = 0,838$ ) auf. Der Dummy-Variablen für die ausgewiesenen Bearbeitungsvarianten *Dummy-Bearbeitung* konnte kein Zusammenhang mit der Zielgröße oder den übrigen Variablen nachgewiesen werden.

Betrachtet man das Regressionsergebnis für das Arbeitsverfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* in Tabelle V\_6, so ist festzustellen, dass lediglich die Dummy-Variable *Bestand* in das Modell übernommen wird. Dieser Regressor erklärt ca. 40 % ( $R^2 = 0,404$ ) der Streuung des Zeitverbrauchs. Nach diesem Modellschritt konnte keiner der weiteren möglichen Regressoren in das Modell aufgenommen werden, da sich keine weiteren signifikanten partiellen Korrelationen mit dem Zeitverbrauch ergaben. Tabelle V\_7 gibt Auskunft über die Parameter des Regressionsmodells zur Erklärung des Zeitverbrauchs  $RAZ/m$ , der partiellen und der ursprünglichen Korrelationen des Regressors und liefert die folgende Regressionsgleichung:

$$RAZ/m_{\text{Meinberg Wundstreifenpflug}} = 1,189 + 0,362 * \text{Dummy-Bestand}$$

Tabelle V\_8 fasst die partiellen Korrelationen der aus dem Modell ausgeschlossenen Regressoren zusammen. Ein Vergleich der Tabelle V\_8 mit der Korrelationsmatrix aus Tabelle V\_5 zeigt, dass nach der Implementierung der Dummy-Variablen *Bestand* alle übrigen Variablen weiter an Bedeutung verloren haben.

### 6.2.2.3 Regressionsmodelle der Saatverfahren

In Tabelle V\_9 des ANHANGS V ist die Matrix des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten für die Variablen im Verfahren *EggeSaat* zu entnehmen. Die Zusammenhänge zwischen den möglichen Regressoren und dem Zeitverbrauch zeigen, dass lediglich die Dummy-Variable für den Bestandsunterschied *Dummy-Bestand* einen signifikanten Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,552$  aufweist. Der Zusammenhang zwischen der Variablen *Stammzahl* und der Zielgröße  $RAZ/m$  ist ebenfalls noch signifikant ( $r = -0,465$ ). Betrachtet man die weiteren Korrelationen, so kann auch bei diesem Verfahren die hohe Interkorrelation der Hangneigung ( $r = 0,548$ ) und der Gesamtdeckung des Schlagabraums ( $r = 0,796$ ) mit der Variablen *Dummy-Bestand* aufgezeigt werden. Die Stammzahl lässt einen negativen Zusammenhang von  $r = -0,718$  mit der Variablen *Dummy-Bestand* erkennen. So nimmt der Zeitverbrauch mit zunehmender Stammzahl im Bestand II ab. Für die Variable *Dummy-Bearbeitung* konnte hingegen kein Zusammenhang mit der Zielgröße oder den übrigen Variablen ermittelt werden.

Das Regressionsergebnis für das Arbeitsverfahren *EggeSaat* in Tabelle V\_10 zeigt, dass lediglich die Dummy-Variable *Bestand* aufgrund der höheren signifikanten Ursprungskorrelation (vgl. Tabelle V\_9) in das Modell implementiert wird. Diese Variable erklärt 30 % ( $R^2 = 0,305$ ) der Varianz des Zeitverbrauchs. Nach diesem Modellschritt konnte keiner der übrigen Regressoren in das Modell aufgenommen werden. Tabelle V\_11 gibt Auskunft über die Parameter des Regressionsmodells zur Erklärung des Zeitverbrauchs  $RAZ/m$  und liefert die Regressionsgleichung:

$$RAZ/m_{\text{EggeSaat}} = 1,551 + 0,574 * \text{Dummy-Bestand}$$

In Tabelle V\_12 (vgl. ANHANG V) sind die partiellen Korrelationen der aus dem Modell ausgeschlossenen Prädiktoren dargestellt. Ein Vergleich der partiellen Korrelationen aus Tabelle V\_12 mit den Ursprungskorrelationen der Tabelle V\_9 zeigt, dass nach der Modellintegration der Dummy-Variablen *Bestand* keiner der übrigen Regressoren an Einfluss zur Erklärung der Zielgrößenstreuung gewinnt. Die negative Ursprungskorrelation der *Stammzahl* nahm um 0,348 in der partiellen Korrelation zu, besitzt jedoch ebenfalls keinen signifikanten Einfluss mehr.

in Blick auf die Korrelationsmatrix der Tabelle V\_13 im ANHANG V gestattet einen Einblick in die Primärkorrelationen zwischen der Zielgröße *RAZ/m* und den möglichen Regressoren für das Saatverfahren *ÖkoSat/U*. Hier zeigt sich, dass mit Ausnahme der Dummy-Variablen für die Unterscheidung der Bearbeitungsvarianten *Dummy-Bearbeitung* alle übrigen Regressoren einen gesicherten Zusammenhang mit der Zielgröße aufweisen. Den höchsten Korrelationskoeffizienten zeigt die Variable *Dummy-Bestand* mit  $r = 0,717$ . Es ist anzunehmen, dass dieser Regressor die Zeitverbrauchsvarianz bereits ausreichend erklärt. Des Weiteren zeigen die Variablen *Gesamtdeckung Schlagabraum* ( $r = 0,604$ ) und *Hangneigung* ( $r = 0,453$ ) signifikante Zusammenhänge zur Zielgröße. Der Regressor *Stammzahl* hingegen weist eine negative signifikante Primärkorrelation ( $r = -0,613$ ) zum Zeitverbrauch auf. Auch bei diesem Verfahren wird eine hohe Interkorrelation zwischen den Regressoren deutlich. So korreliert die Variable *Dummy-Bestand* jeweils stark mit den potenziellen Regressoren *Gesamtdeckung Schlagabraum* ( $r = 0,886$ ), *Hangneigung* ( $r = 0,709$ ) und *Stammzahl* ( $r = -0,902$ ), was wiederum zu einem Ausschluss einer oder mehrerer Variablen im Modell führen kann. Zwischen der Variable *Dummy-Bearbeitung* und den übrigen Variablen konnte kein gesicherter Zusammenhang nachgewiesen werden.

Betrachtet man das Regressionsergebnis in Tabelle V\_14, so zeigt sich, dass lediglich die Variable *Dummy-Bestand* in das Modell übernommen wird, weil sie gut 51 % ( $R^2 = 0,515$ ) der Streuung des Zeitverbrauchs erklärt. Nach diesem Modellschritt konnte kein weiterer der möglichen Regressoren durch den Modellaufbau berücksichtigt werden. In Tabelle V\_15 sind die Parameter des ermittelten Regressionsmodells sowie die Korrelationen des Regressors dargestellt. Hieraus ergibt sich die folgende Regressionsgleichung:

$$RAZ/m_{\text{ÖkoSat/U}} = 1,215 + 0,811 * \text{Dummy-Bestand}$$

Im ANHANG V ist die vollständige Tabelle des Modellaufbaus für das Verfahren *ÖkoSat/U* aufgeführt (vgl. Tabelle V\_16). Nach der Implementierung der Dummy-Variablen *Bestand* verlieren alle übrigen Variablen über deren partielle Korrelation an Bedeutung. Die hohen Ursprungskorrelationen der Variablen *Gesamtdeckung Schlagabraum* und *Hangneigung* brechen in ihren partiellen Korrelationen zusammen. Der Regressor *Stammzahl* nimmt als einziger stark zu und weist nun eine positive partielle Korrelation von 0,113 auf.

In der Tabelle V\_17 ist vorab die berechnete Korrelationsmatrix der Variablen für das Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* dargestellt. Um die jeweiligen Primärkorrelationen auszuweisen, werden die Zusammenhänge zwischen den möglichen Regressoren und dem Zeitverbrauch *RAZ/m* betrachtet. Es zeigt sich, dass die Dummy-Variable für den Bestandsunterschied *Dummy-Bestand* einen hohen signifikanten Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,759$  besitzt. Einen ebenfalls noch signifikanten Zusammenhang zur Zielgröße weisen die Variablen *Gesamtdeckung Schlagabraum* ( $r = 0,592$ ) und *Hangneigung* mit  $r = 0,511$  auf. Bei den weiteren Korrelationen fallen die hohen Interkorrelationen der *Gesamtdeckung Schlagabraum* ( $r = 0,819$ ) und der *Hangneigung* ( $r = 0,548$ ) mit dem Regressor *Dummy-Bestand* auf. Dies weist auf einen engen Zusammenhang mit der Bestandsausprägung hin, der durch die Dummy-Variable

bereits erfasst werden konnte. Für die Variablen *Stammzahl* und *Dummy-Bearbeitung* konnten keine Zusammenhänge mit der Zielgröße oder einer der übrigen Variablen ermittelt werden.

Betrachtet man das Regressionsergebnis für das Arbeitsverfahren *Weilmünster Waldgrubber* in Tabelle V\_18, so zeigt sich, dass auf Basis der hohen Primärkorrelation (vgl. Tabelle V\_17) hier wieder lediglich die Dummy-Variable *Bestand* im Modell berücksichtigt wird. Diese Variable erklärt ca. 57 % ( $R^2 = 0,575$ ) der Zielgrößenstreuung. Auch bei diesem Verfahren kann kein weiterer Modellschritt aufgebaut werden. Tabelle V\_18 gibt Auskunft über die Parameter des Regressionsmodells zur Erklärung des Zeitverbrauchs  $RAZ/m$  und liefert die Regressionsgleichung:

$$RAZ/m_{\text{Weilmünster Waldgrubber}} = 1,909 + 1,420 * \text{Dummy-Bestand}$$

In der Tabelle V\_20 sind die partiellen Korrelationen der aus dem Regressionsmodell ausgeschlossenen Regressoren dargestellt. Ein Vergleich mit diesen Korrelationen und den Ursprungskorrelationen aus der Tabelle V\_17 zeigt, dass nach der Modellintegration der Dummy-Variable *Bestand* kein weiterer Regressor an Bedeutung zunimmt und somit vom Modell ausgeschlossen wird. Alle weiteren Regressoren verlieren stark in ihrer partiellen Korrelation zum Zeitverbrauch und üben keinen signifikanten Einfluss aus.

## 6.2.3 Herleitung der Planzeiten

### 6.2.3.1 Datenbasis

Die Ergebnisse aus Kapitel 4.5.2 erlaubten keine Berechnung von Regressionsmodellen zur Erstellung eines Planzeitkatalogs mit gleitenden Mittelwerten (Basis der Zuschläge). Es werden daher die bei den Studien errechneten Zeitverbrauchsmittelwerte aus den Praxisflächen und den hochgerechneten Reihensbearbeitungen für die Planzeiten-Herleitung berücksichtigt. Die Untersuchungsbestände charakterisieren hierbei die für den Pferdeinsatz nicht näher aufschlüsselbaren bzw. quantifizierbaren „normalen“ (Bestand I) und „erschwerten“ (Bestand II) Arbeitsbedingungen.

Die im Vorfeld verwendete rechnerische Größe Zeitverbrauch je Laufmeter ( $s\ m^{-1}$ ) wurde in der folgenden Ermittlung von Planzeiten durch die Arbeitszeit je 100 Laufmeter ersetzt. Um die Bearbeitung einer Teilfläche von der Größe 0,1 ha zu berücksichtigen, wurden die im Kapitel 5.1 dargestellten mittleren Laufmeter des Gespanns je Verfahren und Bestand herangezogen.

Zur Ermittlung der hier vorgestellten Planzeiten wurden die Ergebnisse der Zeitstudie auf Normleistung umgerechnet. Hierzu ist es notwendig, den Leistungsgrad des arbeitenden Menschen und in diesem speziellen Fall pferdegezogener Betriebsmittel auch den der Arbeitseinheit Pferd/Mensch zu beurteilen. Im Folgenden wurde für den Pferdeführer und das Gespann ein Leistungsgrad von 135 % veranschlagt, da die Pferde in einem sehr guten Trainingszustand waren, welcher wiederum durch den sehr erfahrenen Pferdeführer effizient im Rahmen der Arbeitsaufgabe genutzt werden konnte.

Die hohe Variation der gemessenen Allgemeinen Zeiten (Rüst-, Verteil-, Pausenweg- und Erholzeiten) wurde durch das kombinierte Versuchsdesign (Zeitstudien, physiologische Messungen an Mensch und Tier sowie die Erfassung von Arbeitsqualitäten usw.) dieser Studie verursacht. Vor allem die durch die versuchsbedingten Unterbrechungen nicht eindeutig zu erfassenden Verteil- und Erholzeiten erschwerten die Interpretation der während dieser Studie erhobenen Allgemeinen Zeiten. Für deren Berücksichtigung erscheint aus ergonomischen und

arbeitsmethodischen Aspekten ein pauschaler Zuschlag von 35 % zur Reinen Arbeitszeit als vertretbar (vgl. BACKHAUS, 1990). Bei einem unterstellten sechsständigen Gespannarbeitstag entspräche dies etwa 2 Stunden (1 Stunde und 48 Minuten).

### 6.2.3.2 Bodenverwundungsverfahren

Bei den untersuchten Bodenbearbeitungsverfahren errechneten sich die Mittelwerte für die Reine Arbeitszeit (RAZ) aus der praxisnahen Bearbeitungsvariante und der rechnerisch angepassten streifenweisen Bearbeitungsvariante. Tabelle 21 zeigt den arithmetischen Mittelwert (MW), die Standardabweichung (SD) sowie den Variationskoeffizienten (CV) der RAZ/100 m nach Arbeitsverfahren und Beständen getrennt.

Tabelle 21: Mittelwert (MW), Standardabweichung (SD) und Variationskoeffizient (CV) für die Reine Arbeitszeit je 100 m bei den untersuchten Bodenverwundungsverfahren in beiden Bestandsvarianten

Verfahren / Bestand		RAZ/100 m [s]		
		MW	SD	CV
<b>Eberswalder Streifenpflug</b>	<i>I</i>	121,40	13,56	11,17
	<i>II</i>	253,28	65,70	25,94
<b>Meinberg Wundstreifenpflug</b>	<i>I</i>	137,53	17,04	12,39
	<i>II</i>	137,07	14,81	10,80

Anhand von Tabelle 21 wird deutlich, dass die RAZ/100 m für das Arbeitsverfahren *Eberswalder Streifenpflug* eine höhere Streuung im Bestand II aufwies, welche wiederum durch die ungünstigere Flächenausprägung (vgl. Kapitel 3.2.4) zu erklären ist. Der *Eberswalder Streifenpflug* reagierte auf die Hindernisse im Bestand II sensibler. Das spiegelte sich u. a. auch bei den Überfahrungen von Hiebsresten und Stöcken wider (vgl. Kapitel 5.3.3.1). Die mittlere Reine Arbeitszeit je Bearbeitungsstrecke (100 m) wies beim Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* nahezu identische Werte in beiden Bestandsvarianten auf.

Tabelle 22 zeigt die zur Berechnung der Planzeiten verwendeten Mittelwerte für die Reine Arbeitszeit, die sich daran orientierende Allgemeine Zeit (35 % der RAZ), die Gesamt Arbeitszeit (RAZ + AZ) und die nach der Multiplikation der Gesamt Arbeitszeit mit dem Leistungsfaktor (LF = 1,35) errechnete Planzeit der Bodenverwundungsverfahren.

Tabelle 22: Mittelwerte der Zeitarten zur Berechnung der Planzeiten für die Bodenverwundungsverfahren

Verfahren / Bestand		RAZ [s/100 m]	AZ [s/100 m]	GAZ [s/100 m]	Planzeit [s/100 m]	Planzeit [Min/100 m]
<b>Eberswalder Streifenpflug</b>	<i>I</i>	121,4	36,4	157,8	213,1	4
	<i>II</i>	253,3	76,0	329,3	444,5	7
<b>Meinberg Wundstreifenpflug</b>	<i>I</i>	137,5	41,3	178,8	241,4	4
	<i>II</i>	137,1	41,1	178,2	240,6	4

Mittelwert und Standardabweichung für die erfassten Zeitverbrauchswerte sowie der bearbeiteten Strecken für die Arbeitsverfahren der kombinierten Rillensaat sind in Tabelle 16 aufgeführt. Im Bestand I benötigte der Pferdeführer im Verfahren *ÖkoSat/U* für die Bearbeitung von 0,1 ha mit durchschnittlich 531 s am wenigsten Zeit. Im Vergleich hierzu benötigte das Saatverfahren *EggeSaat* bei der Bearbeitung eines Zyklus ca. 90 s länger. Der Mittelwert des Zeitverbrauchs für das Arbeitsverfahren *Weilmünster Waldgrubber* fiel mit 1.054 s für die Saat einer Versuchsfläche am höchsten aus. Eine vergleichbare Reihung der Arbeitsverfahren ergibt sich bei Betrachtung der bearbeiteten Strecke je Teilfläche. Mit der *ÖkoSat/U* wurden mit dem Arbeitsgespann im Mittel 376,1 m, mit der *EggeSaat* 391,9 m und mit dem *Weilmünster Waldgrubber* 494,2 m auf 0,1 ha zurückgelegt. Bei den Verfahren *ÖkoSat/U* und *EggeSaat* war es möglich, die vereinbarten 5 kg Buheckern je Teilfläche auszubringen, während dies – auch bei dem dargelegten deutlich höheren Bearbeitungsgrad – mit dem *Weilmünster Waldgrubber* nicht gelang. Bei diesem Verfahren konnten lediglich 2,6 kg/TF gesät werden. Dies war darauf zurückzuführen, dass der Waldgrubber im Gegensatz zu den anderen Saataggregaten über keine Verstellmöglichkeit der Saatgutdosierung verfügte (vgl. Kapitel 2.2.5) und zudem große Probleme durch das Verstopfen der Saatauswurfrohre mit Humus auftraten. Die Angaben des berechneten mittleren Zeitverbrauchs pro Meter der untersuchten Saatverfahren zeigen für den Bestand I, dass mit dem Verfahren *ÖkoSat/U* für die Bearbeitung von einem Meter 1,4 s benötigt wurden. Das Saatverfahren *EggeSaat* benötigte 0,2 s mehr und mit Abstand den größten Zeitverbrauch wies das Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* mit 2,1 s auf.

Im Bestand II wirkte sich wiederum die ungünstige Flächenausprägung auf die Leistung dieser Arbeitsverfahren aus. Die geringsten Unterschiede zum Bestand I konnten beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* erfasst werden. Hier stieg der mittlere Zeitverbrauch je Teilfläche um 44 %, beim Arbeitsverfahren *ÖkoSat/U* um 87 % und beim Verfahren *EggeSaat* verdoppelte sich der Zeitverbrauch je Teilfläche. Der Bearbeitungsgrad verringerte sich beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* um ca. 17 % auf 412,1 m, bei den anderen Verfahren wurde hingegen eine Zunahme der zurückgelegten Strecke von ca. 3 % (*ÖkoSat/U*) und 16 % (*EggeSaat*) erfasst. Der auf die Strecke von einem Meter berechnete Zeitverbrauch nahm im Vergleich zum Bestand I in der zweiten Bestandsvariante über alle Verfahren durchschnittlich um 76 % zu. Beim Verfahren *ÖkoSat/U* belief sich der Mittelwert auf  $2,5 \text{ s m}^{-1}$ , während beim Verfahren *EggeSaat* dieser Wert um  $0,3 \text{ s m}^{-1}$  höher ausfiel. Mit Abstand der größte Zeitverbrauch je bearbeiteten Meter wurde mit 3,7 s beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* registriert. Dem Verfahren *ÖkoSat/U* konnte auch im Bestand II die höchste Leistung nachgewiesen werden, obwohl die mit Hiebsresten bedeckte Fläche um 46 % größer war als beim Verfahren *EggeSaat* und sogar um 131 % höher als beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber*.

Unter normalen Arbeitsbedingungen des Pferdeeinsatzes kann die Bodenverwundung von 100 m mit einem Zeitbedarf von ca. 4 Minuten für beide Verfahren veranschlagt werden. Bei den in den Flächen des Bestandes II vorgefundenen Arbeitsbedingungen ist der benötigte Zeitbedarf für das Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* identisch mit dem im Bestand I registrierten. Das sich am Aggregat *Eberswalder Streifenpflug* orientierende Arbeitsverfahren hat gegenüber dem Saatverfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* unter den für den Pferdeeinsatz erschwerten Bedingungen einen um ca. 3 Minuten erhöhten Zeitbedarf. Hier zeigt sich die Problematik dieses Betriebsmittels vor allem mit dem auf den Flächen vorhandenen Schlagabraum.

### 6.2.3.3 Saatverfahren

Tabelle 23 weist ausgewählte Parameter der deskriptiven Statistiken für die Reinen Arbeitszeit je 100 m bei den untersuchten Saatverfahren in den Versuchsbeständen aus. Es ist ersichtlich, dass die drei Verfahren (*ÖkoSat/U*, *EggeSaat* und *Weilmünster Waldgrubber*) die Gelände-

und Bestandseigenschaften in ihrer Produktivität wiedergeben. Anhand der Variationskoeffizienten ist zu erkennen, dass die Verfahren *ÖkoSat/U* und *Weilmünster Waldgrubber* eine sehr geringe Streuung der RAZ/100 m in der ersten Bestandsvariante aufwiesen. Hingegen zeigten die berechneten Werte im Verfahren *EggeSaat* unter den einfacheren Bestandsbedingungen die mit Abstand höchste Streuung. Dies ist vor allem auf die unterschiedlich langen Bearbeitungswege je Teilfläche zurückzuführen.

**Tabelle 23: Arithmetischer Mittelwert (MW), Standardabweichung (SD) und Variationskoeffizient (CV) für die Reine Arbeitszeit je 100 m bei den untersuchten Saatverfahren in beiden Bestandsvarianten**

Verfahren / Bestand		RAZ/100 m [s]		
		MW	SD	CV
<i>EggeSaat</i>	I	155,10	53,66	34,60
	II	250,78	55,54	22,15
<i>ÖkoSat/U</i>	I	138,69	13,63	9,83
	II	236,81	69,78	29,47
<i>Weilmünster Waldgrubber</i>	I	208,53	19,23	9,22
	II	351,28	92,48	26,33

Im Versuchsbestand II stieg die RAZ/100 m bei allen Verfahren an. Bezüglich der Streuung anhand des Variationskoeffizienten lagen die Saatverfahren eng beieinander, das Verfahren *EggeSaat* wies dabei den geringsten Wert auf.

Tabelle 24 zeigt die zur Berechnung der Planzeiten verwendeten Mittelwerte für die Reine Arbeitszeit je 100 Bearbeitungsmeter sowie die Allgemeine Zeit (AZ), die Gesamte Arbeitszeit (GAZ) und die mit dem Leistungsfaktor (LF = 1,35) errechnete Planzeit je Saatverfahren.

**Tabelle 24: Mittelwerte der Zeitarten zur Berechnung der Planzeiten für die Saatverfahren**

Verfahren / Bestand		RAZ [s/100 m]	AZ [s/100 m]	GAZ [s/100 m]	Planzeit [s/100 m]	Planzeit [Min/100 m]
<i>EggeSaat</i>	I	155,1	46,5	201,6	272,2	5
	II	250,8	75,2	326,0	440,1	7
<i>ÖkoSat/U</i>	I	138,7	41,6	180,3	243,4	4
	II	236,8	71,0	307,9	415,6	7
<i>Weilmünster Waldgrubber</i>	I	208,5	62,6	271,1	366,0	6
	II	351,3	105,4	456,7	616,5	10

Der Zeitbedarf für die Rillensaat einer Strecke von 100 m schwankte bei den untersuchten Verfahren in der ersten Bestandsvariante zwischen ca. 4 Minuten (*ÖkoSat/U*) und ca. 6 Minuten (*Weilmünster Waldgrubber*), das Verfahren *EggeSaat* rangierte mit einem Zeitbedarf von ca. 5 Minuten zwischen den beiden Verfahren. Der Zeitbedarf erhöhte sich unter für den Pferdeinsatz erschwerten Arbeitsbedingungen des Bestandes II (Schlagabraum und Hang) für die Verfahren *EggeSaat* und *ÖkoSat/U* auf ca. 7 Minuten, beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* stieg er um ca. 4 auf 10 Minuten für die Saat von 100 m.

## 6.2.4 Kalkulation der Verfahrenskosten

### 6.2.4.1 Kosten der Pferdeeinsatzstunde

Die Kalkulation einer Pferdearbeitsstunde (PAS) kann sich an einem von GOTTLOB UND SCHERER (1994) aufgestellten Schema orientieren. Die dort berücksichtigten direkten Kosten sind sehr stark von der Betriebsstruktur des Unternehmers, den jährlich geleisteten Pferdeeinsatzstunden sowie den regionalen Preisdifferenzen z. B. für Futter abhängig. Eine aktuelle Kostenkalkulation nach diesem Schema ist exemplarisch ANHANG VI zu entnehmen.

Bei dem Kalkulationsschema werden die Ausgangsvoraussetzungen der tiergerechten Haltung des Pferdes durch Anmietung bzw. Pacht eines Stalls mit Lagermöglichkeit für Heu und Stroh sowie Weideland berücksichtigt. Es wird unterstellt, dass der Pferdeführer die tägliche Pflege, Fütterung und Stallarbeiten in Eigenregie durchführt. Zudem wird Futter und Einstreu ohne Eigenleistung zugekauft.

Die Pferde werden an einem Arbeitstag in der Regel sechs Zeitstunden eingesetzt, wobei zusätzlich eine Mittagspause inklusive Fütterung von durchschnittlich 0,7–1,0 Stunden zu berücksichtigen ist. Die Auslastung eines im Forst eingesetzten Pferdes wird mit durchschnittlich 1.200 Pferdeeinsatzstunden im Jahr unterstellt, dies entspricht durchschnittlich 100 Stunden im Monat. Hauptberufliche Pferdeführer streben heute eine Auslastung von mehr als 1.200 Pferdeeinsatzstunden pro Jahr an. Des Weiteren legen sie zunehmend Wert darauf, die Pferde kontinuierlich über das ganze Jahr im Wald einzusetzen, wenn auch vielfach die Hauptsaison für ein im Forst eingesetztes Pferd v. a. zur Holzernte im Zeitraum von Oktober bis etwa Mitte Mai liegt (SCHROLL, 2002).

Die auf die Sachkosten je Pferdeeinsatzstunde bezogene Kalkulation ist besonders starken Schwankungen unterworfen. Es bestehen hier erhebliche Preisdifferenzen, die sich aus der regionalen Lage und Struktur des Betriebes ergeben. Dies beginnt bei der Miete bzw. Pacht von Stall und Weideland, geht über die Versorgung mit Futter und endet nicht zuletzt bei der Anfertigung bzw. Reparatur des Kummets, was in Deutschland heutzutage nur noch wenige Sattler beherrschen. Bei der Kalkulation ergeben sich Sachkosten je Pferdearbeitsstunde in Höhe von 5,19 € (vgl. ANHANG VI).

Bei der täglichen Pflege des Pferdes müssen die Personalkosten des Pferdeführers berücksichtigt werden. GOTTLOB UND SCHERER (1994) haben im Rahmen einer Untersuchung zum Schleifrücken mit Pferden den Zeitbedarf für Pflege/Versorgung der eingesetzten Pferde ermittelt, den sie auf durchschnittlich 1,3 Stunden je Arbeitstag beziffern. Die Arbeitsauslastung beträgt bei einem Gespannarbeitstag von 6 Stunden und einer Auslastung von 1.200 PAS/Jahr 200 Tage im Jahr. Aus diesen Angaben errechnet sich ein Pflegestundenaufwand von 260 Stunden pro Jahr. Die Personalkosten für den Pferdeführer sollen sich in dieser Kalkulation an Stundensätzen für Forstwirte orientieren. Die hierfür veranschlagten Stundensätze variieren bei den jeweiligen Pferdeführern sehr stark, dies hängt mit der Entscheidung zusammen, ob ein freier Unternehmer, der sein gesamtes Existenzrisiko selbst zu tragen hat, diese Entlohnung für angemessen hält. Kalkulatorisch wird ein Stundensatz von 13,00 € zuzüglich 100 % Personalnebenkosten (PNK) angenommen. Dies entspricht 26,00 € je Pferdeeinsatzstunde als Personalkosten für den Pferdeführer. Auf dieser Basis ergeben sich in der Kalkulation Personalkosten für die Pferdepflege von ca. 5,63 €/PAS (vgl. ANHANG VI).

Aus den Sach- und Personalkosten einer Pferdeeinsatzstunde ergeben sich für das Pferd zu veranschlagende Kosten je Arbeitsstunde in Höhe von 10,82 €/PAS.

Hinzu kommen die Personalkosten des Pferdeführers für die Arbeit im engeren Sinn an der jeweiligen Arbeitsaufgabe. Diese orientieren sich an dem oben genannten Satz von 26,00 €/PAS inkl. 100 % PNK. Die Auslastungsquote fällt bei der gesonderten Berücksichtigung der Pferdepflege mit 0,9 hoch aus, so dass sich Personalkosten von insgesamt 28,89 €/PAS ergeben. Der Transport der Pferde und Betriebsmittel wird über eine separate Maschinenkostenkalkulation für das Zugfahrzeug (Gelände-PKW) berücksichtigt. Bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 40 km/MAS und Kosten in Höhe von 16,04 €/MAS für den Geländewagen ergibt sich eine Streckenbelastung von 0,40 €/km. Unterstellt man zudem eine durchschnittliche Fahrstrecke (An-, Abfahrt und ggf. Umsetzen) je Arbeitstag von 100 km, resultiert hieraus eine zusätzliche Belastung der Pferdearbeitsstunde von 6,66 € (vgl. ANHANG VI). Die Gesamtkosten für eine Pferdearbeitsstunde inklusive Personal- und Transportkosten belaufen sich somit auf 46,37 €/PAS.

#### 6.2.4.2 Kosten der Gerätearbeitsstunde

Eine genaue Kostenkalkulation der eingesetzten Betriebsmittel gestaltet sich schwierig. Die Gründe hierfür sind vor allem in der Aktualität der Angaben zu den Anschaffungspreisen der jeweiligen Arbeitsgeräte zu suchen. Während die Preise für den *Eberswalder Streifenpflug* und den *Weilmünster Waldgrubber* aktuell bei den Herstellern/Vertreibern zu erfragen sind, handelt es sich bei dem *Meinberg Wundstreifenpflug* und dem um eine Säeinheit erweiterten Betriebsmittel *EggeSaat* um Einzelanfertigungen, so dass hier die Anschaffungspreise Schätzwerte darstellen. Die *ÖkoSat/U* wurde durch die Firma *Arbor Seda Forst* vertrieben. Dieses Unternehmen hat sich jedoch vom Markt zurückgezogen, so dass von einem Angebotspreis aus dem Jahr 1998 ausgegangen werden musste.

Die Kostenkalkulation der einzelnen Aggregate orientiert sich an der Ingenieurformel, lediglich die Anschaffungspreise der Arbeitsgeräte wurden abweichend vom Schema ohne Mehrwertsteuer ausgewiesen, da der Pferdeinsatz in der Regel durch Unternehmer bestritten wird. Im Folgenden werden die Basisdaten, die bei der Kalkulation der Gerätekosten nach der Ingenieurformel berücksichtigt wurden, ohne Betriebs- und Schmiermittelkosten tabellarisch aufgeführt. Die daraus resultierenden Kosten einer Gerätearbeitsstunde (GAS)<sup>5</sup> sind ohne Personalkosten dargestellt. Die weiteren Angaben bezüglich der eingesetzten Aggregate beruhen auf Schätzungen und Erfahrungswerten aus durchgeführten Experteninterviews (vgl. Tabellen 25–30).

Der *Eberswalder Streifenpflug* für den Pferde- sowie Schlepperzug ist über die Firma Grube KG zu beziehen. Der Angebotspreis im Oktober 2002 betrug 1.982,76 € (o. MwSt.). Der *Eberswalder Streifenpflug* hat seinen Arbeitsschwerpunkt in der streifenweisen Pflanzplatzvorbereitung, der Förderung von Naturverjüngung sowie der Bodenvorbereitung für die Saat. Aus diesem Einsatzspektrum ergeben sich schätzungsweise 150 GAS im Jahr. Nach der Ingenieurformel (vgl. Tabelle 25) errechnen sich Kosten für die Gerätearbeitsstunde in Höhe von 3,19 € (ohne Personalkosten).

---

<sup>5</sup> Gerätearbeitsstunde (GAS): Betriebsstunde einschließlich der für kleiner Reparaturen und Wartungen von max. 15 Minuten Dauer aufzuwendenden Zeit, vergleichbar mit Maschinenarbeitszeit (in MAS), die bei Maschinen zur Anwendung kommt.

**Tabelle 25: Gerätearbeitsstundenkosten für den Eberswalder Streifenflug**

Betriebsmittel/Gerät	Eberswalder Streifenflug
Beschaffungspreis o. MwSt. (€)	1.982,76
Veralterungszeit (Jahre)	10
Normale Nutzungsdauer (GAS, gesamt)	3000
Geschätzte jährliche Einsatzdauer (GAS)	150
Reparaturkostenquote (echter Anteil)	0,4
Zinsfuß (%)	8
Restwert (€)	0
Sonstiges (€jährlich)	400
Kosten in € je Gerätearbeitsstunde	
Abschreibung	0,99
Reparaturen	0,18
Zinsen (kalkulatorisch)	0,03
Sonstiges	2,00
<b>Kosten €/GAS</b>	<b><u>3,19</u></b>

Der Anschaffungspreis für den *Meinberg Wundstreifenflug* wurde mit 2.556,45 € (o. MwSt.) angesetzt. Das Einsatzgebiet dieses Wundstreifenfluges liegt wiederum in der streifenweisen Pflanzplatzvorbereitung, der Förderung von Naturverjüngung, der Bodenvorbereitung für die Voraussaat und bietet sich zudem in Kombination mit einem Antriebsaggregat (siehe *EggeSaaf*) auch für die Rillensaat an. Aufgrund des erweiterten Einsatzbereiches wurde eine durchschnittliche jährliche Einsatzdauer von 200 GAS unterstellt. Nach dem Kalkulationsschema (Tabelle 26) errechnen sich Gerätearbeitsstundenkosten in Höhe von 3,54 € (ohne Personalkosten).

**Tabelle 26: Gerätearbeitsstundenkosten für den Meinberg Wundstreifenflug**

Betriebsmittel/Gerät	Meinberg Wundstreifenflug
Beschaffungspreis o. MwSt. (€)	2.556,45
Veralterungszeit (Jahre)	10
Normale Nutzungsdauer (GAS, gesamt)	3000
Geschätzte jährliche Einsatzdauer (GAS)	200
Reparaturkostenquote (echter Anteil)	0,4
Zinsfuß (%)	8
Restwert (€)	0
Sonstiges (€jährlich)	400
Kosten in € je Gerätearbeitsstunde	
Abschreibung	1,28
Reparaturen	0,23
Zinsen (kalkulatorisch)	0,03
Sonstiges	2,00
<b>Kosten €/GAS</b>	<b>3,54</b>

Für das an den *Meinberg Wundstreifenflug* anzubauende Saataggregat *EggeSaaf* wurde ein Preis von 900,00 € unterstellt, so dass für das kombinierte Gerät insgesamt ein Anschaffungspreis von 3.456,45 € (o. MwSt.) anzunehmen ist. Einsatzschwerpunkt dieses Saataggregates

ist die Rillensaat zum Voranbau von Buche oder anderen Laubbaumarten unter Nadelholzreinbeständen. Durch die Kombination mit dem *Meinberg Wundstreifenpflug* steht dieser auch separat zur Verfügung. Aus diesem Grund wird eine jährliche Nutzungsdauer von 200 Gerätearbeitsstunden unterstellt. In Anlehnung an die Ingenieurformel (Tabelle 27) errechnen sich Kosten für die Gerätearbeitsstunde von 4,08 € (ohne Personalkosten).

**Tabelle 27: Gerätearbeitsstundenkosten für das Saataggregat *EggeSaat***

Betriebsmittel/Gerät	<i>EggeSaat</i>
Beschaffungspreis o. MwSt. (€)	3.456,45
Veralterungszeit (Jahre)	10
Normale Nutzungsdauer (GAS, gesamt)	3000
Geschätzte jährliche Einsatzdauer (GAS)	200
Reparaturkostenquote (echter Anteil)	0,4
Zinsfuß (%)	8
Restwert (€)	0
Sonstiges (€jährlich)	400
Kosten in € je Gerätearbeitsstunde	
Abschreibung	1,73
Reparaturen	0,31
Zinsen (kalkulatorisch)	0,05
Sonstiges	2,00
<b>Kosten €/GAS</b>	<b>4,08</b>

Für das Saataggregat *ÖkoSat/U* wurde ein Angebotspreis aus dem Jahre 1998 in Höhe von umgerechnet 9.949,74 € (o. MwSt.) unterstellt. Dieses Betriebsmittel ist für die Rillensaat zum Voranbau von Buche oder anderen Laubbaumarten unter Nadelholzreinbeständen geeignet. Aus dem engen Einsatzspektrum (Rillensaat) ergibt sich eine durchschnittliche jährliche Einsatzdauer von 150 GAS. Nach dem Kalkulationsschema (Tabelle 28) betragen die Kosten für die Gerätearbeitsstunde 10,10 € (ohne Personalkosten).

**Tabelle 28: Gerätearbeitsstundenkosten für das Saataggregat *ÖkoSat/U***

Betriebsmittel/Gerät	<i>ÖkoSat/U</i>
Beschaffungspreis o. MwSt. (€)	9.949,74
Veralterungszeit (Jahre)	10
Normale Nutzungsdauer (GAS, gesamt)	3000
Geschätzte jährliche Einsatzdauer (GAS)	150
Reparaturkostenquote (echter Anteil)	0,4
Zinsfuß (%)	8
Restwert (€)	0
Sonstiges (€jährlich)	400
Kosten in € je Gerätearbeitsstunde	
Abschreibung	6,63
Reparaturen	0,66
Zinsen (kalkulatorisch)	0,13
Sonstiges	2,67
<b>Kosten €/GAS</b>	<b>10,10</b>

Der *Weilmünster Waldgrubber* mit aufgebautem Saataggregat hat einen Anschaffungspreis von insgesamt 6.974,20 € (o. MwSt.). Dieses Betriebsmittel ist mit der aufgebauten Säeinheit für die zweireihige Rillensaat zum Voranbau von Buche unter Nadelholzreinbeständen vorgesehen. Des Weiteren kann der Waldgrubber mit fünf Federzinken auch zur Bodenvorbereitung (Grubbern) eingesetzt werden, um z. B. die Naturverjüngung von Buche einzuleiten. Aus diesem erweiterten Einsatzspektrum resultiert eine unterstellte jährliche Einsatzdauer von geschätzten 200 GAS. Nach dem in Tabelle 29 dargestellten Kalkulationsschema können die Kosten je Gerätearbeitsstunde mit 6,20 € (ohne Personalkosten) veranschlagt werden.

**Tabelle 29: Gerätearbeitsstundenkosten für das Saataggregat *Weilmünster Waldgrubber***

Betriebsmittel/Gerät	<i>Weilmünster Waldgrubber</i>
Beschaffungspreis o. MwSt. (€)	6.974,20
Veralterungszeit (Jahre)	10
Normale Nutzungsdauer (GAS, gesamt)	3000
Geschätzte jährliche Einsatzdauer (GAS)	200
Reparaturkostenquote (echter Anteil)	0,4
Zinsfuß (%)	8
Restwert (€)	0
Sonstiges (€/jährlich)	400
Kosten in € je Gerätearbeitsstunde	
Abschreibung	3,49
Reparaturen	0,62
Zinsen (kalkulatorisch)	0,09
Sonstiges	2,00
<b>Kosten -&gt; €/GAS</b>	<b>6,20</b>

### 6.2.4.3 Kosten der plätzeweisen Handsaat

Nach der streifenweisen Bodenverwundung mit den Arbeitsverfahren *Eberswalder Streifenpflug* und *Meinberg Wundstreifenpflug* wurden die freigelegten Streifen von Hand besät. Diese Handsaat wurde in der Versuchsreihe von erfahrenen Forstwirten der Forstämter Bad Driburg und Paderborn durchgeführt, hierbei kam das in Kapitel 4.2.3 geschilderte Verfahren zum Einsatz.

Bei einem vorgegebenen Abstand der Saatplätze von 2 m ergaben sich bei einer Strecke von 100 m durchschnittlich 50 zu besäende Plätze, auf denen jeweils 25 g Bucheckern ausgebracht wurden. Die Zeitaufnahmen der Forstwirte für die Plätzeaat ergaben im Mittel 35 Minuten für einen 100 m langen Streifen. Diese Ergebnisse decken sich mit den von LEDER et al. (2000) vorgestellten Produktivitäten (100 Plätze je Arbeitsstunde) für die Handsaat nach der Bodenverwundung mit dem *Meinberg Wundstreifenpflug*.

Für die beiden hier untersuchten Bodenverwundungsaggregate ergaben sich bei den unterstellten Personalkosten von 26,00 € je Forstwirt und Arbeitsstunde (inkl. 100 % PNK) zusätzliche Kosten für die Saat in Höhe von ca. 13,00 € je 100 m (bzw. für 50 Saatplätze).

### 6.2.4.4 Preis für Rotbuchen-Saatgut

Die angestrebte Ausbringungsmenge je Teilfläche von 0,1 ha betrug 5 kg Bucheckern (vgl. Kapitel 3.3). Das Saatgut der Versuchsreihen wurde von der Forstbaumschule August Lüdemann im Jahr 2001 bezogen, die Kosten hierfür beliefen sich durch einen eingeräumten Vorzugspreis auf 38,00 DM/kg (19,43 €/kg). Der Preis für vergleichbares zur Aussaat vorbehandeltes Buchen-Saatgut belief sich nach Auskunft der Saatgutberatungsstelle Oerrel (Niedersachsen) im Jahr 2001 auf durchschnittlich 30,00 €/kg. Bei den im Folgenden vorgestellten Kalkulationen wurde dieser Preis für das Saatgut unterstellt.

### 6.2.5 Gesamtkosten der Arbeitsverfahren

#### 6.2.5.1 Bodenverwundungsverfahren

Der *Eberswalder Streifenpflug* wird in dem untersuchten Arbeitsverfahren durch ein Pferdegespann gezogen, daher müssen die doppelten Kostensätze für die Pferdearbeitsstunde berücksichtigt werden. Es ergeben sich daraus Kosten für die Pferdeeinsatzstunde von 21,64 €. Mit Berücksichtigung der Personal- (28,89 €/PAS inkl. PNK) und Transportkosten in Höhe von 6,66 €/PAS errechnen sich Gesamtkosten für den Pferdeeinsatz von 57,19 €. Hinzu kommen die Kosten für die Nutzung des Betriebsmittels in Höhe von 3,19 €/GAS. Aus der Summe dieser drei Positionen ergibt sich ein Kostensatz des Verfahrens *Eberswalder Streifenpflug* von 60,38 €/je Arbeitsstunde.

Um die Systemkosten für das Arbeitsverfahren *Eberswalder Streifenpflug* auszuweisen, werden die in Kapitel 4.5.3 ermittelten Planzeiten herangezogen sowie die Kosten der Handsaat (vgl. Kap. 4.5.4.3) und des Saatguts (30,00 €/kg) berücksichtigt. Tabelle 30 gibt Auskunft über die Kosten des Verfahrens, aufgeschlüsselt nach den Bestandsvarianten.

Tabelle 30: Systemkosten für das Arbeitsverfahren *Eberswalder Streifenpflug*

Verfahren / Bestand	Eberswalder Streifenpflug	
	I	II
Planzeit Bodenverwundung [min/100 m]	4 min	7 min
Systemkosten je 100 m	4,26 €	7,04 €
Planzeit Handsaat [min/100 m]	35 min	35 min
Handsaatkosten bei 100 m	15,17 €	15,17 €
Saatgutkosten für 100 m (50 Plätze)	37,50 €	37,50 €
<b>Gesamtkosten für 100 m</b>	<b>56,93 €</b>	<b>59,71 €</b>
Mittlere lfd. M./TF	400 m	400 m
<b>Gesamtkosten/TF</b>	<b>227,72 €</b>	<b>238,84 €</b>
<b>Gesamtkosten/ha (= 3 TF)</b>	<b>683,16 €</b>	<b>716,52 €</b>

Neben den Kosten für die Bodenverwundung und Saat einer 100 m langen Strecke wird die Bearbeitung einer Teilfläche von 0,1 ha sowie einem Hektar (entspricht drei bearbeiteten Teilflächen und somit einem Mischungsanteil der Buche von 30 %) aufgeführt. Bei der Teilflä-

chenbearbeitung werden jeweils 400 Laufmeter unterstellt, dies entspricht der theoretischen Streifenlänge bei einem Abstand der Saatplätze von 2 m mit 25 g Bucheckern je Platz und einem auszubringenden Saatgut von 5 kg. Die Gesamtkosten der Bucheckern-Vorausfaat nach Bodenvorbereitung mit dem *Eberswalder Streifenpflug* betragen für eine Teilfläche 226,72 € unter für den Pferdeinsatz normalen Bestandsbedingungen (Bestand I). Die im Bestand II gegebenen Arbeitsbedingungen lassen die Systemkosten um ca. 12,00 €/TF ansteigen.

Der *Meinberg Wundstreifenpflug* wird in der Regel als Einspanner eingesetzt, so dass sich für die Pferdeinsatzstunde Gesamtkosten in Höhe von 46,37 € (inkl. Personalkosten) ergeben. Die Kosten für das Arbeitsgerät betragen 3,54 €/GAS. Es errechnen sich somit Kosten für die Bodenverwundung mit dem *Meinberg Wundstreifenpflug* von 49,91 € je Arbeitsstunde.

Die Systemkosten für die Saat nach diesem Arbeitsverfahren ergeben sich aus der Bewertung der Planzeiten mit den kalkulierten Geldwerten. Um eine Vergleichbarkeit mit dem kombinierten Rillensaat-Arbeitsverfahren darzustellen, wurden zudem die Kosten der Handsaat durch Forstwirte und des Saatguts berücksichtigt. Tabelle 31 weist die Kosten des Verfahrens gegliedert nach den Bestandsvarianten aus.

Die Planzeiten dieses Arbeitsverfahrens sind in beiden Beständen identisch, daraus folgen ebenfalls gleiche Kostensätze in Höhe von 223,96 € für die Bucheckern-Vorausfaat einer Teilfläche.

**Tabelle 31: Systemkosten für das Arbeitsverfahren *Meinberg Wundstreifenpflug***

Verfahren / Bestand	<i>Meinberg Wundstreifenpflug</i>	
	I	II
<i>Planzeit Bodenverwundung [min/100 m]</i>	4 min	4 min
Systemkosten je 100 m	3,33 €	3,33 €
<i>Planzeit Handsaat [min/100 m]</i>	35 min	35 min
Handsaatkosten bei 100 m	15,17 €	15,17 €
Saatgutkosten für 100 m (50 Plätze)	37,50 €	37,50 €
<b>Gesamtkosten für 100 m</b>	<b>55,99 €</b>	<b>55,99 €</b>
<i>Mittlere lfd. M./TF</i>	400 m	400 m
<b>Gesamtkosten/TF</b>	<b>223,96 €</b>	<b>223,96 €</b>
<b>Gesamtkosten/ha (= 3 TF)</b>	<b>671,88 €</b>	<b>671,88 €</b>

### 6.2.5.2 Saatverfahren

Das aus dem *Meinberg Wundstreifenpflug* und Anhängesaatgerät bestehende Aggregat *EggeSaat* ist für den einspannigen Pferdezug konzipiert. Dadurch fallen für die Pferdeinsatzstunde Kosten in Höhe von 46,37 € an. Hinzu kommen die Kosten für das Arbeitsgerät von 4,08 €/GAS. Es ergeben sich somit Gesamtkosten für das Verfahren *EggeSaat* von 50,45 € für eine Arbeitsstunde.

Um die Systemkosten für das Arbeitsverfahren *EggeSaat* aufzuzeigen, werden die in Kapitel 4.5.3 ermittelten Planzeiten herangezogen. Tabelle 32 zeigt die Kosten der kombinierten Rillensaat untergliedert nach den Bestandsvarianten. Der unterstellte Bearbeitungsgrad (lfd.

M./TF) orientiert sich an den erfassten Durchschnittswerten für alle Saataggregate (vgl. Kapitel 5.1.1). Dieser Wert kann je nach möglicher Einstellung der Säeinheit und dem damit variierten Abstand der Bucheckern in der Saatrille stark schwanken.

**Tabelle 32: Systemkosten für das Arbeitsverfahren *EggeSaat***

Verfahren / Bestand	<i>EggeSaat</i>	
	<i>I</i>	<i>II</i>
Planzeit Saat [min/100 m]	5 min	7 min
Systemkosten je 100 m	4,20 €	5,89 €
Saatgutkosten für 100 m	37,50 €	37,50 €
<b>Gesamtkosten für 100 m</b>	<b>41,70 €</b>	<b>43,39 €</b>
Mittlere lfd. M../TF	400 m	400 m
<b>Gesamtkosten/TF</b>	<b>166,80 €</b>	<b>173,56 €</b>
<b>Gesamtkosten/ha (= 3 TF)</b>	<b>500,40 €</b>	<b>520,68 €</b>

Die Systemkosten der Saat einer Teilfläche belaufen sich bei diesem kombinierten Rillensaatsverfahren auf 166,82 €, wohingegen unter den erschwerten Arbeitsbedingungen (Bestand II) die Kosten um ca. 4 % ansteigen, dies entspricht ca. 7,00 €

Das Saataggregat *ÖkoSat/U* wird im untersuchten Arbeitsverfahren im Gespann gefahren, so dass hier Kosten für zwei Pferde in Höhe von 21,64 € je Pferdeinsatzstunde veranschlagt werden müssen. Der Pferdeführer wurde mit 28,89 € (inkl. PNK) je Arbeitsstunde berücksichtigt und der Transport der Pferde mit 6,66 €/PAS. Hinzu kommen die Kosten für das Saataggregat von 10,10 €/GAS. Es ergeben sich somit Gesamtkosten für das Verfahren *ÖkoSat/U* von 67,29 € je Arbeitsstunde.

Die Systemkosten des Arbeitsverfahrens *ÖkoSat/U* werden aus den hergeleiteten Planzeiten und den Kostensätzen für den Einsatz des Betriebsmittels, der Pferde sowie des Pferdeführers berechnet. In Tabelle 33 sind die Verfahrenskosten nach Bestandsvarianten getrennt wiedergegeben. Die Buchensaats einer Teilfläche von 0,1 ha beläuft sich mit der *ÖkoSat/U* auf insgesamt 167,96 € unter den für den Pferdeinsatz normalen Bestandsbedingungen (Bestand I). Bei den erschwerten Arbeitsbedingungen sank die Produktivität, die Planzeiten lagen um 3 Minuten/TF höher, und in diesem Zusammenhang stiegen die Kosten um ca. 8 % (~ 13,46 €) auf 181,40 € an.

Tabelle 33: Systemkosten für das Arbeitsverfahren *ÖkoSat/U*

Verfahren / Bestand	ÖkoSat/U	
	I	II
Planzeit Saat [min/100 m]	4 min	7 min
Systemkosten je 100 m	4,49 €	7,85 €
Saatgutkosten für 100 m	37,50 €	37,50 €
<b>Gesamtkosten für 100 m</b>	<b>41,99 €</b>	<b>45,35 €</b>
Mittlere lfd. M./TF	400 m	400 m
<b>Gesamtkosten/TF</b>	<b>167,96 €</b>	<b>181,40 €</b>
<b>Gesamtkosten/ha (= 3 TF)</b>	<b>503,88 €</b>	<b>544,20 €</b>

Im Saatverfahren *Weilmünster Waldgrubber* wird ein Pferd eingesetzt, so dass sich Kosten für die Pferdeeinsatzstunde von 46,37 € ergeben. Hinzu kommen die Kosten für das Arbeitsgerät von 6,20 €/GAS. Aus der Summe der beiden Positionen folgen die Gesamtkosten des Verfahrens von 52,57 € je Arbeitsstunde.

Tabelle 34 gibt Auskunft über die Kosten des Verfahrens in Abhängigkeit von der Bestandsvariante. Die Systemkosten der Saat einer Teilfläche belaufen sich beim Saataggregat *Weilmünster Waldgrubber* auf insgesamt 171,04 € (Bestand I). Die Produktivitätseinbußen unter erschwerten Arbeitsbedingungen lassen die Systemkosten der Saat um nahezu 8 % (13,81 €) ansteigen. Bei diesem Verfahren muss man anmerken, dass es aufgrund der nicht zu variierenden Saatdosierung unmöglich war, die angestrebte Saatgutmenge auf der Fläche auszubringen. Zur Zielerreichung hätte man den ohnehin schon sehr hohen Bearbeitungsgrad (vgl. Kapitel 5.1.1.2) nochmals um den Faktor 2 (Bestand I) bzw. den Faktor 3 (Bestand II) erhöhen müssen. Bei den Systemkosten wurde jedoch aus Gründen der Vergleichbarkeit der Verfahren eine Ausbringung von 5 kg Bucheckern unterstellt.

Tabelle 34: Systemkosten für das Arbeitsverfahren *Weilmünster Waldgrubber*

Verfahren / Bestand	Weilmünster Waldgrubber	
	I	II
Planzeit Saat [min/100 m]	6 min	10 min
Systemkosten je 100 m	5,26 €	8,71 €
Saatgutkosten für 100 m	37,50 €	37,50 €
<b>Gesamtkosten für 100 m</b>	<b>42,76 €</b>	<b>46,21 €</b>
Mittlere lfd. M./TF	400 m	400 m
<b>Gesamtkosten/TF</b>	<b>171,04 €</b>	<b>184,84 €</b>
<b>Gesamtkosten/ha (= 3 TF)</b>	<b>513,12 €</b>	<b>554,52 €</b>

### 6.2.5.3 Alternativverfahren – Manuelle Plätzeaat

Das alternative-Saatverfahren zum vorgestellten pferdegestützten Bodenvorbereitungs- und Saatverfahren stellt bei einer Vermeidung der flächigen Befahrung durch selbstfahrende Maschinen die manuelle Plätzeaat mit der Wiedehopfhau oder Breithacke dar. Die Arbeitsproduktivitäten dieses Verfahrens wurden u. a. durch LEDER (2000) erhoben.

Bei diesem Verfahren wird die Bucheckern-Vorausfaat ebenfalls auf eine Teilfläche (Horst) mit der Flächengröße von 0,1 ha bezogen. In einem ersten Arbeitsschritt wird mit der Wiedehopfhau auf einer ca. 40 x 60 cm großen Fläche der Rohhumus abgezogen und so der Mineralboden freigelegt. Im daran anschließenden Arbeitsgang werden die Bucheckern auf diesem Platz ausgebracht und anschließend mit Mineralboden abgedeckt.

Als Arbeitsproduktivität zur Schaffung der Saatplätze gibt LEDER (2000) 25 bzw. 40 Plätze/h an. Für die im Folgenden aufgestellte Kalkulation wird eine Produktivität von 35 Plätzen je Arbeitsstunde unterstellt. Die Produktivität des zweiten Arbeitsganges der Ausbringung und Abdeckung des Saatgutes benennt LEDER (2000) mit 125 Plätzen/h. Für die Begründung einer Teilfläche bei vergleichbaren Anforderungen der hier untersuchten Verfahren wird ein Abstand von 2 m und eine ausgebrachte Saatgutmenge von 25 g/Platz unterstellt. Daraus ergeben sich je Teilfläche 200 zu besäende Plätze. Für diese Anzahl an Saatplätzen benötigt der Forstwirt demnach 5,7 h zum Freilegen des Mineralbodens. Zusätzlich fallen für das Ausbringen und Abdecken des Saatgutes 1,6 h/TF an. Insgesamt beträgt die Planzeit für die manuelle Plätzeaat einer Teilfläche 7,3 Stunden.

Als Personalkosten werden die bekannten Sätze für einen Forstwirt in Höhe von 13,00 € zuzüglich 100 % PNK unterstellt. Für die Bereitstellung sonstiger Werkzeuge außer Motorsägen wird bei Holzerntearbeiten u. a. in der Landesforstverwaltung NRW üblicherweise eine Entschädigung von 0,066 € je Arbeitsstunde gezahlt. Dieser Betrag scheint auch für die Abgeltung der Wiedehopfhau zur Freilegung des Mineralbodens geeignet. Die Kosten für das gereinigte Buchensaatgut werden wiederum mit 30,00 € je Kilogramm unterstellt. Bei einer Ausbringungsmenge von 5 kg/Teilfläche ergeben sich so Kosten von 150,00 € je Teilfläche. In Tabelle 35 sind die veranschlagten Planzeiten sowie Kostensätze für die manuelle Plätzeaat dargestellt.

**Tabelle 35: Systemkosten für die manuelle Plätzeaat (Wiedehopfhau)**

Verfahren	Manuelle Plätzeaat
Planzeit Freilegung Mineralboden [min/TF]	342 min
Planzeit Ausbringung und Abdeckung des Saatgutes [min/TF]	96 min
Personalkosten (inkl. 100 % PNK)	26,00 €
Kosten der Wiedehopfhau/GAS	0,066 €
<b>Systemkosten je Teilfläche (0,1 ha)</b>	<b>190,28 €</b>
Saatgutkosten (bei 30,00 €/kg und 5 kg/TF)	150,00 €
<b>Gesamtkosten/TF</b>	<b>340,28 €</b>
<b>Gesamtkosten/ha (= 3 TF)</b>	<b>1.020,84 €</b>

Nach Tabelle 35 ergeben sich für die Bucheckern-Vorausfaat einer Teilfläche durch die manuelle Plätzeaat Systemkosten in Höhe von 340,28 €.

### 6.2.5.4 Vergleich der Systemkosten

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Systemkosten der Bucheckern-Vorausfaat für die einzelnen pferdegestützten Arbeitsverfahren aufgeschlüsselt dargestellt. In Abbildung 16 sind die Ergebnisse der Gesamtkostenrechnung für die Begründung einer Teilfläche (0,1 ha) in einem Balkendiagramm gegenübergestellt. Aus den Saatgutkosten resultiert bei 5 kg/0,1 ha ein fixer Kostenanteil für jedes Verfahren in Höhe von 150,00 € je Teilfläche. Bei den Bodenverwendungsverfahren werden zudem Kosten für die Handsaat durch einen Forstwirt in Höhe von 60,68 €/TF veranschlagt.

Betrachtet man die Bodenverwendungsverfahren, so fällt zunächst der bereits erwähnte ausbleibende Bestandsunterschied beim Verfahren *Meinberg Wundstreifenflug* auf. Dieser beruht auf den identischen Produktivitäten in beiden Versuchsbeständen. Beim Verfahren *Eberswalder Streifenflug* liegen die Kosten im Vergleich zum *Meinberg Wundstreifenflug* im Bestand I um fast 3,00 € und in den Versuchsflächen der zweiten Bestandsvariante sogar um ca. 15,00 € höher. Die Planzeiten für die beiden Streifenflüge sind unter einfacheren Verhältnissen (Bestand I) identisch. Hier gründet der Verfahrensunterschied allein darin, dass beim *Eberswalder Streifenflug* durch den Einsatz eines Pferdegespanns die Arbeitsstunde um 9,82 € teurer ist.

Die Kosten der kombinierten Rillensaatverfahren fallen im Vergleich zu den Bodenverwendungsverfahren geringer aus. Das liegt vor allem an den nicht zu berücksichtigenden Kosten für die Handsaat. Über alle Verfahren liegen die kalkulierten Kosten für die Bucheckern-Vorausfaat bei einfachen Bestandsbedingungen (Bestand I) unter denen der erschwerten Verhältnisse in der zweiten Bestandsvariante.

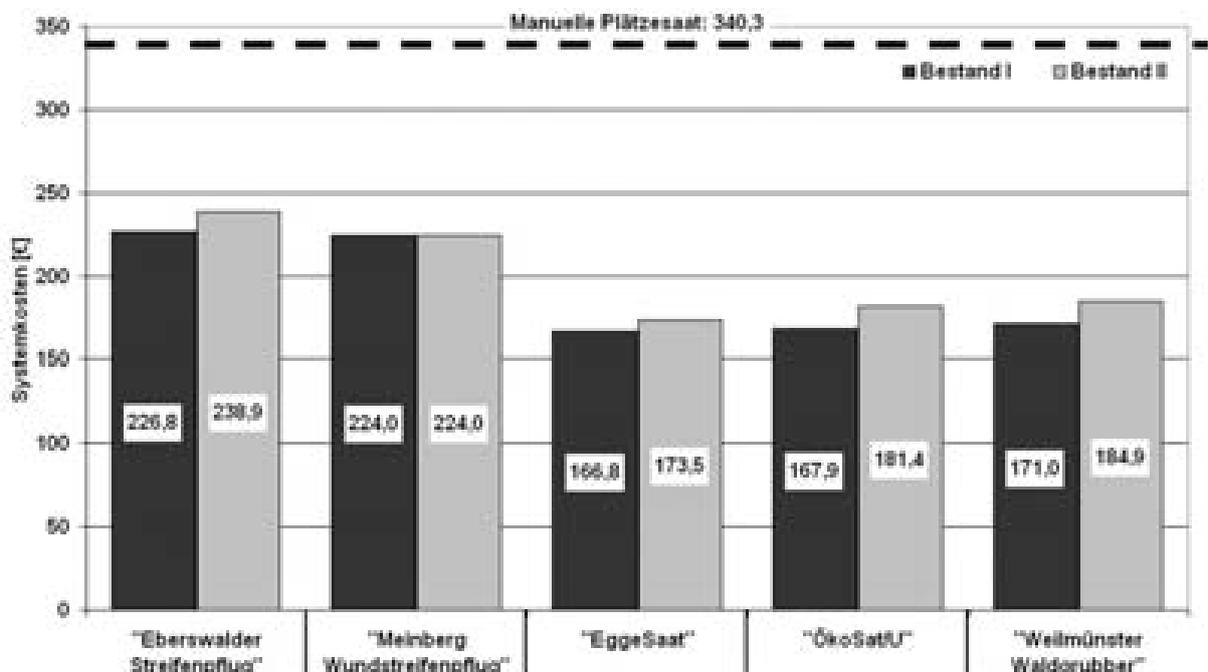


Abbildung 16: Verfahrenskosten je Teilfläche (0,1 ha) für die Bucheckern-Vorausfaat mit den untersuchten Arbeitsverfahren in beiden Bestandsvarianten sowie für ein alternativ kalkuliertes Handsaatverfahren (gestrichelte Linie)

Ein Vergleich der Verfahren *EggeSaat* und *ÖkoSat/U* ergibt, dass bei vergleichbaren Produktivitäten die Kosten der Saat mit dem Saataggregat *ÖkoSat/U* um ca. 5 % höher ausfallen. Die gegenüber dem Verfahren *EggeSaat* anfallenden Mehrkosten der Arbeitsstunde von 33 % beim Verfahren *ÖkoSat/U* resultieren zum einen aus den 2,5fach höheren Kosten der Gerätearbeitsstunde und zum anderen aus dem Einsatz eines Pferdegespanns, welches die Kosten der Einsatzstunde um nahezu ein Viertel verteuert. Durch die geringen Produktivitäten des Verfahrens *Weilmünster Waldgrubber*, bei dem im Vergleich zu den anderen Saatverfahren ein um 50 % höherer Zeitbedarf unter einfachen Bestandsverhältnissen anfällt, verteuert sich die Buchensaat hier deutlich. Dieses Einspanner-Verfahren verursacht gegenüber dem Verfahren *EggeSaat* 4 % höhere Kosten je Arbeitsstunde, die allein aus den um 2,18 € höheren Geräteeinsatzkosten resultieren.

Bei einem Vergleich der pferdegestützten Arbeitsverfahren mit der manuellen Verfahrensalternative der Plätzeaat zeigt sich anhand der Abbildung 16, dass die kalkulierten Verfahrenskosten der Handsaat in Höhe von 340,28 € die der teilmechanisierten Bodenvorbereitung mit anschließender Saat um durchschnittlich 50 % übersteigen. Die Freilegung des Mineralbodens mit der Wiedehopfhau verursacht Kosten in Höhe von 148,58 € (vgl. Tabelle 35). Dem gegenüber entstehen bei der teilmechanisierten pferdegestützten Bodenverwundung durch eine höhere Arbeitsproduktivität nur ca. 12 % der Kosten für das Abziehen der Humus-Auflage.

## 6.3 Qualität der Arbeitsausführungen

### 6.3.1 Bearbeitung der Saatstreifen

#### 6.3.1.1 Datenbasis

Als Bezugsgröße für den erfassten Zeitverbrauch der untersuchten Arbeitsverfahren wurde die auf den Teilflächen zurückgelegte Strecke herangezogen (vgl. Kapitel 6.1.2). Eine darüber hinaus gehende Bewertung der Bearbeitungsqualität dieser Arbeitsstreifen erfolgte über die Unterscheidung der erfassten laufenden Meter (lfd. M.) je Teilfläche in bearbeitete und nicht ausreichend bearbeitete Strecken. Die Messwerte dieser Aufnahmen wurden mit Daten der Flächenausprägung getrennt nach Arbeitsverfahren, Bestandsvariante und Teilfläche aufbereitet. Da sich ein Vergleich der jeweiligen Strecken auf die praxisnahe Bearbeitungsvariante beschränken muss, standen insgesamt vier Wiederholungen je Verfahren und Bestandsvariante für eine statistische Auswertung zur Verfügung. Dieser geringe Datenumfang gestattet lediglich die deskriptiv statistische Darstellung der Messwerte.

Die Erhebung weiterer qualitativer Merkmale der Arbeitsausführung geschah über eine Stichprobenerhebung nach der Bearbeitung mit den untersuchten Betriebsmitteln. Hierbei wurden die Breite und Tiefe des Verwundungsstreifens bzw. der Saatrille sowie die ausreichende Freilegung des Mineralbodens erfasst. Bei den Saatverfahren wurde darüber hinaus der Abstand und die Abdeckung der Bucheckern in der Rille registriert. Die Daten dieser Aufnahme wurden je Teilfläche in ASCII-Tabellen separat gehalten und wiederum mit Informationen zur Flächenausprägung in SPSS zu einem über alle Arbeitsverfahren, Bestandsvarianten und Teilflächen gemeinsamen Datensatz aggregiert. Das Vorliegen einer Normalverteilung dieser Messwerte in den untersuchten Stichproben bestätigte der Kolmogoroff-Smirnoff-Einstichprobentest. Auf der Basis des Signifikanzniveaus ( $\alpha = 0,05$ ) erfolgte die Überprüfung der Mittelwertdifferenzen mit dem t-Test bzw. bei multiplen Vergleichen mit dem Tukey-Test.

### 6.3.1.2 Bodenverwundungsverfahren

Die Bearbeitung der Teilflächen mit den Bodenverwundungs-Aggregaten fand in der praxisnahen Bearbeitungsvariante durch nach innen gerichtete Spiralen statt. Innerhalb dieses Arbeitsablaufes orientierte sich der Pferdeführer an den verwundeten Streifen und versuchte, einen für die anschließende Handsaat definierten Bearbeitungsgrad gemäß des Arbeitsauftrags zu erreichen.

Tabelle 36 gibt die Ergebnisse der erfassten Bearbeitungsstrecken je Teilfläche wieder, weitere deskriptive Statistiken der ausgewiesenen Parameter können dem ANHANG VII entnommen werden. Im Bestand I wurden mit dem *Eberswalder Streifenflug* ca. 47 m mehr je Teilfläche zurückgelegt als mit dem *Meinberg Wundstreifenflug* (321,0 m). Die Summe der unbearbeiteten Teilstrecken lag bei der Scharpflugvariante *Eberswalder Streifenflug* mit 75,8 m um nahezu diese Differenz höher. Die Ursache für das Auftreten dieser nicht bodenverwundeten Streifen weist die Tabelle VII\_2 (ANHANG VII) aus. Hier zeigt sich, dass beim Verfahren *Eberswalder Streifenflug* 42 % und beim *Meinberg Wundstreifenflug* 39 % der Beobachtungen auf die Überführung von Hiebsresten zurückzuführen waren. Darüber hinaus traten nach Kontakten mit Stöcken und arbeitsablaufbedingten Ereignissen („Sonstige“) unbearbeitete Teilstrecken auf. Es ergab sich für die Arbeitsverfahren der Bodenverwundung im Bestand I eine durchschnittliche Bearbeitungsstrecke von ca. 293 m je Teilfläche. Gemäß der dargelegten spirali- gen Linienführung innerhalb dieser Bearbeitungsvariante kam es zu Überquerungen bereits bearbeiteter Verwundungsstreifen. In der ersten Bestandsvariante deckte sich bei beiden Arbeitsverfahren annähernd der Anteil der Doppelbefahrungen, wobei die mittlere Streckensumme je Teilfläche beim *Eberswalder Streifenflug* mit 10,3 m um 0,6 m höher lag als beim *Meinberg Wundstreifenflug*.

**Tabelle 36: Mittelwerte der erfassten Streckenlängen je Teilfläche im Rahmen der Bearbeitung mit den Bodenverwundungsverfahren in beiden Bestandsvarianten**

Verfahren / Bestand		Befahrene Strecke/TF [m]	Unbearbeitete Strecke/TF [m]	Bearbeitete Strecke/TF [m]	Doppelt bearbeitete Strecke/TF [m]
<i>Eberswalder Streifenflug</i>	I	368,4	75,8	292,6	10,3
	II	352,9	101,6	251,3	8,9
<i>Meinberg Wundstreifenflug</i>	I	321,0	27,7	293,3	9,7
	II	349,6	116,9	232,7	14,7

Betrachtet man die Ergebnisse der Streckenvergleiche in der zweiten Bestandsvariante, so zeigt sich, dass der arithmetische Mittelwert für die zurückgelegte Strecke je Teilfläche im Verfahren *Eberswalder Streifenflug* um knapp 16 m geringer ausfiel. Hingegen wurde im Verfahren *Meinberg Wundstreifenflug* eine im Mittel nahezu um 30 m längere befahrene Strecke ausgewiesen. Die mit dem *Eberswalder Streifenflug* unbearbeiteten Teilstrecken beliefen sich in Summe auf durchschnittlich 101,6 m, was einer Zunahme von 34 % gegenüber der ersten Bestandsvariante entspricht. Beim *Meinberg Wundstreifenflug* vervierfachten sie sich auf 116,9 m. Die Ursachen für die unbearbeiteten Teilstrecken liegen maßgeblich am höheren Anteil an Hiebsresten in der zweiten Bestandsvariante, dies zeigen die im ANHANG VII tabellarisch abgetragenen Häufigkeiten der klassierten Ursachen. Anhand Tabelle VII\_1 wird ersichtlich, dass die Anzahl der nicht freigelegten Streifen in beiden Verfahren deutlich zunahm. Häufigste Ursache war wiederum das Überfahren von Schlagabraum (*Eberswalder Streifenflug*: ca. 37 %, *Meinberg Wundstreifenflug*: 57 % der Beobachtungen), gefolgt von „sonstigen“ Ur-

sachen sowie den Kontakten mit Stöcken. In der zweiten Bestandsvariante ergaben sich folglich für die Bodenverwundungsverfahren kürzere Bearbeitungstreifen je Teilfläche gegenüber dem ersten Bestand. Beim Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* wurde eine mittlere Länge von 251,3 m/0,1 ha (-14 %) erfasst und beim Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* betrug der Mittelwert 232,7 m/0,1 ha (-21 %). Die Summe der Doppelbearbeitungen beim Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* betrug wie im Bestand I 3,5 % der Länge des bearbeiteten Streifens. Beim *Meinberg Wundstreifenpflug* belief sich dieser Anteil auf 6,2 %.

Tabelle 37 gibt Auskunft über die aus den Stichprobenerhebungen errechneten Mittelwerte der Kriterien Arbeitsbreite und -tiefe der Bodenverwundung. Weiterführende deskriptive Statistiken sind dem ANHANG VII zu entnehmen. Bei Betrachtung der Arbeitsbreiten offenbart sich, dass die Konstruktion des Scharpfluges beim *Eberswalder Streifenpflug* unter „einfacheren“ Bestandsbedingungen einen durchschnittlich 5 cm breiteren Verwundungstreifen produzierte als der *Meinberg Wundstreifenpflug* mit einer mittleren Breite von 44,2 cm. Im Bestand II nahm die Verwundungsbreite beim *Eberswalder Streifenpflug* um ca. 9 cm auf 40,1 cm ab. Dagegen wurde beim *Meinberg Wundstreifenpflug* mit einem Mittelwert von 46,3 cm eine Zunahme dieses Kriteriums von ca. 2 cm erfasst. Die geschilderten Mittelwertdifferenzen weist der t-Test als signifikant aus.

**Tabelle 37: Mittelwerte der Arbeitsbreite und -tiefe bei den Bodenverwundungsverfahren sowie der relative Anteil der Stichprobenpunkte mit Mineralbodenkontakt**

Verfahren / Bestand		Arbeitsbreite [cm]	MW-Diff <sup>1)</sup> [cm]	Arbeitstiefe [cm]	MW-Diff <sup>1)</sup> [cm]	Mineralbodenkontakt [%]
<b>Eberswalder Streifenpflug</b>	<i>I</i>	49,2 a	9,1*	12,9 a	-1,3*	79,4
	<i>II</i>	40,1 A		11,6 A		65,0
<b>Meinberg Wundstreifenpflug</b>	<i>I</i>	44,2 b	-2,1*	5,2 b	3,3*	39,6
	<i>II</i>	46,3 B		8,5 B		52,5

SP = 160  
<sup>1)</sup> Differenz der Mittelwerte (MW) zwischen den Versuchsbeständen I und II; \* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$   
 Verschiedene Buchstaben weisen auf signifikante ( $\alpha = 0,05$ ) Mittelwertdifferenzen hin (t-Test). Kleinbuchstaben beziehen sich auf den Vergleich der Mittelwerte eines Arbeitsverfahrens innerhalb des Bestandes I und Großbuchstaben auf analoge Vergleiche innerhalb des Bestandes II

Die Tiefenwirkung der Pflüge unterschied sich konstruktiv bedingt ebenfalls deutlich. So konnte mit dem *Eberswalder Streifenpflug* unter einfachen Bestandsbedingungen im Mittel eine Bearbeitungstiefe von 12,9 cm erreicht werden, während mit dem *Meinberg Wundstreifenpflug* mit einem Mittelwert von 5,21 cm eine um 60 % geringere Tiefe registriert wurde. Im zweiten Versuchsbestand verringerte sich die Tiefenwirkung beim *Eberswalder Streifenpflug* signifikant um durchschnittlich 1,3 cm, hingegen erfolgte bei der Verwundung mit dem *Meinberg Wundstreifenpflug* eine um 3,3 cm tiefere Bearbeitung, diese Differenz wies der t-Test ebenfalls als gesichert aus.

Die Angaben zur Breite und vor allem der Tiefe des Verwundungstreifens sind an die Voraussetzung des bereitzustellenden Mineralbodenkontaktes gekoppelt. Im ersten Versuchsbestand betrug die Mächtigkeit des Auflagehumus im Mittel 7,7 cm (vgl. Kapitel 3.2.2), vergleicht man diesen Wert mit den erfassten Arbeitstiefen, so wird deutlich, dass mit dem *Eberswalder Streifenpflug* in nahezu 80 % der Beobachtungen eine Freilegung des Mineralbodens erfasst werden konnte, während dies mit dem *Meinberg Wundstreifenpflug* lediglich in 40 % der Fälle registriert wurde. Im Versuchsbestand II fiel die Mächtigkeit der humosen Auflage mit durchschnittlich 8,7 cm höher aus als im ersten Bestand. Bei der Scharpflugvariante betrug hier die

Häufigkeit, in dem der Mineralboden ausreichend freigelegt wurde, 65 % (Abnahme um 14 %), während bei der Scheibenpflugvariante 53 % der Beobachtungen im Verwundungstreifen den ausreichenden Mineralbodenkontakt auswiesen, dies entsprach einer Zunahme von 13 % gegenüber der ersten Bestandsvariante.

### 6.3.1.3 Saatverfahren

Die mit den Saataggregaten zurückgelegten durchschnittlichen Strecken je Teilfläche sind Tabelle 38 zu entnehmen. Weitere Informationen der deskriptiven Statistiken sind im ANHANG VII dargestellt. Im Bestand I betrug der Mittelwert für die zurückgelegte Strecke mit dem Aggregat *EggeSaat* 391,9 m, mit dem Betriebsmittel *ÖkoSat/U* legte das Gespann ca. 15 m weniger innerhalb der Teilfläche zurück. Mit Abstand die längste befahrene Strecke wurde mit dem *Weilmünster Waldgrubber* bei einem Mittelwert von 494,2 m je Teilfläche erfasst, jedoch konnten durchschnittlich hier nur 2,3 kg Bucheckern ausgebracht werden. Unter den einfacheren Bestandsbedingungen ergab sich eine durchschnittliche Summe an unbearbeiteten Teilstrecken beim Verfahren *EggeSaat* von 11 % an der Gesamtstrecke, während dieser Anteil beim Verfahren *ÖkoSat/U* 6 % und beim Saatverfahren *Weilmünster Waldgrubber* 15 % betrug. Als Hauptursachen wurden für alle Verfahren Überfahrungen von Hiebsresten und Stöcken erfasst, eine nähere Aufschlüsselung ist im ANHANG VII tabellarisch aufgeführt. Beim Überfahren der geschilderten Hindernisse wird der kontinuierliche Bodenkontakt der Bearbeitungseinheit unterbrochen, allerdings fällt weiterhin das Saatgut aus dem Auswurf, da die Saatdosierung bei allen Betriebsmitteln über einen Kettenantrieb erfolgt, der über eine Verbindung mit einem frei rollenden Rad bzw. der Achse geführt wird. Die geschilderten Unterbrechungen des Arbeitsablaufes waren folglich für Schwankungen in der angestrebten gleichmäßigen Verteilung des Saatgutes verantwortlich, die in den anschließenden Betrachtungen näher dargestellt werden. Berücksichtigt man die geschilderte Tatsache, so stellt im engeren Sinn die „besäte und geschlossene Rille“ die angestrebte Zielgröße der Arbeitsaufgabe dar. Für das Saatverfahren *Weilmünster Waldgrubber* ergab sich hier die intensivste Bearbeitungsstrecke mit einem Mittelwert von 418,9 m, beim Verfahren *ÖkoSat/U* belief sich diese auf im Mittel 351,8 m und beim Verfahren *EggeSaat* waren es 348,8 m. Eine Betrachtung der mittleren Summe von doppelt bearbeiteten Strecken je Teilfläche zeigt, dass mit dem Verfahren *EggeSaat* ca. 4,6 % der Saat in identischen Rillen stattfanden, während sich dieser Anteil beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* auf 3,9 % und beim Verfahren *ÖkoSat/U* auf 2,8 % belief.

Tabelle 38: Mittelwerte der erfassten Streckenlängen je Teilfläche im Rahmen der Bearbeitung mit den Saatverfahren

Verfahren / Bestand		Befahrene Strecke/TF [m]	Unbearbeitete Strecke/TF [m]	Bearbeitete Strecke/TF [m]	Doppelt bearbeitete Strecke/TF [m]
<i>EggeSaat</i>	I	391,9	43,1	348,8	16,4
	II	455,1	86,2	369,0	26,7
<i>ÖkoSat/U</i>	I	376,1	24,2	351,8	9,8
	II	385,5	58,4	327,1	7,3
<i>Weilmünster Waldgrubber</i>	I	494,2	75,4	418,9	16,2
	II	412,1	102,3	309,8	13,8

Betrachtet man die Ergebnisse dieser Streckenausweisung in der zweiten Bestandsvariante (vgl. Tabelle 38), so ergibt sich, dass gegenüber den einfacheren Bestandsbedingungen beim Saatverfahren *EggeSaat* die durchschnittlich zurückgelegte Strecke je Teilfläche um ca. 63 m und beim Saatverfahren *ÖkoSat/U* um nahezu 9 m länger war. Demgegenüber wurden mit dem Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* auf Teilflächen dieser Bestandsvariante ca. 82 m weniger zurückgelegt. Demzufolge konnte mit diesem Aggregat eine geringere Saatgutmenge (1,7 kg/0,1 ha) ausgebracht werden als im Bestand I.

Über alle Verfahren nahm die Summe der unbearbeiteten Teilstrecken unter den Bestandsbedingungen der zweiten Variante zu. Mit Ausnahme des Verfahrens *EggeSaat* (+6 % gegenüber Bestand I) wirkte sich dies mindernd auf die Bearbeitungsstrecke aus. Für das Verfahren *ÖkoSat/U* konnte eine Bearbeitungsstrecke von 327,1 m (-7 %) und beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* von 309,8 m (-26 %) erfasst werden. Der Grund für diese Einbußen der Arbeitsqualität lag wiederum am erhöhten Anteil an Hiebsresten in der zweiten Bestandsvariante. Dies zeigt sich an der Zunahme der Summe der unbearbeiteten Strecken und der Häufigkeit dieses Ereignisses in der zweiten Bestandsvariante. In Kombination mit den im ANHANG VII dargestellten Ursachen der unbearbeiteten Teilstrecken zeigt sich, dass vor allem Schlagabraum und Stöcke diese Ereignisse verursachten. Beim Saatverfahren *Weilmünster Waldgrubber* war zudem der Anteil der „sonstigen“ Ursachen von großer Bedeutung. Dabei handelte es sich in erster Linie um flach anstehende Wurzeln, welche die Federzinken bei der Bearbeitung behinderten. Der Anteil der doppelten Bearbeitung bereits besäter Streifen fiel im Verfahren *EggeSaat* mit 7,3 % am höchsten aus. Im Verfahren *ÖkoSat/U* betrug dieser Streckenanteil im Mittel 2,3 % und im Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* 4,4 %.

Tabelle 39 gibt Auskunft über die mittlere Arbeitsbreite, Arbeitstiefe und den erzielten Mineralbodenkontakt für die untersuchten Verfahrens- und Bestandsvarianten. Die Breite dieser Verfahren ergibt sich aus der verwundeten Saatrille, in die die Bucheckern während des Arbeitsvorgangs abgelegt werden. Dieses Kriterium wurde vor allem von der technischen Konzeption der Bodenverwundungseinheit (z. B. Pflug, Federzinken) sowie den Hindernissen auf den Teilflächen beeinflusst.

Im Bestand I betrug die mit der *EggeSaat* hergestellte Arbeitsbreite 51,9 cm. Bei diesem um das Saat-Anhängeaggregat erweiterten *Meinberg Wundstreifenpflug* wurde der Waldboden damit um ca. 3 cm breiter verwundet als lediglich mit dem Pflug im Rahmen der Bodenverwundung. Das Saatgut wurde häufig mittig im Verwundungsstreifen durch zwei kleinere Scheibeneggen eingearbeitet und zugestriegelt (vgl. Kapitel 4.3.1). Bei der *ÖkoSat/U* betrug die Breite der Saatrille im ersten Versuchsbestand durchschnittlich 14,9 cm und beim *Weilmünster Waldgrubber* 17,4 cm. Mit dem Tukey-Test konnte die Mittelwertdifferenz der letztgenannten Betriebsmittel als nicht gesichert ausgewiesen werden, während die übrigen Unterschiede stets gesichert vorlagen. Die für den Kontakt der Eckern mit dem Mineralboden bedeutsame Arbeitstiefe wies in den Verfahren *EggeSaat* und *Weilmünster Waldgrubber* einen identischen Mittelwert von 5,7 cm auf. Im Verfahren *ÖkoSat/U* erfolgte eine um ca. 2 cm signifikant tiefere Einarbeitung der Eckern, so dass hier ein vergleichbarer Wert zur durchschnittlich 7,7 cm mächtigen humosen Auflage erzielt werden konnte. Das bestätigt auch die Tatsache, dass in 92,5 % der Fälle ein Kontakt der Bucheckern mit dem Mineralboden für das Verfahren *ÖkoSat/U* registriert wurde. Beim Verfahren *EggeSaat* konnte eine Freilegung des Mineralbodens in 65 % und beim *Weilmünster Waldgrubber* bei ca. 34 % der Beobachtungen erfasst werden.

**Tabelle 39: Mittelwerte der Arbeitsbreite und -tiefe bei den Saatverfahren sowie der relative Anteil der Stichprobenpunkte mit Mineralbodenkontakt**

Verfahren / Bestand		Arbeitsbreite [cm]	MW-Diff <sup>1)</sup> [cm]	Arbeitstiefe [cm]	MW-Diff <sup>1)</sup> [cm]	Mineralbodenkontakt [%]
<i>EggeSaat</i>	I	51,9 a	8,2*	5,7 a	-1,7*	65,0
	II	43,7 A		7,4 A		58,1
<i>ÖkoSat/U</i>	I	14,9 b	0,5	7,3 b	-0,1	92,5
	II	14,4 B		7,4 A		79,4
<i>Weilmünster Waldgrubber</i>	I	17,4 b	1,1	5,7 a	0,8*	33,8
	II	16,3 B		4,9 B		22,5

SP = 160  
<sup>1)</sup> Differenz der Mittelwerte (MW) zwischen den Versuchsbeständen I und II; \* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$   
 Verschiedene Buchstaben weisen auf signifikante ( $\alpha = 0,05$ ) Mittelwertdifferenzen hin (Tukey-Test). Kleinbuchstaben beziehen sich auf den Vergleich der Mittelwerte eines Arbeitsverfahrens innerhalb des Bestandes I und Großbuchstaben auf analoge Vergleiche innerhalb des Bestandes II

Im Versuchsbestand II konnte eine Verringerung der Saatrillenbreite über alle Verfahren registriert werden, wobei diese Mittelwertdifferenz lediglich beim Verfahren *EggeSaat* mit 8,2 cm als gesichert nachgewiesen wurde. Bei den Verfahren *ÖkoSat/U* und *Weilmünster Waldgrubber* betragen die jeweils nicht signifikanten Mittelwertdifferenzen 0,5 cm und 1,1 cm. Der multiple Mittelwertvergleich zeigt in der zweiten Bestandsvariante wiederum, dass sich lediglich die Mittelwerte der Arbeitsbreiten zwischen den letztgenannten Verfahren nicht signifikant voneinander unterscheiden. Gegenüber der für den Pferdeeinsatz einfacheren Bestandsvariante erfolgte in Bestand II mit dem Verfahren *EggeSaat* eine um 1,7 cm signifikant tiefere Bearbeitung. Mit dem Aggregat *ÖkoSat/U* nahm die Bearbeitungstiefe in den Teilflächen des Bestandes II im Mittel um 0,2 cm zu. Eine im Bestandsvergleich geringere Arbeitstiefe mit einem Mittelwert von 4,9 cm wurde mit dem *Weilmünster Waldgrubber* erreicht. Der Anteil der Stichproben, bei denen der Mineralboden ausreichend freigelegt werden konnte, fiel über alle Verfahren im Bestand II geringer aus. Beim Verfahren *ÖkoSat/U* wurde noch in knapp 80 % der Fälle der Mineralbodenkontakt hergestellt, während beim Verfahren *EggeSaat* in ca. 58 % und beim *Weilmünster Waldgrubber* nur noch in 22 % der Beobachtungen ein Anschluss zum Mineralboden registriert werden konnte.

Für die Saatverfahren wurde darüber hinaus an den Stichprobenpunkten der Abstand der ausgebrachten Bucheckern innerhalb der Saatrillen vermessen. Die Mittelwerte inklusive der Standardabweichungen sind getrennt nach den drei Verfahren sowie den beiden Bestandsvarianten im Balkendiagramm der Abbildung 17 abgetragen. Weitere deskriptive Statistiken sind Tabelle VII\_15 im ANHANG VII zu entnehmen.

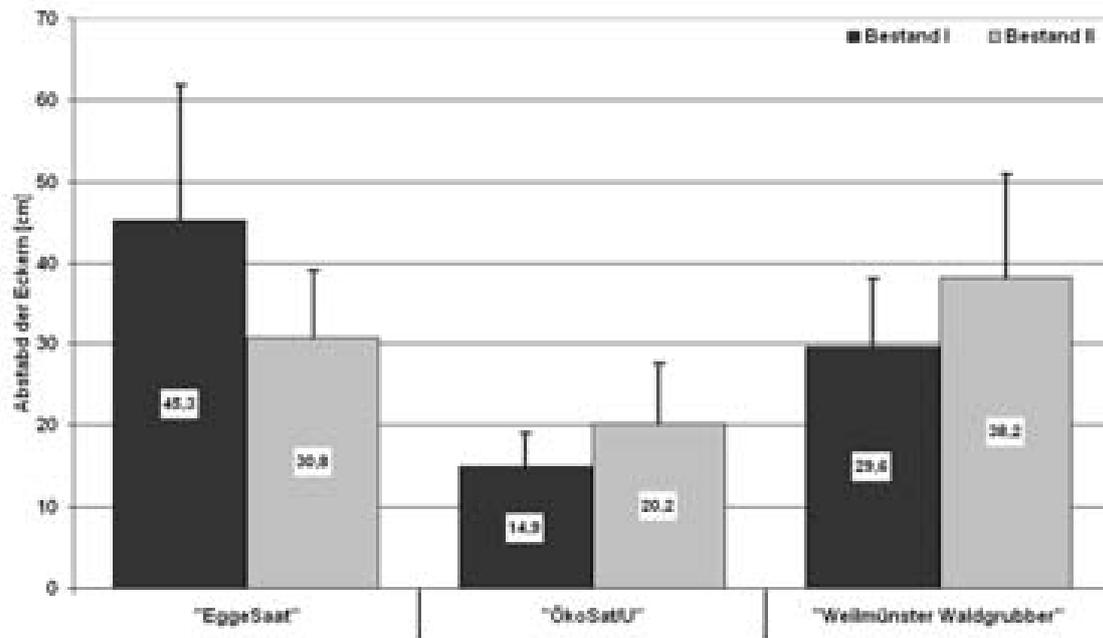


Abbildung 17: Mittelwert inklusive Standardabweichung des Kriteriums *Eckernabstand* für die untersuchten Saatverfahren in beiden Bestandsvarianten

Betrachtet man die in Abbildung 17 zusammengefassten Ergebnisse dieser Erhebung, so wird deutlich, dass der Abstand der ausgebrachten Eckern zwischen den Verfahren stark variierte. Im Bestand I betrug die Strecke zwischen den aufgefundenen Eckern beim Verfahren *EggeSaat* durchschnittlich 45,3 cm, beim Verfahren *ÖkoSat/U* hingegen 14,9 cm und beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* 29,6 cm. Wiederum mit Ausnahme des Verfahrens *EggeSaat* (32 % geringer) nahm der Abstand der Eckern in den Reihen unter den für den Pferdeeinsatz erschwerten Bedingungen signifikant zu. Beim Saatverfahren *ÖkoSat/U* erhöhte sich der Abstand im Mittel um nahezu 35 % auf 20,2 cm, beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* um ca. 29 % auf 38,2 cm. Der multiple Vergleich der Mittelwerte dieses Kriteriums wies in den jeweiligen Bestandsvarianten stets signifikante Differenzen zwischen den Saatverfahren aus.

Des Weiteren wurde als weiterhin bedeutendes Erfolgskriterium für eine Rillensaat die Abdeckung der Buheckern mit einem Gemisch aus Humus und Mineralboden erfasst. Abbildung 18 weist die Ergebnisse dieser Erhebung in einem Balkendiagramm für die untersuchten Saatverfahren und Bestände aus. Hier zeigt sich im Bestand I, dass beim Verfahren *EggeSaat* kaum eine Abdeckung des Saatgutes während des Arbeitsablaufes stattfand: In 89,5 % der Beobachtungen lagen die Eckern lediglich *locker – frei* auf der Saattrille. Das Verfahren *ÖkoSat/U* erreichte im Bestand I mit 71,9 % in der Klasse *gut* die vergleichsweise beste Abdeckung der Eckern mit einem Humus-Mineralbodengemisch. Im Saatverfahren *Weilmünster Waldgrubber* konnte unter einfacheren Bestandsbedingungen (Bestand I) eine in 60,0 % der Beobachtungen *locker – freie* Abdeckung registriert werden, während bei 36,9 % das Saatgut offen in der Saattrille verblieb. Im zweiten Versuchsbestand nahm die Qualität der Abdeckung der Buheckern in den untersuchten Verfahren ab. Beim Verfahren *EggeSaat* betrug der Anteil, in dem keine Abdeckung erzielt wurde, 16,3 %. Beim Saatverfahren *ÖkoSat/U* war die Veränderung zum ersten Bestand eher gering, hier nahm der Anteil, in dem die Eckern frei in der Rille lagen, um 3,8 % zu, wobei die Häufigkeiten der übrigen zwei Klassen annähernd gleich blieben. Mit dem Saatverfahren *Weilmünster Waldgrubber* erfolgte nahezu keine Abdeckung der Buheckern (71,3 %). Bei 23,8 % der Beobachtungen war die Saattrille *locker–frei* verschlossen und in 5,0 % der Fälle konnte die Verschließung der Rille als *gut* klassifiziert werden.

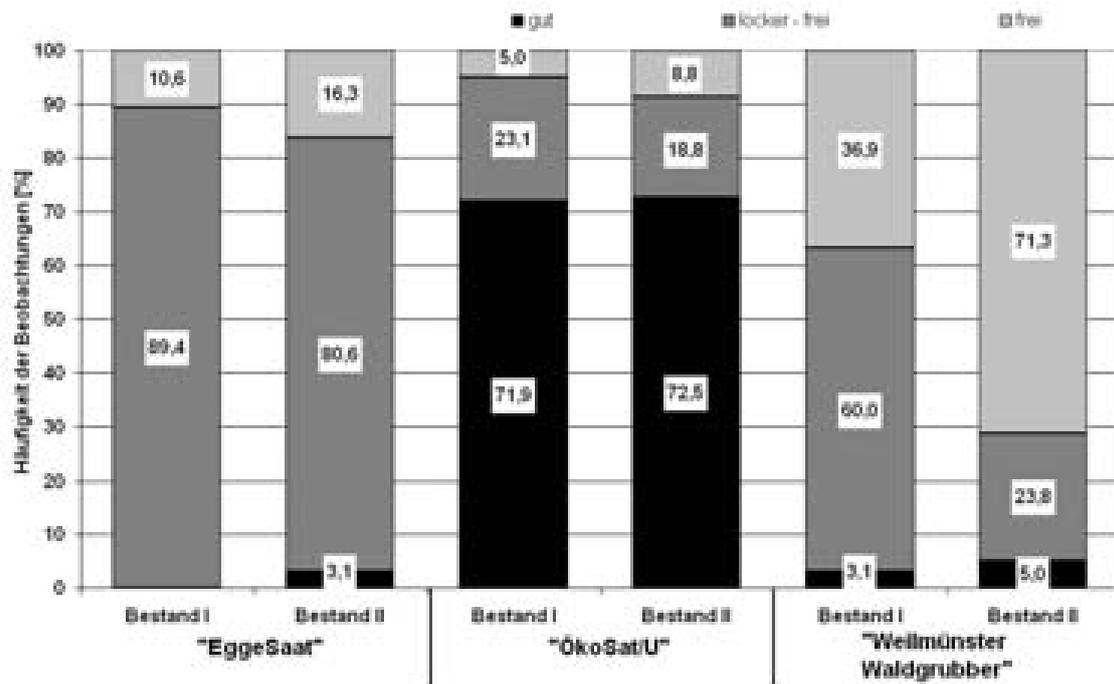


Abbildung 18: Relative Häufigkeit zur klassierten Eckern-Abdeckung der Saatverfahren in beiden Bestandsvarianten

### 6.3.2 Auflauf der Buchensaar

#### 6.3.2.1 Datenbasis

Die Auflaufergebnisse der durchgeführten Frühjahrs-Buchensaat wurden zu zwei Zeitpunkten erfasst, einmal im Herbst 2001 als Vollerhebung und bei einer Folgeaufnahme im Sommer 2002 als Stichprobenerhebung. Neben einer Quantifizierung der Keimlinge auf den Teilflächen konnten mit diesem Vorgehen auch der Pflanzenverlust sowie einige Parameter zur Pflanzenentwicklung nach dem ersten Jahr näher untersucht werden.

Der SPSS-Datensatz der Vollerhebung enthielt neben den Gruppierungsvariablen (Arbeitsverfahren, Bestandsvariante und Teilfläche) Variablen zu den ausgewiesenen drei Vitalitätsklassen (Häufigkeiten) sowie der ausgebrachten Saatgutmenge [kg]. Die mit dem *Eberswalder Streifenpflug* vorbereiteten Flächen in der ersten Bestandsvariante wurden aufgrund der verspäteten Handsaat im Anschluss an die Bodenverwendung von der Ergebnisdarstellung ausgeschlossen. Der vorliegende Datensatz umfasste demnach insgesamt 72 Fälle. Die vorliegenden Daten der Keimlingszahlen werden aufgrund der großen Variationsbreite zwischen Teilflächen und Verfahren sowie dem geringen Stichprobenumfang lediglich deskriptiv statistisch dargestellt.

Die Daten der Stichprobenerhebung wurden je Teilfläche und Aufnahmezeitpunkt in separaten Tabellen (ASCII-Dateiformat) gehalten. Für eine vergleichende Auswertung der Erhebungen wurden diese über eine codierte Schlüsselvariable auf Basis der Gruppierungsvariablen sowie der Keimlingsnummer zu einer SPSS-Datei verschnitten. Inklusive einer Variablen mit Anmerkungen umfasste dieser Datensatz 27 Variablen. Wiederum mit der bereits oben angeführten Ausnahme des Verfahrens *Eberswalder Streifenpflug* im Bestand I konnten insgesamt 720 Fälle ausgewertet werden. Die Häufigkeiten der Keimlingszahlen sowie deren Ausfall werden deskriptiv statistisch dargestellt. Die gemessenen Abstände der Buchenpflanzen wiesen in beiden Aufnahmejahren keine Normalverteilung auf, so dass die Überprüfung auf gesicherte

Unterschiede zwischen den Stichproben mit Hilfe des U-Tests nach Mann-Whitney bzw. bei mehreren Stichproben mit dem H-Test erfolgte. Die Daten des Parameters Pflanzenhöhe aus der Erhebung im Jahr 2001, die jeweils einen Stichprobenumfang von 80 Pflanzen je Verfahren und Bestand untersuchte, folgten einer Normalverteilung. Für die Daten der Aufnahme aus dem Jahr 2002 bei einem im Vergleich zum Vorjahr geringeren Stichprobenumfang verwarf hingegen der Kolmogoroff-Smirnoff-Test die Annahme einer Normalverteilung, obwohl die graphische Überprüfung der Verteilung der Messwerte auf eine solche schließen ließ. Aus diesem Grund wurden die entsprechenden Mittelwertvergleiche für die Bestandsunterschiede bei der Pflanzenhöhe mit dem t-Test durchgeführt.

### 6.3.2.2 Vollaufnahme im Herbst 2001

Bei den Versuchen im Mai 2001 wurden je Kilogramm Saatgut durchschnittlich 2.735 Bucheckern ausgebracht, auf der Basis des ermittelten Keimprozents von ca. 80 % fand demnach die Ausbringung von ca. 2.735 keimfähigen Eckern je Kilogramm Saatgut statt (vgl. Kapitel 3.3). Bei einer Zielvorgabe von 5 kg Saatgut je Teilfläche von 0,1 ha betrug die potenzielle Keimlingszahl ca. 13.675 je Versuchsfläche. Dabei wurde bei zwei Ausnahmen die genannte Zielvorgabe nicht eingehalten. In den Flächen des Bestandes I, die mit dem *Eberswalder Streifenpflug* für die Handsaat vorbereitet wurden, erfolgte entgegen dem Arbeitsauftrag keine plätzeweise Handsaat durch die Forstwirte. In den Flächen, die mit dem *Weilmünster Waldgrubber* besät wurden, war es aus verfahrensbedingten Gründen nicht möglich, die angestrebte Saatgutmenge auf der Teilfläche auszubringen, sie betrug in der ersten Bestandsvariante durchschnittlich 2,3 kg/0,1 ha (potenzielle Keimlingszahl: ca. 6.291 je TF). In der zweiten Bestandsvariante wurden lediglich im Mittel 1,7 kg Bucheckern ausgebracht, welches einer möglichen Keimlingszahl von ca. 4.650 Stück je Teilfläche entsprach.

Die mittlere Anzahl der Keimlinge je Teilfläche für die Handsaaten nach Bodenverwundung mit den untersuchten Aggregaten sowie die prozentuale Verteilung auf die ausgewiesenen Vitalitätsklassen sind in Tabelle 40 aufgeführt.

**Tabelle 40: Mittlere Anzahl der Keimlinge je Teilfläche sowie deren prozentuale Verteilung auf die Vitalitätsklassen bei der Handsaat nach Bodenverwundung durch die Streifenpflüge in beiden Bestandsvarianten**

Verfahren / Bestand		Keimlinge je Teilfläche (0,1 ha)	Anteil <i>vital</i> [%]	Anteil <i>biotischer</i> <i>Schaden</i> [%]	Anteil <i>abiotischer</i> <i>Schaden</i> [%]
<i>Eberswalder Streifenpflug</i>	<i>I</i>	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	<i>II</i>	22,5	91,6	5,8	2,7
<i>Meinberg Wundstreifenpflug</i>	<i>I</i>	395,8	95,0	3,9	1,2
	<i>II</i>	32,6	97,0	3,0	0,0

Bei Betrachtung der Tabelle 40 fallen zunächst die geringen Keimlingszahlen sowie der enorme Unterschied der mittleren Keimlingszahl zwischen den Beständen bei der Handsaat im Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* auf. Hier wurden im Bestand I mit 396 Buchenkeimlingen je Teilfläche 12-mal mehr Keimlinge aufgefunden als in der zweiten Bestandsvariante. Vergleicht man die erfassten Keimlinge mit den potenziellen, so zeigt sich im Bestand II in den Flächen der Bodenverwundungsverfahren ein geringeres Keimprozent von im Mittel 0,16 %

(*Eberswalder Streifenpflug*) und 0,24 % (*Meinberg Wundstreifenpflug*). Beide Verfahren besaßen einen Anteil der vitalen Keimlinge am Kollektiv von durchschnittlich 95 %. Bei den Schädigungen fiel vor allem das Auftreten biotischer Schäden mit durchschnittlich 4 % ins Gewicht, hier handelte es sich in erster Linie um Schädigungen durch Schneckenfraß und Hasenverbiss. Verfahrensspezifische Unterschiede können bei dieser Betrachtung des Keimerfolgs nicht näher beziffert werden, da bei dem angewandten Handsaat-Verfahren der Mineralboden zusätzlich auf dem Pflugstreifen durch die Forstwirte nachgearbeitet wurde (vgl. Kapitel 4.2.3).

Der Auflauf der Rillensaat nach der Bearbeitung mit den untersuchten Saataggregaten lässt sich anhand von Tabelle 41 charakterisieren. Hier trat ein deutlicher Bestandsunterschied in den Keimlingszahlen hervor, so variierten im Bestand I die mittleren Keimlingszahlen je Teilfläche von 71 (*Weilmünster Waldgrubber*) bis 475 (*ÖkoSat/U*). Relativiert man die Anzahl der aufgefundenen Buchenkeimlinge mit der potenziellen Anzahl, so ergibt sich ein mittleres Keimprozent zwischen 0,75 (*EggeSaat*) und 3,47 (*ÖkoSat/U*). Die geringsten Auflaufprozente wurden auf den mit dem *Weilmünster Waldgrubber* bearbeiteten Flächen (0,52 %) erfasst. Betrachtet man die in der ersten Bestandsvariante an den Buchenpflanzen erfassten Schäden, so zeigt sich, dass beim Verfahren *ÖkoSat/U* bei 4 % der Keimlinge biotische Schäden auftraten und bei 0,5 % der Pflanzen abiotische Schädigungen zu verzeichnen waren. Hier fiel auf, dass bei dieser nahezu vierfach besser aufgelaufenen Saat mehrere laufende Meter durch Hasen verbissen und so geschädigt wurden. Bei der Rillensaat des Verfahrens *EggeSaat* betrug der Anteil der biotischen Schäden ca. 3 %, auch hier fielen bei einer kontinuierlichen Dichte der Saat mehrere Pflanzen durch Hasenverbiss aus.

**Tabelle 41: Mittlere Anzahl der Keimlinge je Teilfläche sowie deren prozentuale Verteilung auf die Vitalitätsklassen bei der kombinierten Rillensaat mit den untersuchten Saataggregaten in beiden Bestandsvarianten**

Verfahren / Bestand		Keimlinge je Teilfläche	Anteil vital [%]	Anteil biotischer Schaden [%]	Anteil abiotischer Schaden [%]
<i>EggeSaat</i>	I	102,4	96,3	3,4	0,3
	II	15,0	96,0	3,3	0,7
<i>ÖkoSat/U</i>	I	475,1	95,4	4,1	0,5
	II	85,9	98,7	1,3	0,0
<i>Weilmünster Waldgrubber</i>	I	71,3	99,7	0,2	0,1
	II	31,9	97,2	2,8	0,0

Die in den Versuchsflächen der zweiten Bestandsvariante berechneten Auflaufprozente fielen deutlich geringer aus als die im Bestand I erfassten. In den Flächen des Verfahrens *EggeSaat* konnten im Vergleich zur ersten Bestandsvariante bei gleicher Qualität des verwendeten Saatgutes ca. 15 % weniger Keimlinge aufgenommen werden, beim Verfahren *ÖkoSat/U* betrug dieser Anteil ca. 18 %, der mit durchschnittlich 86 Buchenkeimlingen/TF die meisten Keimlinge im Vergleich aufwies. Beim *Weilmünster Waldgrubber* bestanden mit 44 % die geringsten Unterschiede zwischen den Beständen. Im Vergleich mit der rechnerisch bestimmten potenziellen Pflanzenzahl fiel das Auflaufergebnis mit unter einem Prozent über alle Verfahren im Bestand II sehr gering aus. Hinsichtlich des Anteils der erfassten Vitalitätsklassen in Tabelle 41 zeigt sich, dass bei über 95 % der Keimlinge keine Schädigungen erfasst wurden. Biotische Schäden konnten bei den Verfahren *EggeSaat* und *Weilmünster Waldgrubber* bei ca. 3 % der Pflanzen festgestellt werden, beim Verfahren *ÖkoSat/U* traf dies auf ca. 1 % der aufgefunde-

nen Keimlinge zu. Abiotische Pflanzenschäden konnten lediglich in den mit der *EggeSaat* besäten Flächen des Verfahrens bei 0,7 % der ausgezählten Keimlinge registriert werden.

### 6.3.2.3 Stichprobenaufnahme im Sommer 2002

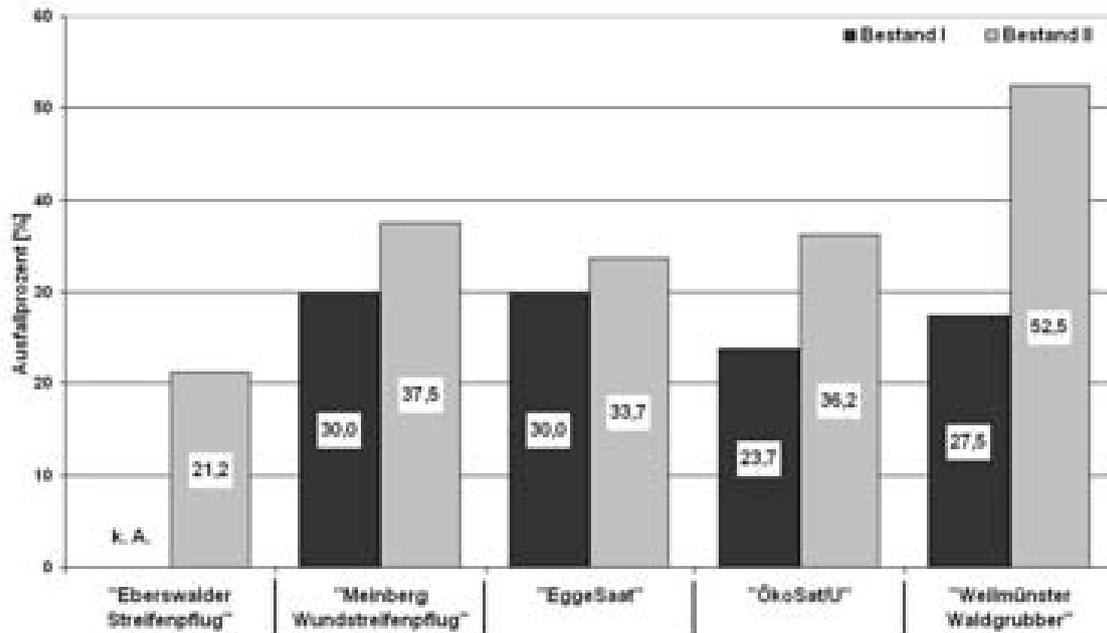
Bei der Wiederholungsaufnahme im Sommer 2002 konnten auf Basis der zehn erfassten vitalen Buchenkeimlinge je Teilfläche, die in Abbildung 19 aufgeführt sind, die mittleren Ausfallprozente abgeleitet werden. Aus diesen Daten ist abzulesen, dass über den Folgewinter Verluste zwischen 21 % und 53 % in den Flächen der unterschiedlichen Verfahrens- und Bestandsvarianten verzeichnet werden mussten.

In den Flächen des Bestandes II, die mit dem *Eberswalder Streifenpflug* vorbereitet wurden, fielen 21 % der im Vorjahr vital erfassten Keimlinge aus. In den mit dem *Meinberg Wundstreifenpflug* vorbereiteten Flächen der zweiten Bestandsvariante verringerte sich die Anzahl der erfassten Keimlinge um 38 %, während in der ersten Bestandsvariante ein Ausfall von 30 % registriert wurde. Da bei diesen Arbeitsverfahren der Erfolg der Saaten stark von der Arbeitsausführung der manuellen, plätzweisen Handsaat beeinflusst wird, kann an dieser Stelle keine differenzierte Betrachtung der Werte in Bezug auf die Arbeitsverfahren der Bodenverwundung vorgenommen werden. Fasst man aufgrund der als einheitlich einzustufenden manuellen Nacharbeitung der jeweiligen Pflugstreifen die Stichproben der untersuchten Bodenverwundungsverfahren getrennt nach Bestandsvarianten zusammen und betrachtet die an den Stichproben angesprochenen Saatplätze mit mehr als einem Keimling, so zeigt Tabelle 42, dass im ersten Jahr 80 % der Stichprobenpunkte (SP = 80) im Bestand I als Saatplatz angesprochen werden konnten, während dies nur auf 21 % der Stichproben (SP = 160) in der zweiten Bestandsvariante zutraf. Auch die arithmetischen Mittelwerte der auf den Saatplätzen erfassten Buchen in Tabelle 42 belegen, dass im Bestand I mit nahezu sieben Rotbuchen je Platz gut das Doppelte an Pflanzen registriert wurde als in der zweiten Bestandsvariante.

**Tabelle 42: Anteil der mit Buchenpflanzen begründeten Saatplätze und deskriptive Statistik zur Anzahl der Pflanzen je Platz in beiden Bestandsvarianten**

Aufnahmejahr / Bestand		SP	% - Anteil der mit mehr als einer Buchenpflanze belegten Plätze	Anzahl Buchenpflanzen je Platz		
				MW	SD	MIN-MAX
2001	I	80	80,0	6,9	4,39	2-22
	II	160	21,3	2,8	1,15	2-8
2002	I	80	62,5	5,1	3,24	2-15
	II	160	6,9	2,8	2,10	2-8

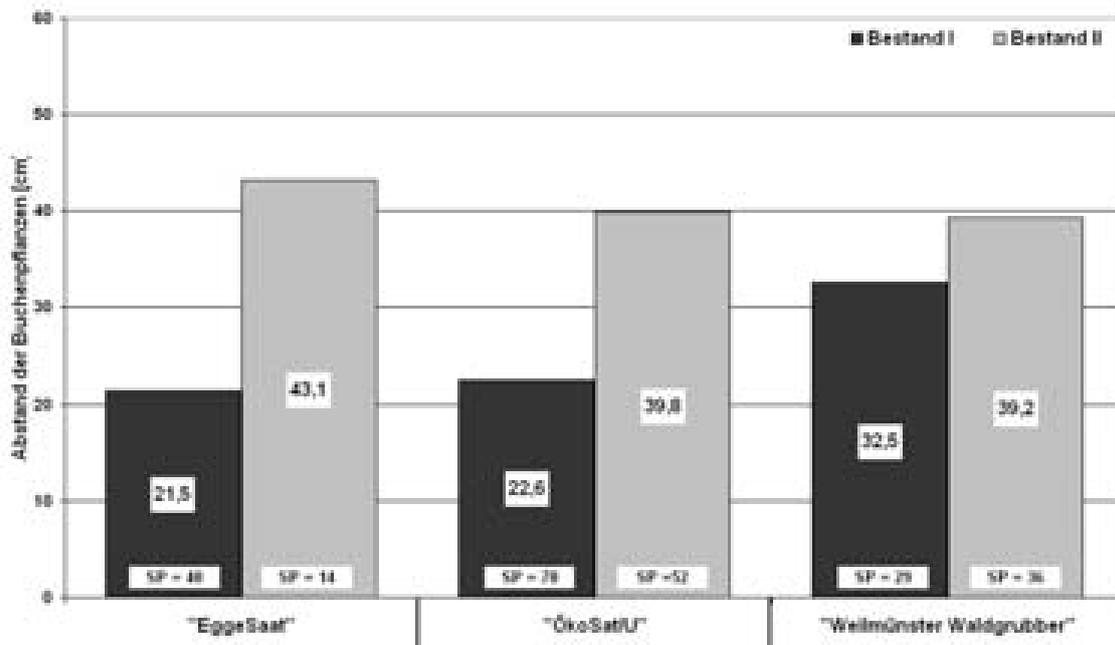
Die Aufnahmen in der zweiten Vegetationsperiode zeigen, dass in beiden Beständen die Anzahl der Saatplätze abnahm. Im Bestand I wurden 78 % der im Jahr 2001 als Saatplatz eingestuft Stichprobenpunkte erneut als solche angesprochen, im Bestand II betrug dieser Anteil ca. 32 %. Im Bestand I ging mit der Verringerung der Anzahl der Saatplätze auch eine Abnahme der mittleren Anzahl der Buchenpflanzen je Platz einher. Hier wurden mit ca. fünf Pflanzen zwei Pflanzen weniger aufgefunden als im ersten Jahr, während im Bestand II in beiden Jahren im Mittel ca. drei Pflanzen je Saatplatz registriert wurden.



**Abbildung 19: Ausfallprozent der Buchenkeimlinge nach dem ersten Winter (2001/2002) in Abhängigkeit des untersuchten Arbeitsverfahrens und der Bestandsvariante auf Basis der Stichprobenaufnahme (SP = 80)**

Die im Balkendiagramm der Abbildung 19 dargestellten Ausfallprozente verdeutlichen, dass in der zweiten Bestandsvariante bei den kombinierten Saataggregaten weniger Pflanzen wieder aufgefunden werden konnten als in der für den Pferdeinsatz günstigeren Bestandsvariante. Beim Verfahren *EggeSaat* wurde die geringste Bestandsdifferenz festgestellt, hier betrug der Ausfall vitaler Buchenpflanzen in Bestand II mit 34 % nur knapp 4 % mehr als in den Teilflächen des Bestandes I. In den Saatrillen der *ÖkoSat/U* wurde mit 61 vitalen Pflanzen ein Ausfallprozent von 24 verzeichnet, während in der zweiten Bestandsvariante durchschnittlich 10 Buchen weniger, d. h. 36 % Ausfall erfasst wurden. Die größte Bestandsdifferenz in der zweiten Vegetationsperiode konnte für die Flächen des Verfahrens *Weilmünster Waldgrubber* nachgewiesen werden. Hier betrug der Pflanzenausfall im Bestand I 28 %, in der zweiten Bestandsvariante verdoppelte sich dieser Anteil nahezu auf 52 %.

Während im Rahmen der Erhebung des Auflafergebnisses für die Handsaaten die Anzahl der Pflanzen je Platz erfasst wurde, erfolgte bei den Rillensaatenverfahren die Vermessung der Keimlingsabstände für weniger als einen Meter entfernt wachsende Nachbarpflanzen. Abbildung 20 stellt die arithmetischen Mittelwerte der Pflanzenabstände für die erste Erhebung im Jahr 2001 in einem Balkendiagramm sowie die Anzahl der in die Berechnung eingehenden Werte am Fuß der Balken dar. Betrachtet man hier zunächst die aufgeführten Fälle, in denen ein Nachbar des erfassten Keimlings nicht weiter als einen Meter entfernt war, so konnte dies am häufigsten beim Verfahren *ÖkoSat/U* verzeichnet werden. Hier wurde in 88 % (Bestand I) und 65 % (Bestand II) der Stichproben ein Nachbar in der ausgewiesenen Abstandsklasse aufgefunden. Beim Verfahren *EggeSaat* variierte diese Häufigkeit zwischen ca. 18 % (Bestand II) und 50 % (Bestand I). In den Flächen, die mit dem *Weilmünster Waldgrubber* bearbeitet wurden, konnte in 36 % (Bestand I) und 45 % (Bestand II) eine weitere Buchenpflanze in einer Distanz bis zu einem Meter aufgefunden werden.



**Abbildung 20: Arithmetischer Mittelwert der Abstände der erfassten Buchenpflanzen in den Saatrillen in Abhängigkeit des Arbeitsverfahrens und der Bestandsvariante im ersten Aufnahmejahr 2001**

Die Abstände der Pflanzen fielen in der ersten Bestandsvariante bei allen untersuchten Verfahren geringer aus als in der zweiten Bestandsvariante. Beim Verfahren *EggeSaat* betrug der mittlere Abstand zwischen zwei Keimlingen in der Reihe mit 43 cm im Bestand II gut 22 cm mehr als in der ersten Bestandsvariante. Diese Mittelwertdifferenz wies der U-Test als gesichert aus ( $p = 0,014$ ). In den Flächen des Verfahrens *ÖkoSat/U* wurden mit einem mittleren Abstand von 22,6 cm vergleichbare Abstände zu dem Verfahren *EggeSaat* erfasst. Die Pflanzabstände in den mit der *ÖkoSat/U* besäten Versuchsflächen nahmen in der zweiten Bestandsvariante um gut 17 cm signifikant ( $p = 0,008$ ) zu. Nicht gesichert ( $p = 0,216$ ) war hingegen die Mittelwertdifferenz von ca. 7 cm der erfassten Distanzen der Pflanzen in den Versuchsflächen des Verfahrens *Weilmünster Waldgrubber*. Hier betrug der Abstand zwischen zwei Buchenpflanzen im Mittel 33 cm im Bestand I und 39 cm im Bestand II. Ein Vergleich der Mittelwerte dieses Parameters zwischen den Arbeitsverfahren in den jeweiligen Bestandsvarianten erfolgte mit dem H-Test. Dieser wies sowohl im Bestand I ( $p = 0,249$ ), als auch im Bestand II ( $p = 0,874$ ) darauf hin, dass sich die dargelegten Mittelwerte der Pflanzabstände zwischen den Verfahren nicht signifikant unterschieden. Im Bestand I konnte bei höherem Stichprobenumfang ein mittlerer Abstand der Buchen von 24 cm und im Bestand II von 40 cm angegeben werden.

Einhergehend mit der geringeren Pflanzenzahl zum zweiten Aufnahmezeitpunkt kam es zu einer deutlichen Reduzierung der Stichproben, an denen eine Abstandsmessung vorgenommen werden konnte. Am häufigsten konnte in den mit der *ÖkoSat/U* bearbeiten Flächen mit 61 % der Fälle im Bestand I und 43 % im Bestand II eine Nachbarpflanze identifiziert werden. Beim Verfahren *EggeSaat* ergab sich in der ersten Bestandsvariante mit 22 Abstandsmessungen, also 39 % der möglichen Stichproben, das Dreifache an Erhebungen gegenüber der zweiten Bestandsvariante. In den Flächen des Verfahrens *Weilmünster Waldgrubber* konnte in 21 % (Bestand I) und 32 % (Bestand II) der wieder aufgefundenen Keimlinge ein Nachbar innerhalb der Saatrille registriert werden. Die Abbildung 21 fasst die Ergebnisse dieser Erhebung für das Jahr 2002 in einem Balkendiagramm zusammen.

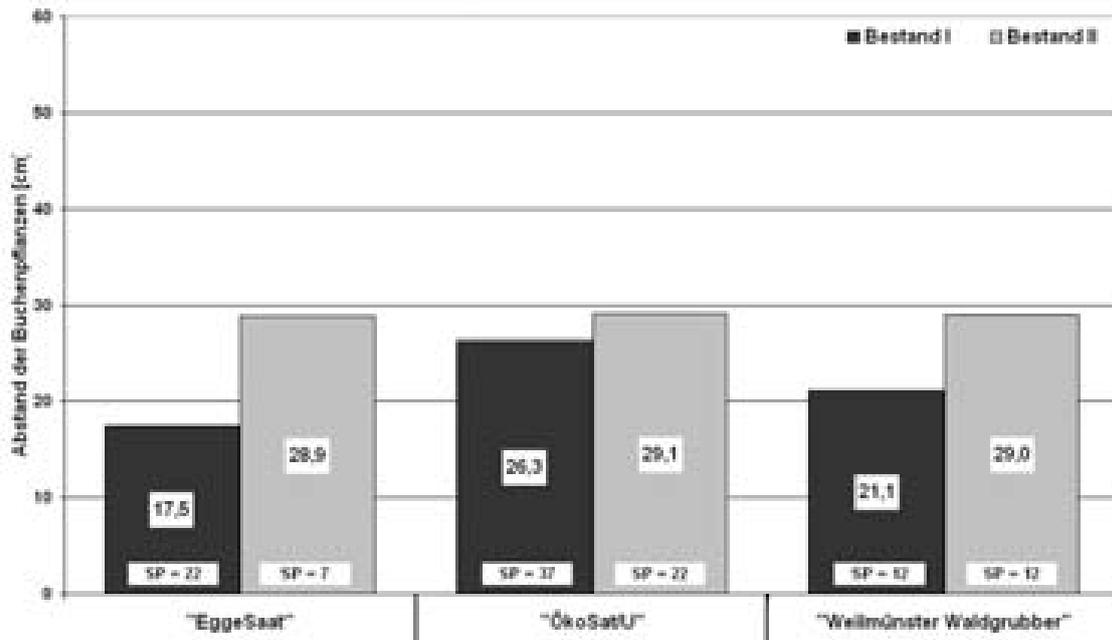


Abbildung 21: Arithmetischer Mittelwert der Abstände der erfassten Buchenpflanzen in den Saattrillen bei der zweiten Aufnahme (2002)

Bei den wieder aufgefundenen Stichproben haben im Vergleich des Vorjahres hauptsächlich diejenigen Pflanzen überlebt, die auch schon im Jahr 2001 in kürzerem Abstand einen Nachbarn aufwiesen. Dies bestätigte auch der mit dem Wilcoxon-Rangtest für die Abstände der Pflanzen berechnete Paarvergleich zwischen den Jahren 2001 und 2002, bei dem die ausgewiesenen Abstandsdifferenzen keine signifikante Veränderung im zweiten Jahr aufwiesen. Hieraus kann man schlussfolgern, dass i. d. R. eine weitere Pflanze im direkten Umfeld existierte, wenn ein Nachbar der Bezugspflanze ausfiel. Darüber hinaus ergaben sich für diejenigen Stichproben, an denen eine entsprechende Messung vorgenommen werden konnte, geringere Mittelwerte der Differenz zwischen beiden Jahren, woraus folgt, dass Pflanzen in einem höheren Dichtstand mit geringerer Wahrscheinlichkeit den Verlusten zuzurechnen waren.

In der zweiten Aufnahme (2002) sind die erfassten Mittelwerte der Pflanzenabstände in der ersten Bestandsvariante geringer als im Bestand II. Diese Differenz konnte lediglich im Verfahren *EggeSaat* mit ca. 11 cm als gesichert ( $p = 0,020$ ) ausgewiesen werden. Die geringste Differenz wurde im Verfahren *ÖkoSat/U* erfasst. Hier betrug der Pflanzenabstand in der Reihe mit 29 cm (Bestand II) knapp 3 cm mehr als in der ersten Bestandsvariante. Der Abstand zwischen den Buchen in den mit dem *Weilmünster Waldgrubber* besäten Flächen der zweiten Bestandsvariante belief sich wie bereits beim Verfahren *ÖkoSat/U* auf 29 cm, dies waren ca. 8 cm mehr als in den Flächen des Bestandes I.

Von den im Kapitel 5.3.2 aufgeführten Kriterien zur Pflanzenentwicklung wird im Folgenden lediglich die Pflanzenhöhe dargestellt, weil eine fortgeführte Wiederholung der Aufnahmen dauerhaft markierter Sämlinge im Studienumfang nicht vorgesehen war. Dieses Vorgehen liegt darin begründet, dass erhebliche Verluste von vitalen Keimlingen hingenommen werden mussten und eine Fortsetzung der intensiv vorbereiteten waldbaulichen Erhebungen unterbleiben musste.

Tabelle 43 stellt die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung erfassten Pflanzenhöhen in Abhängigkeit vom Arbeitsverfahren und der Bestandsvariante für die Erhebungszeitpunkte 2001 und 2002 dar. Während der ersten Erhebung 2001 variierten die mittleren Höhen der Keimlinge von 9–11 cm zwischen den Verfahren und den ausgewiesenen Bestandsvarianten.

Im Bestand I betrug der Mittelwert der Höhe eines Keimlings auf dem mit dem *Meinberg Wundstreifenpflug* vorbereiteten Pflanzplatz ca. 10 cm. In den Flächen der Saatverfahren wurden für die Verfahren *EggeSaat* (9,7 cm) und *Weilmünster Waldgrubber* (10,1 cm) keine nach Tukey signifikanten Mittelwertdifferenzen der Keimlingshöhen ausgewiesen. Die Keimlinge in den Flächen, die mit der *ÖkoSat/U* besät wurden, fielen hingegen im Vergleich signifikant höher aus, der Mittelwert für die Pflanzenhöhe betrug hier 11,4 cm. Im zweiten Versuchsbestand wurden geringere Höhen erfasst, wobei die Mittelwertunterschiede im Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* (0,8 cm) und *ÖkoSat/U* (1,1 cm) gesichert vorlagen. Der Vergleich der mittleren Höhen zwischen den Verfahren zeigte in dieser Bestandsvariante, dass sich die mit dem Verfahren *ÖkoSat/U* begründeten Buchenkeimlinge nicht signifikant in ihrer Höhe von den mit dem *Weilmünster Waldgrubber* ausgesäten unterschieden. In allen übrigen Vergleichen waren die Pflanzen in den Flächen der *ÖkoSat/U* um ca. 1 cm länger, wobei diese Differenzen mit dem Tukey-Test als gesichert ausgewiesen wurden.

**Tabelle 43: Mittelwertunterschiede der Pflanzenhöhe in Abhängigkeit vom Arbeitsverfahren und der Bestandsvariante in den Jahren 2001 und 2002**

Verfahren / Bestand		2001 Pflanzenhöhe [cm]	MW-Diff <sup>1)</sup> [cm]	2002 Pflanzenhöhe [cm]	MW-Diff <sup>1)</sup> [cm]
<i>Eberswalder Streifenpflug</i>	I	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	II	8,98 A		11,24 A	
<i>Meinberg Wundstreifenpflug</i>	I	10,07 a	0,79*	13,31 a	1,47*
	II	9,29 A		11,83 A	
<i>EggeSaat</i>	I	9,66 a	0,39	12,78 a	0,94
	II	9,31 A		11,83 A	
<i>ÖkoSat/U</i>	I	11,41 b	1,14*	14,80 b	1,91*
	II	10,03 B		12,89 A	
<i>Weilmünster Waldgrubber</i>	I	10,06 a	0,25	12,96 a	0,16
	II	9,81 A; B		12,80 A	

<sup>1)</sup> Differenz der Mittelwerte (MW) zwischen den Versuchsbeständen I und II; \* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$   
 Verschiedene Buchstaben weisen auf signifikante ( $\alpha = 0,05$ ) Mittelwertdifferenzen hin (Tukey-Test). Kleinbuchstaben beziehen sich auf den Vergleich der Mittelwerte eines Arbeitsverfahrens innerhalb des Bestandes I und Großbuchstaben auf analoge Vergleiche innerhalb des Bestandes II

Im Rahmen der Folgeaufnahme im Jahr 2002 konnte eine signifikante Zunahme der Pflanzenhöhen anhand des Wilcoxon-Tests für gepaarte Stichproben über alle untersuchten Varianten erfasst werden. Die Höhenzuwächse beliefen sich auf ca. 2,5–3,5 cm und variierten zwischen den untersuchten Verfahren. Zwischen den jeweiligen Mittelwerten der Pflanzenhöhe im Bestand I lagen für die Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* (13,31 cm), *EggeSaat* (12,78 cm) und *Weilmünster Waldgrubber* (12,96 cm) keine signifikanten Differenzen vor. Die mit dem Verfahren *ÖkoSat/U* begründeten Sämlinge wiesen eine Höhe von durchschnittlich 14,80 cm auf, dieser Wert unterschied sich signifikant von den übrigen. Im Bestand II wurden geringere Höhen gemessen als im ersten Versuchsbestand. Hier variierten die Höhen der Buchensämlinge zwischen 11 und 13 cm. Signifikante Unterschiede der Pflanzenhöhe zum Bestand I konnten in den Flächen der Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* (1,47 cm) und *ÖkoSat/U*

(1,91 cm) erfasst werden. Vergleicht man die Pflanzenhöhen zwischen den Arbeitsverfahren, so kann in dieser Bestandsvariante kein gesicherter Unterschied der Mittelwerte nachgewiesen werden.

### 6.3.2.4 Ökonomische Bewertung des Keimerfolges

Eine sich an den Systemkosten orientierende Bewertung der vorgestellten Arbeitsverfahren zur Bucheckern-Voraussaat kann über die Verschneidung des Keimerfolgs (Anzahl der Keimlinge bzw. Pflanzen) mit den Gesamtkosten (vgl. Kapitel 5.5.5) geschehen. In Abbildung 22 sind die kalkulierten mittleren Kosten für die Etablierung eines Keimlings im Herbst 2001 dargestellt. Es zeigt sich, dass die durchschnittlichen Kosten für einen einzelnen Buchenkeimling relativ hoch ausfallen und zwischen den Verfahrens- sowie Bestandsvarianten streuen. Wie aus dem Balkendiagramm der Abbildung 22 zu ersehen ist, liegen die Kosten für einen Keimling in der zweiten Bestandsvariante deutlich über den für Bestand I berechneten Kosten. Dies ergibt sich maßgeblich aus dem geringen Auflaufferfolg im Bestand II in Verbindung mit den durch geringere Produktivitäten beeinflussten erhöhten Verfahrenskosten.

Ein Vergleich der untersuchten Verfahrensvarianten ergibt, dass bei einer Handsaat nach Bodenverwendung durch einen Streifenpflug basierend auf den geringeren Verfahrenskosten in beiden Beständen und dem besseren Ablauf der Saat (nur für den Bestand II vergleichbar) aus dem Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* günstigere Keimlingskosten resultieren. In den Flächen der zweiten Bestandsvariante betragen die Kosten eines Keimlings beim Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* ca. 66 % der Kosten eines Keimlings des Verfahrens *Eberswalder Streifenpflug*.

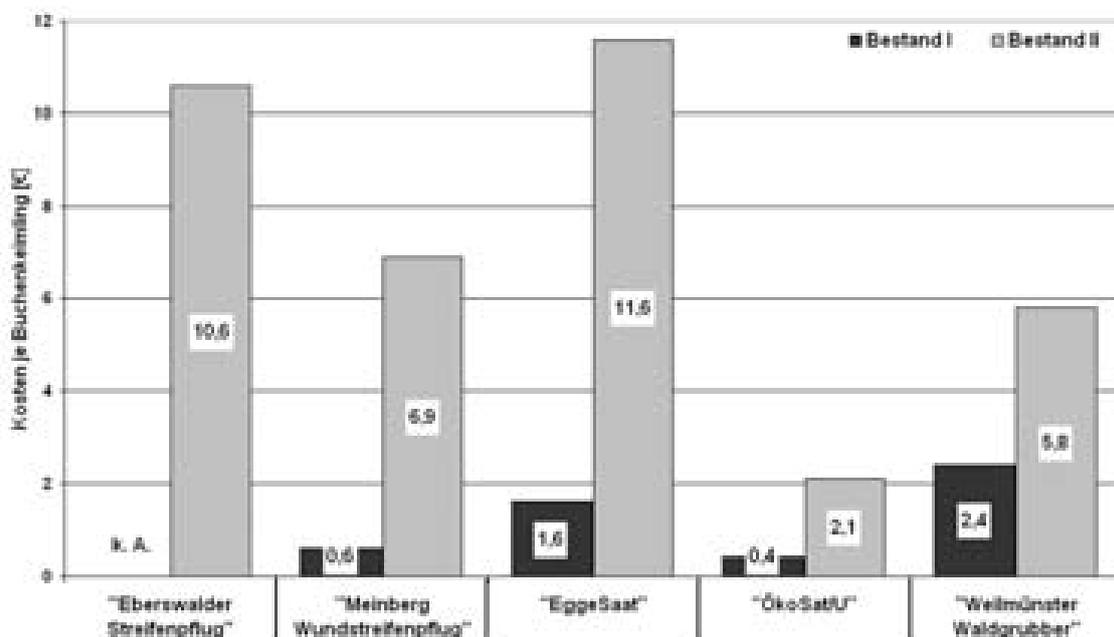


Abbildung 22: Mittlere Kosten für die Begründung eines Buchenkeimlings im ersten Jahr der Saat (2001) in Abhängigkeit von den untersuchten Arbeitsverfahren und Bestandsvarianten

Betrachtet man die kalkulierten Keimlingskosten für die untersuchten Saatverfahren, so zeigt sich hier, dass diese im Verfahren *EggeSaat* deutlich höher ausfielen als für die Bodenverwendungsverfahren. Bei der Gegenüberstellung der reinen Systemkosten schneidet das Ver-

fahren *EggeSaat* noch besser ab, der geringe Erfolg dieser Rillensaat-Variante hingegen lässt die bewerteten Kosten auf einen hohen Wert von 1,60 € ansteigen. Beim Verfahren *ÖkoSat/U* fallen erhöhte Kosten durch das „teurere“ Gerät sowie den Einsatz von zwei Pferden im Gespann an. Die Kontinuität der Arbeitsqualität und der im Verfahrenvergleich überdurchschnittliche Keimerfolg sorgen hingegen für die im vorliegenden Vergleich geringsten Kosten in Höhe von 0,40 € je Buchenkeimling (Bestand I). Mit 2,40 € je Buchenpflanze fällt die Saat mit dem Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* in der ersten Bestandsvariante am höchsten aus. Im Bestand II konnten hingegen mehr Keimlinge in den mit dem *Weilmünster Waldgrubber* besäten Flächen aufgefunden werden als in denen mit dem Verfahren *EggeSaat* begründeten. Daraus resultieren entsprechend geringere Kosten je Keimling in Höhe von 5,80 € (*Weilmünster Waldgrubber*), während sich die Kosten für einen Buchenkeimling im Verfahren *EggeSaat* mit 11,60 € auf gut das Doppelte beliefen. Auch in dieser Bestandsvariante wies das Verfahren mit den höchsten Systemkosten (vgl. Kapitel 6.2.5), *ÖkoSat/U*, die geringsten Kosten für einen Buchenkeimling aus (2,10 €).

Die bereits in Abbildung 19 dargestellte Mortalitätsrate ist dafür verantwortlich, dass sich die auf die einzelnen Buchen umgeschlagenen Kosten über alle Verfahren im zweiten Jahr deutlich erhöhten. Im Bestand I betrug die Kostensteigerung ca. 43 % für die Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* und *EggeSaat*. Die geringste Zunahme mit ca. 31 % konnte beim Verfahren *ÖkoSat/U* erfasst werden. Hier beliefen sich die Kosten je Buchenpflanze auf 0,46 €, während im Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* auf den einzelnen Sämling Kosten in Höhe von 3,31 € verbucht werden mussten, was einer Kostensteigerung von ca. 38 % gegenüber dem Vorjahr entspricht. In der zweiten Versuchsbestandsvariante nahmen die bewerteten Kosten deutlich zu. Sie beliefen sich für einen Buchensämling auf 13,47 € (*Eberswalder Streifenpflug*) und 10,99 € (*Meinberg Wundstreifenpflug*). Im Verfahren *EggeSaat* war der Buchensämling mit 17,45 € (Zunahme um 51 % gegenüber dem Vorjahr) am teuersten. Die geringsten Kosten im gesamten Verfahrenvergleich entfielen mit 3,31 € je Pflanze auf das Saatverfahren *ÖkoSat/U*. Im Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* entstanden durch den Ausfall der Keimlinge des Vorjahres Kosten in Höhe von 12,20 € je Buchenpflanze im Jahr 2002.

### 6.3.3 Mechanische Verletzungen am Fichtenbestand

#### 6.3.3.1 Datenbasis

Die durch die Betriebsmittel und Zugpferde verursachten Verletzungen an den in den bearbeiteten Teilflächen stockenden Fichten wird häufig als Kritikpunkt an den untersuchten Arbeitsverfahren angeführt. Hier muss unterschieden werden, ob der Holzkörper der oberirdischen Baumteile verletzt wurde oder das unterirdische Wurzelwerk.

Die angesprochene Beschädigung der stockenden Fichten wurde in vier an der Wundgröße orientierten Schadklassen erhoben. Die erfassten Häufigkeiten der Beschädigungen je Teilfläche wurden jeweils mit den Informationen der Flächenausprägung in einem SPSS-Datensatz gehalten. Somit standen über die untersuchten Varianten der Arbeitsverfahren und Bestände insgesamt 80 Datensätze für eine statistische Auswertung zur Verfügung. In dem dargestellten Vergleich der Differenzen zwischen der Schadhäufigkeit innerhalb der Bestände wies der Kolmogoroff-Smirnoff-Einstichproben-test keine Normalverteilung aus. Zum Vergleich und zur weiteren Absicherung der vorliegenden zentralen Tendenzen diente hier der U-Test. Die weitere Darstellung der Ergebnisse erfolgt anhand gängiger deskriptiver Statistiken.

Eine quantitative Erhebung der Verletzung von flach anstehenden Wurzeln der Fichten wurde an 20 zufällig ausgewählten Stichprobenpunkten durchgeführt. Die Datenaufbereitung erfolgte für jede Teilfläche in separaten Tabellen. Die weitere Datenaufbereitung und Aggregation zu

einem SPSS-Datensatz folgte analog dem unter Kapitel 6.3.1.1 beschriebenen Vorgehen. Eine Darstellung der Verletzungen am Wurzelsystem kann sich nur auf die bearbeiteten Stichprobenpunkte beziehen, daher reduziert sich der zur Verfügung stehende Stichprobenumfang in Abhängigkeit von der Verfahrens- und Bestandsvariante um 6 % auf insgesamt 1.502 Aufnahmeplätze. Das Vorliegen einer Normalverteilung der Daten in den untersuchten Stichproben wurde mit dem Kolmogoroff-Smirnoff-Einstichprobenstest nicht bestätigt. Auf der Basis des Signifikanzniveaus von  $\alpha = 0,05$  wurden nicht parametrische Varianten der entsprechenden statistischen Verfahren angewendet (vgl. Kapitel 5.6).

### 6.3.3.2 Verletzungen des oberirdischen Holzkörpers

Auf den 80 Teilflächen wurden 2.715 Fichten auf Verletzungen untersucht, die durch Kontakte mit Pferd oder Betriebsmittel hervorgerufen wurden. Insgesamt konnten an den begutachteten Bäumen 94 Schäden registriert werden. Die Anzahl der Verletzungen je Fichte belief sich auf ein bis maximal drei Fälle. Der Schwerpunkt lag mit 84 % bei einem sichtbaren Schadenereignis je Baum. Die visuell erfassten Verletzungen am Wurzelanlauf und Stamm der Fichten befanden sich durchschnittlich in einer Höhe von 52 cm.

Tabelle 44 führt die erfassten Beschädigungen über alle Klassen als Mittelwert je Teilfläche auf. Hier zeigt sich, dass in der ersten Bestandsvariante zwischen 0,4 und 1,6 Verletzungen je Teilfläche bei den Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* und *ÖkoSat/U* aufgefunden wurden. Im Bestand II nahmen die registrierten Wunden je Teilfläche im Mittel über alle Verfahren zu, wobei die jeweiligen Mittelwertdifferenzen nicht gesichert vorlagen. In dieser Bestandsvariante wurde in den mit der *ÖkoSat/U* besäten Flächen die geringste Anzahl mit im Mittel 0,63 Verletzungen/TF erfasst. Bei gleicher Abfolge der Verfahren ergaben sich die häufigsten Verletzungen auf den Teilflächen des Verfahrens *Meinberg Wundstreifenpflug* mit ca. 2,4 Verletzungen pro Teilfläche.

**Tabelle 44: Deskriptive Statistik der Anzahl mechanischer Verletzungen an Fichten über alle Wundgrößen je Teilfläche [0,1 ha] in Abhängigkeit von Arbeitsverfahren und Bestandsvariante**

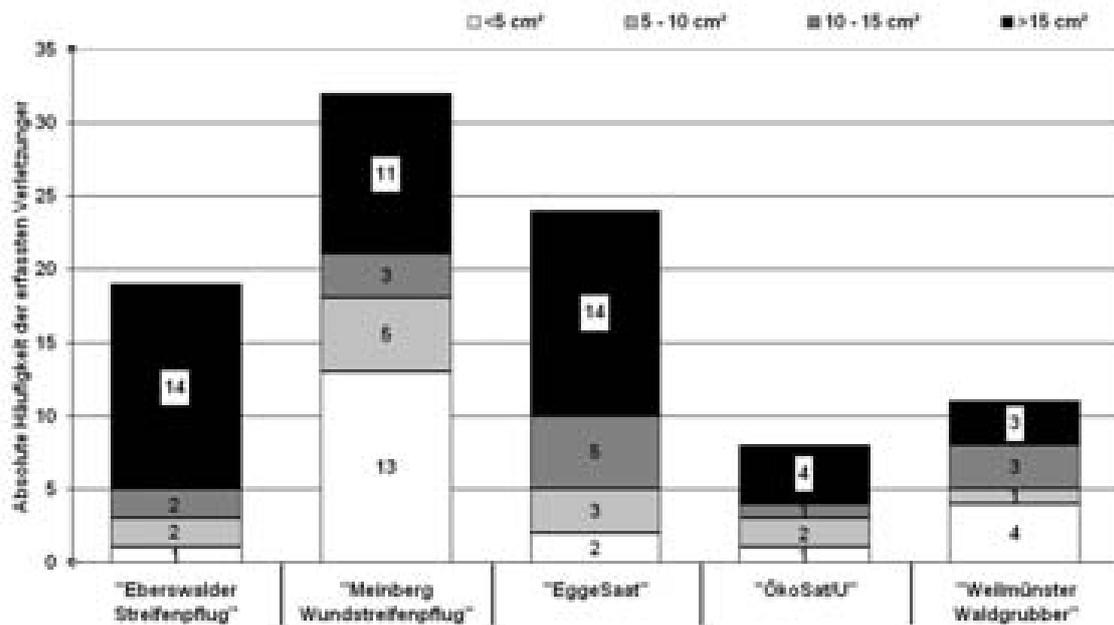
Verfahren / Bestand		MW	MIN-MAX	MW-Diff <sup>1)</sup>	Z
<b>Eberswalder Streifenpflug</b>	I	0,63	0-4	-1,23	0,00
	II	1,75	0-5		0,50
<b>Meinberg Wundstreifenpflug</b>	I	1,63	0-5	-0,75	0,50
	II	2,38	0-5		2,50
<b>EggeSaat</b>	I	0,88	0-3	-1,23	1,00
	II	2,13	0-6		2,00
<b>ÖkoSat/U</b>	I	0,38	0-3	-0,25	0,00
	II	0,63	0-2		0,00
<b>Weilmünster Waldgrubber</b>	I	0,50	0-3	-0,38	0,00
	II	0,88	0-4		0,00

SP = 8

<sup>1)</sup> Differenz der Mittelwerte (MW) zwischen den Versuchsbeständen I und II; \* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  (U-Test)

Unabhängig von den Versuchsbeständen zeigte sich, dass innerhalb der Teilflächen der Verfahren *ÖkoSat/U* und *Weilmünster Waldgrubber* die geringsten Verletzungen an den stockenden Fichten registriert werden konnten. Am ungünstigsten schnitten dabei die Verfahren *EggeSaat* und *Meinberg Wundstreifenpflug* ab.

Abbildung 23 stellt in einem Balkendiagramm der absoluten Häufigkeiten die Verteilung der visuell erfassten Verletzungen innerhalb der vier ausgewiesenen Klassen getrennt nach Arbeitsverfahren dar. Hier zeigt sich, dass über alle Verfahren die vierte Wundgrößenklasse ( $> 10 \text{ cm}^2$ ) mit 46 Registrierungen am häufigsten vertreten war, gefolgt von den Schäden der ersten Klasse ( $< 5 \text{ cm}^2$ ), in die 21 Beobachtungen fielen. Auf die übrigen Klassen ( $5\text{--}10 \text{ cm}^2$  und  $10\text{--}15 \text{ cm}^2$ ) konnten 13 bzw. 14 Verletzungen verbucht werden.



**Abbildung 23: Verteilung der mechanischen Verletzungen an Fichten auf die vier ausgewiesenen Wundgrößenklassen in Abhängigkeit vom Arbeitsverfahren**

Abbildung 23 zeigt, dass die einzelnen definierten Wundgrößenklassen bei den verschiedenen untersuchten Verfahren unterschiedlich häufig erfasst wurden. Die Kleinstverletzungen ( $< 5 \text{ cm}^2$ ) besitzen bei den Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* (41 %) und *Weilmünster Waldgrubber* (36 %) die größte Bedeutung, während bei den anderen Arbeitsverfahren der Anteil dieser Verletzungsklasse einen nachrangigen Stellenwert einnimmt. Auf die Gesamtschäden der einzelnen Verfahren betrachtet, wurde in der Klasse  $5\text{--}10 \text{ cm}^2$  ein nennenswerter Anteil von über 10 % bei den Verfahren *EggeSaat* (13 %), *Meinberg Wundstreifenpflug* (16 %) und *ÖkoSat/U* (25 %) erfasst. In der dritten ausgewiesenen Klasse ( $10\text{--}15 \text{ cm}^2$ ) wurde ein Anteil von über 10 % an erfassten Gesamtschäden bei den Saatverfahren *ÖkoSat/U* (13 %), *EggeSaat* (21 %) und *Weilmünster Waldgrubber* (27 %) registriert. Eine wesentliche Rolle über alle untersuchten Arbeitsverfahren hinweg spielten die Schäden der nach oben offenen vierten Größenklasse ( $> 15 \text{ cm}^2$ ), in der eine maximale Wundgröße von ca.  $45 \text{ cm}^2$  verbucht wurde und deren Anteil an der Schadenssumme über 25 % betrug. Von den registrierten 19 mechanischen Verletzungen der Fichten durch den *Eberswalder Streifenpflug* entfielen ca. 74 % auf diese Klasse. Gut die Hälfte der erfassten Beschädigungen bei den Verfahren *ÖkoSat/U* (50 %) und *EggeSaat* (58 %) wies eine Wundgröße von über  $15 \text{ cm}^2$  auf. In den Teilflächen der Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* und *Weilmünster Waldgrubber* belief dieser Anteil

sich auf 27 %. Das relative Verhältnis der verletzten Bäume in Bezug der auf den bearbeiteten Teilflächen stockenden Fichten kann über das so genannte Schadensprozent ausgedrückt werden. Dieser Parameter orientiert sich an der für Fichten als kritisch eingestuften Wundgröße von  $> 10 \text{ cm}^2$  (vgl. MENG, 1978). Tabelle 45 stellt unter anderem die arithmetischen Mittelwerte des Schadensprozents getrennt nach Arbeitsverfahren und Bestandsvariante gegenüber. Hier zeigt sich, dass in der zweiten Bestandsvariante das Schadensprozent höher ausfiel als im Bestand I. In der ersten Bestandsvariante wurden weniger als 2 % der auf den Teilflächen stockenden Fichten beschädigt. Bei den Bodenverwundungsverfahren und dem Saatverfahren *EggeSaat* wurde mit ca. 1,7 % und 1,5 % das im Verfahrenvergleich der ersten Bestandsvariante höchste Schadensprozent festgestellt, beim Verfahren *ÖkoSat/U* betrug es lediglich 0,3 %.

**Tabelle 45: Arithmetischer Mittelwert und Median des Schadensprozents in Abhängigkeit vom Arbeitsverfahren und der Bestandsvariante**

Verfahren / Bestand		MW [%]	MIN-MAX [%]	Z [%]
<i>Eberswalder Streifenpflug</i>	I	1,74	0–10,71	0,00
	II	4,54	0–16,67	1,85
<i>Meinberg Wundstreifenpflug</i>	I	1,72	0–4,88	1,16
	II	3,47	0–7,41	3,46
<i>EggeSaat</i>	I	1,51	0–4,76	1,14
	II	6,01	0–17,24	6,26
<i>ÖkoSat/U</i>	I	0,36	0–2,86	0,00
	II	1,88	0–8,00	0,00
<i>Weilmünster Waldgrubber</i>	I	1,05	0–5,71	0,00
	II	1,22	0–6,67	0,00
SP = 8				

Im Bestand II wurden bei den Bodenverwundungsverfahren Mittelwerte des Schadensprozents von ca. 3,5 % (*Meinberg Wundstreifenpflug*) und 4,5 % (*Eberswalder Streifenpflug*) gemessen. Bei den Saatverfahren entfiel das im gesamten Verfahrenvergleich höchste Schadensprozent auf das Verfahren *EggeSaat* mit im Mittel 6,0 %. Bei den Verfahren *ÖkoSat/U* (1,9 %) und *Weilmünster Waldgrubber* (1,2 %) fiel das Schadensprozent am geringsten aus.

### 6.3.3.3 Verletzungen des Wurzelwerks

An 70 % der insgesamt 1.502 Stichprobenpunkte konnten Verletzungen am oberflächigen Wurzelsystem erfasst werden. Mit 54 % der Beobachtungen trat schwerpunktmäßig eine Verletzung aus einer der definierten Klassen *verletzt* (Klasse 1), *durchtrennt* (Klasse 2) und/oder *herausgerissen* (Klasse 3) auf. An 20 % der Messpunkte wurden zwei Verletzungen und lediglich in 2 % der Fälle drei und mehr Verletzungen aufgefunden.

Eine Untergliederung nach Verletzungsklassen zeigt, dass die Anteile je Verfahren und Bestand unterschiedlich stark variierten. Der U-Test weist die geringen Differenzen zwischen den Mittelwerten der Häufigkeiten für alle Verletzungsklassen als nicht gesichert aus. Die relativen

Häufigkeiten der an den Messpunkten identifizierten Verletzungen der Klasse 1 sind über alle Arbeitsverfahren in Abbildung 24 aufgeführt. Im Mittel wurde in ca. 70 % der Fälle eine Verletzung der ersten Klasse aufgefunden, wobei die Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* (63,7 %), *ÖkoSat/U* (62,3 %) und *Weilmünster Waldgrubber* (60,6 %) unter diesem Wert lagen. In über zwei Dritteln der Fälle wurden Verletzungen der Mittelwurzeln durch Freilegung des Holzkörpers beim Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* (77,2 %) erfasst. Am häufigsten wurde das Auftreten der ersten Verletzungsklasse beim Verfahren *EggeSaat* an 84,1 % der Messpunkte registriert.

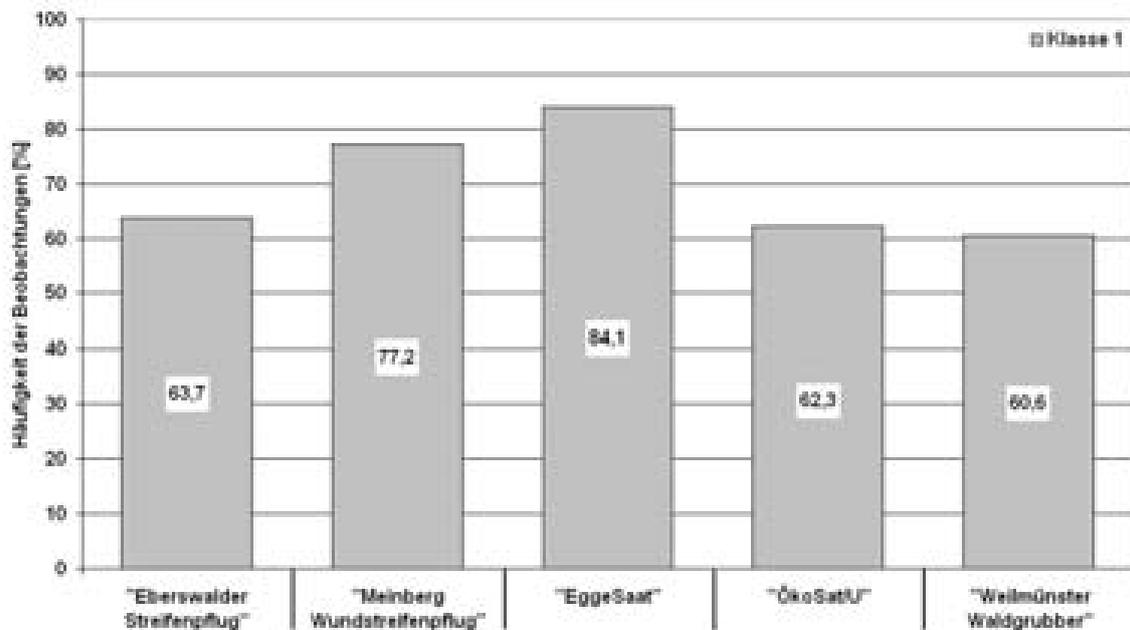


Abbildung 24: Relative Häufigkeit der Stichprobenpunkte mit einer Wurzelverletzung der Klasse 1 in Abhängigkeit vom Arbeitsverfahren

Hinsichtlich der zweiten Klasse der erfassten Verletzungen zeigt sich, dass durchtrennte Wurzeln mit einer mittleren Häufigkeit über alle Verfahrens- und Bestandsvarianten an ca. 15 % der Stichprobenpunkte auftraten. Die Differenzen der mittleren Häufigkeiten zwischen den Beständen konnte der U-Test über alle Verfahren als nicht gesichert nachweisen. Abbildung 25 stellt die Daten der Stichproben getrennt nach Verfahren für u. a. die Klasse 2 gegenüber und belegt, dass bei den Bodenverwundungsverfahren *Eberswalder Streifenpflug* und *Meinberg Wundstreifenpflug* mit nahezu identischen relativen Häufigkeiten von ca. 6,2 % Wurzeln durchtrennt wurden. Mit dem Verfahren *EggeSaat* konnte im vorliegenden Vergleich an 36,3 % der Messpunkte und somit am häufigsten ein Verletzungsereignis der Klasse 2 nachgewiesen werden. Demgegenüber belief sich dieser Anteil auf 9,3 % der bearbeiteten Stichprobenpunkte im Verfahren *ÖkoSat/U* und auf 17,4 % beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber*.

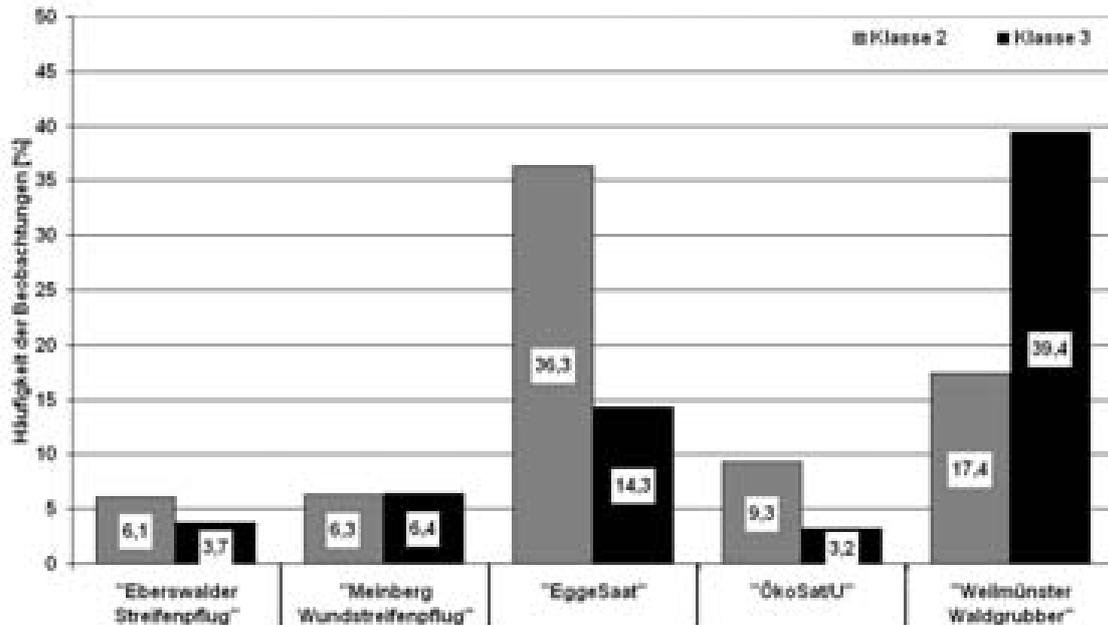


Abbildung 25: Relative Häufigkeit der Stichprobenpunkte mit dem Nachweis einer Wurzelverletzung der Klassen 2 und 3

Das Herausreißen von einzelnen Wurzeln aus dem oberflächennahen Wurzelsystem (Klasse 3) wurde über alle Verfahren im Mittel an 13 % der Aufnahmepunkte registriert. Dieses Ereignis konnte bei den Verfahren *ÖkoSat/U* (3,2 %), *Eberswalder Streifenflug* (3,7 %) und *Meinberg Wundstreifenflug* (6,4 %) mit unter 10 % der Beobachtungen als gering eingestuft werden. Beim Verfahren *EggeSaat* wurde an 14,3 % der Aufnahmepunkte ein durch die Scheibeneggen des Anhängeaggregates initiiertes Herausreißen einzelner Wurzelstränge registriert. Mit 39,4 % der Beobachtungen konnten Schadereignisse der dritten Klasse beim Saatverfahren *Weilmünster Waldgrubber* am häufigsten erfasst werden. Konstruktionsbedingt kam es bei diesem Federzinkengrubber zum Verhaken der Werkzeuge unter den oberflächigen Wurzeln und so zu deren Herauslösen aus dem Boden. Hauptsächlich lagen die offenliegenden Wurzeln in einem Durchmesserbereich von 0,2–1,0 cm und wiesen vielfach eine Teilschale auf.

### 6.3.4 Veränderungen der Bodenstruktur

#### 6.3.4.1 Datenbasis

Über die dynamische Kenngröße der Luftpermeabilität wurde die Veränderung der Bodenstruktur durch Befahrung bzw. Betritt der untersuchten Zugmittel Schlepper und Pferd erfasst. Die Messung der ausgewiesenen Versuchsvarianten *Referenz* (ungestört), *Hufabdruck* und *Schlepperspur* erfolgte im mineralischen Oberboden in zwei Beprobungstiefen (0–6 cm und 10–16 cm) mit einem mobilen Luftpermeameter (vgl. Kapitel 5.3.4).

Insgesamt wurde die Luftleitfähigkeit an 150 Stichprobenpunkten bestimmt, dies entspricht 50 Wiederholungen je Zugmittelvariante. An jedem Messpunkt war in den ausgewiesenen Tiefenstufen jeweils eine Messung vorgesehen. Nach den Feldaufnahmen wurden im Labor die Bodentextur analysiert und der Bodenwassergehalt bestimmt. Hierbei stellte sich heraus, dass bei einzelnen Wiederholungen die Porenstruktur der Bodenproben durch z. B. Steine, Wurzeln usw. zu stark beeinflusst war. Diese Stichproben wurden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Auf der nicht bearbeiteten Referenzfläche konnten nach dem Verwerfen nicht re-

präsentativer Messungen insgesamt 47 der ersten Tiefenstufe und 39 Wiederholungen in der sich daran anschließenden Beprobungstiefe zur Auswertung herangezogen werden. Die Ergebnisse der Lutleitfähigkeitsmessungen im Zentrum des Hufabdrucks beschränkten sich auf eine Wiederholungszahl von 45 bei einer Probentiefe von 0–6 cm, die sich in der zweiten Tiefenstufe um vier Messungen verringerte. Zur Bemessung der Luftleitfähigkeit in der Schlepperspur des MB-Trucks standen in der ersten Tiefenstufe 45 Probepunkte zur Verfügung, von denen nachträglich eine Messung in der zweiten Tiefenstufe verworfen werden musste.

Bei Permeabilitätsmessungen können häufig Extremwerte und Ausreißer im Sinn von nicht repräsentativen Werten auftreten. Aus diesem Grund wurde zusätzlich zum Mittelwert der Median berechnet und parallel dargestellt. Dieser ist gegenüber Ausreißern weniger empfindlich in der Charakterisierung der zentralen Tendenz der Messwerte (vgl. SACHS, 2002). Neben der Berechnung der deskriptiven Statistik erfolgte ein Vergleich der Stichproben auf gesicherte Unterschiede. Der Kolmogoroff-Smirnoff-Einstichprobentest wies für alle Gruppen die Nullhypothese bei gegebenem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  zurück. Die Überprüfung auf signifikante Differenzen zwischen Stichproben fand daher mit dem U-Test nach Mann und Whitney bzw. dem Kruskal-Wallis-H-Test statt. Neben dieser statistischen Analyse geschah die Bewertung der jeweiligen konvektiven Durchlässigkeit der Bodenluft anhand von zwei anerkannten Klassifikationen (vgl. Kapitel 5.3.4).

### 6.3.4.2 Luftpermeabilität der Bodenproben

Tabelle 46 stellt die deskriptive Statistik des  $k_i$ -Wertes der untersuchten Varianten in den beprobten Tiefenstufen inklusive des U-Tests auf Unterschiede der zentralen Tendenz dar. Hier zeigt sich, dass der arithmetische Mittelwert der Luftleitfähigkeit der Referenzfläche in der ersten Tiefenstufe  $190 \mu\text{m}^2$  betrug. In der zweiten Beprobungstiefe wurde ein um  $17 \mu\text{m}^2$  höherer Mittelwert nachgewiesen. Die anhand der berechneten Standardabweichung charakterisierte Streuung der  $k_i$ -Werte fiel mit  $145,32 \mu\text{m}^2$  in Tiefenstufe 1 und  $202,10 \mu\text{m}^2$  in der zweiten Probentiefe sehr hoch aus. Der Median nahm für beide Tiefenstufen mit  $136 \mu\text{m}^2$  (0–6 cm) und  $135 \mu\text{m}^2$  (10–16 cm) geringere Werte an als der Mittelwert. Die vorliegende Differenz der mittleren  $k_i$ -Werte zwischen den Beprobungstiefen konnte der U-Test als nicht gesichert ausweisen. Die konvektive Leitfähigkeit für Luft des nicht gestörten Bodens der Referenzfläche im Bereich der errechneten Mediane weist nach der Bruggenwert-Klassifikation (vgl. EIJKELKAMP, 1983) auf eine mittlere Bodendurchlüftung der Referenzfläche hin.

Tabelle 46: Deskriptive Statistik der berechneten  $k_i$ -Werte in den Bodenproben der untersuchten Varianten

Variante / Tiefenstufe		SP	MW [ $\mu\text{m}^2$ ]	SD [ $\mu\text{m}^2$ ]	Z [ $\mu\text{m}^2$ ]	MIN-MAX	Z-Diff <sup>1)</sup> [ $\mu\text{m}^2$ ]
<b>Referenz</b>	<b>1<sup>b)</sup></b>	47	190	145,32	136	32–524	1
	<b>2<sup>c)</sup></b>	39	207	202,10	135	34–930	
<b>Hufabdruck</b>	<b>1</b>	45	80	79,16	52	15–383	-2
	<b>2</b>	41	108	118,45	54	15–503	
<b>Schlepperspur</b>	<b>1</b>	45	66	67,17	47	2–292	-4
	<b>2</b>	44	77	73,47	51	4–372	

<sup>1)</sup> Differenz der Mediane zwischen den der ersten Tiefenstufen (<sup>b)</sup> = 0–6 cm) und der zweiten Beprobungstiefe (<sup>c)</sup> = 10–16 cm). \* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  (U-Test)

Die Ergebnisse der Luftleitfähigkeitsmessungen im Hufabdruck des Zugpferdes sind in Tabelle 46 abgetragen. In der ersten Tiefenstufe wurde ein  $k_i$ -Wert im Mittel von  $80 \mu\text{m}^2$  erfasst, während die Luftleitfähigkeit mit zunehmender Tiefe auf  $108 \mu\text{m}^2$  anstieg. Die Beeinträchtigung der Bodendurchlüftung durch einen Huftritt kann auch anhand des im Vergleich zur Referenzfläche geringeren Minimal- und Maximalwertes abgelesen werden. Die Streuung der Mittelwerte fiel in dieser Variante für beide Beprobungstiefen wiederum sehr hoch aus. Betrachtet man die Differenz der Mediane zwischen der ersten ( $52 \mu\text{m}^2$ ) und der zweiten Beprobungsebene ( $54 \mu\text{m}^2$ ) so zeigt sich, dass diese mit  $2 \mu\text{m}^2$  gering ausfiel. Der U-Test verwies auf einen nicht signifikanten Unterschied dieser zentralen Tendenz der  $k_i$ -Werte. Vergleicht man die Mediane mit der in Kapitel 5.3.4 aufgeführten Klassifikation nach Bruggenwert (EIJKELKAMP, 1983), so wird die geringere Bodendurchlüftung als mäßig–gering eingestuft.

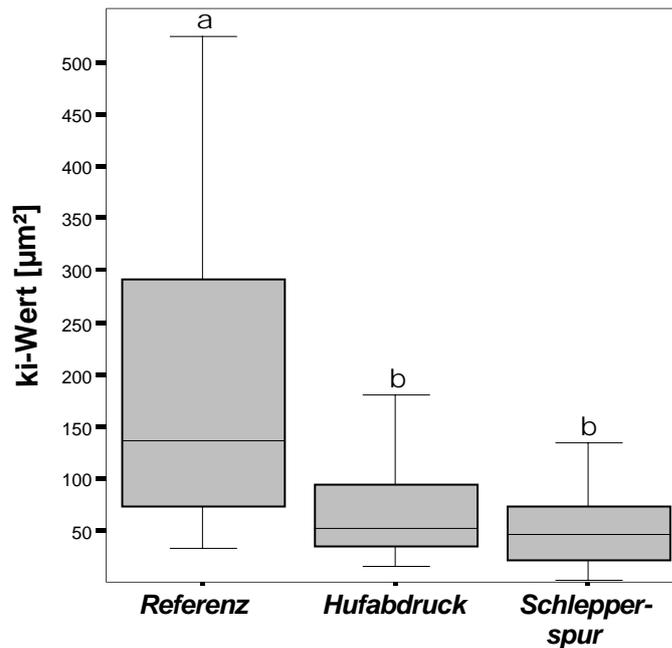
Die  $k_i$ -Werte aus den Proben in der Spur des Schleppers sind anhand der deskriptiv statistischen Darstellung in Tabelle 46 charakterisiert. Hier ist zu erkennen, dass die Durchlüftung der Bodenprobe mit einem mittleren  $k_i$ -Wert von  $77 \mu\text{m}^2$  in der zweiten Beprobungstiefe um  $11 \mu\text{m}^2$  höher ausfiel als in der ersten Tiefenstufe. Die Standardabweichung betrug  $67,17 \mu\text{m}^2$  (Tiefenstufe 1) und  $73,47 \mu\text{m}^2$  (Tiefenstufe 2). Betrachtet man die Differenz der Mediane zwischen den Tiefenstufen, so zeigt sich, dass diese mit  $-4 \mu\text{m}^2$  geringer ausfiel als der Unterschied der Mittelwerte. Mit dem U-Test kann auch in dieser Versuchsvariante kein signifikanter Unterschied der dargestellten mittleren Tendenz zwischen den  $k_i$ -Werten der Tiefenstufen ausgewiesen werden. Ordnet man die Mediane dieser Befahrungsvariante der Klassifikation nach Bruggenwert (EIJKELKAMP, 1983) zu, so liegt in der Variante *Schlepperspur* eine mäßig–geringe Bodendurchlüftung für beide Tiefenstufen vor.

### 6.3.4.3 Vergleich der Luftpermeabilität zwischen den Zugmittelvarianten

Wie in Kapitel 6.3.4.2 aufgezeigt, lagen in den drei untersuchten Varianten zwischen den  $k_i$ -Werten der jeweiligen Tiefenstufen keine signifikanten Unterschiede der zentralen Tendenzen vor. Eine Gegenüberstellung der berechneten Luftpermeabilitäten zwischen den Varianten *Referenz*, *Hufabdruck* und *Schlepperspur* kann sich daher im Folgenden auf  $k_i$ -Werte der ersten Tiefenstufe stützen (vgl. Tabelle 46).

Im Box-Plot<sup>6</sup> der Abbildung 26 sind die Ergebnisse der berechneten  $k_i$ -Werte grafisch dargestellt. Hier wird deutlich, dass die konvektive Leitfähigkeit der Bodenluft in der Referenzfläche günstiger zu beurteilen ist als in den von der schlepper- und pferdegezogenen Konstruktion des *Meinberg Wundstreifenpflugs* bearbeiteten Flächen. Zieht man die Klassifikation der  $k_i$ -Werte nach KREMER (1998) für Waldböden heran, so ist der Ausgangszustand des Oberbodens mit einem Median von  $136 \mu\text{m}^2$  als beeinträchtigt einzustufen. Die Werte dieser ungestörten Variante unterschieden sich sehr, so fiel auch der Mittelwert mit  $190 \mu\text{m}^2$  höher aus und war an der nach Kremer definierten Schranke zum unbeeinträchtigten Boden angesiedelt.

<sup>6</sup> In einem Boxplot (bzw. Box-and-Whisker-Plot) wird die Lage der Werte unterschiedlicher Gruppen grafisch miteinander verglichen. Ein Boxplot stellt die Quartile, d. h. das 25 %-, 50 %- (=Median) und 75 %-Perzentil, sowie das Maximum und Minimum der Daten durch die Querstriche ober- und unterhalb der Box dar. Darüber hinaus werden Ausreißer durch Kreise und Extremwerte durch Sterne abgebildet.



**Abbildung 26: Ki-Werte im mineralischen Oberboden (0–6 cm) in Abhängigkeit der untersuchten Zugmittelvarianten. Verschiedene Kleinbuchstaben oberhalb der Whisker kennzeichnen signifikante Unterschiede ( $\alpha = 0,05$ ) der zentralen Tendenz auf Basis des Kruskal-Wallis-H-Tests**

Die Bodenproben unterhalb des Pferdehuftritts und der Spur des Schleppers wiesen eine in Bezug auf den Median im Mittel ca. um 36 % verringerte Luftpermeabilität gegenüber den Werten in der Referenzfläche auf. Die vorliegenden Unterschiede wies der H-Test nach Kruskal-Wallis als gesichert aus. Die Bodenbelüftung unter der durch Betritt des Pferdehufs beeinflussten Bodenproben wird nach der Kremer-Klassifikation als beeinträchtigt eingestuft, verschiebt sich hier jedoch mit einem Median von  $52 \mu\text{m}^2$  an die untere Klassengrenze. In der Variante *Schlepperspur* wurde ein Median von  $47 \mu\text{m}^2$  erfasst, so dass die von KREMER (1998) definierte Schranke von  $50 \mu\text{m}^2$  unterschritten und die Luftleitfähigkeit als kritisch eingestuft wird.

Für die sich nur gering voneinander unterscheidenden Mediane zwischen den Bodenproben unter der Fahrspur und dem Huf von  $5 \mu\text{m}^2$  wies der H-Test nach Kruskal-Wallis auf keine signifikanten Unterschiede hin.

## 6.4 Humanphysiologische Messungen

### 6.4.1 Herzschlagfrequenz des Pferdeführers

#### 6.4.1.1 Datenbasis

Die Charakterisierung der Arbeitsschwere des Pferdeführers geschah wie im Kapitel 5.4.2 dargestellt über den Beanspruchungsparameter der Herzschlagfrequenz. Hierzu wurden nach einer Überprüfung und Bereinigung von Artefakten auf Basis der im PhysioLogger gespeicherten EKG-Datensätze die Herzschlagfrequenzen ( $\text{min}^{-1}$ ) für die jeweiligen Bearbeitungsvarianten berechnet. Um das Beanspruchungsniveau des Pferdeführers innerhalb der vorgestellten Arbeitsaufgaben zu ermitteln, mussten die Datensätze der Herzschlagfrequenz mit den synchronisierten Zeitstudienresultaten zu einer gemeinsamen Datei in SPSS zusammengefügt werden.

Diese Datensätze erlaubten die Berechnung verschiedener Kenngrößen, wie z. B. die absolute Herzschlagfrequenz, deren Verhältnis zur individuellen Dauerleistungsgrenze sowie den Gesamtverlauf der Herzschlagfrequenz einer Tagesschicht, zur Beurteilung der aus den Feldmessungen getrennt nach Verfahren und Bestand erfassten Werte. Ausgehend von der synchronisierten Gesamtdatei erfolgte die Berechnung der im Folgenden dargestellten zeitlich gewichteten Mittelwerte innerhalb entsprechender Tätigkeiten.

Eine statistische Analyse der Herzschlagfrequenzwerte entsprechender Beurteilungsgrößen fand nach positiver Überprüfung auf Vorliegen einer Normalverteilung der Daten nach dem Kolmogoroff-Smirnoff-Einstichprobenstest statt. Die Überprüfung der jeweiligen Mittelwertdifferenzen verlief somit über den t-Test bei gegebenem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$ .

### 6.4.1.2 Absolute Herzschlagfrequenzen

In Tabelle 47 sind die arithmetischen Mittelwerte der absoluten Herzschlagfrequenz des Probanden während der ausgewiesenen Tätigkeitsklassen in Abhängigkeit der Arbeitsverfahren und Versuchsbestände dargestellt. Eine ausführliche Übersicht der deskriptiven Statistiken ist dem ANHANG VIII zu entnehmen.

Tabelle 47 zeigt, dass die Mittelwerte der Herzschlagfrequenz des Pferdeführers während der Gesamttätigkeit (GT) in einem Bereich von ca. 108–131  $\text{min}^{-1}$  relativ stark variierten.

**Tabelle 47: Mittelwerte der Herzschlagfrequenzen des Pferdeführers während der Bearbeitung der Versuchsflächen**

Verfahren / Bestand		Mittelwerte der Herzschlagfrequenz [ $\text{min}^{-1}$ ]				
		PT <sup>a)</sup>	ST <sup>b)</sup>	MW-Diff <sup>c)</sup>	GT <sup>d)</sup>	MW-Diff <sup>e)</sup>
<b>Eberswalder Streifenpflug</b>	<i>I</i>	108,0	108,4	<b>-0,4</b>	108,1	<b>-13,2<sup>*</sup></b>
	<i>II</i>	120,2	122,3	<b>-2,1<sup>*</sup></b>	121,3	
<b>Meinberg Wundstreifenpflug</b>	<i>I</i>	123,8	123,5	<b>0,3</b>	123,7	<b>4,2<sup>*</sup></b>
	<i>II</i>	118,1	121,8	<b>-3,7<sup>*</sup></b>	119,5	
<b>EggeSaat</b>	<i>I</i>	110,4	105,8	<b>4,6<sup>*</sup></b>	108,6	<b>-15,8<sup>*</sup></b>
	<i>II</i>	124,9	124,0	<b>0,9<sup>*</sup></b>	124,4	
<b>ÖkoSat/U</b>	<i>I</i>	109,0	109,3	<b>-0,3</b>	109,0	<b>-21,9<sup>*</sup></b>
	<i>II</i>	129,7	132,0	<b>-2,3<sup>*</sup></b>	130,9	
<b>Weilmünster Waldgrubber</b>	<i>I</i>	114,9	114,2	<b>0,7</b>	114,5	<b>-4,4<sup>*</sup></b>
	<i>II</i>	118,4	119,2	<b>-0,8<sup>*</sup></b>	118,9	

a) Primärtätigkeit (PT) vgl. Kapitel 5.2.3  
b) Sekundärtätigkeit (ST) vgl. Kapitel 5.2.3  
c) Differenz der Mittelwerte (MW) zwischen den Tätigkeitsklassen (PT–ST); \* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  (t-Test)  
d) Gesamttätigkeit (GT) vgl. a. Kapitel 5.2.3  
e) Differenz der Mittelwerte (MW) innerhalb der Gesamttätigkeit zwischen den Versuchsbeständen I und II; \* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  (t-Test)

Im Versuchsbestand I wurden bei den Verfahren durchschnittliche Herzschlagfrequenzen von 108–123  $\text{min}^{-1}$  gemessen. Der höchste Wert (123,7  $\text{min}^{-1}$ ) wurde am ersten Versuchstag im

Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* erfasst. Dieser Wert erscheint aus physiologischen Aspekten beim Einsatz dieses Pfluges deutlich überhöht und ist wahrscheinlich dadurch zu erklären, dass der Beginn der Projektstudien den Probanden offensichtlich psychisch-mental stärker beanspruchte als an den übrigen Versuchstagen. Der im ANHANG VIII aufgeführte Vergleich der Herzschlagfrequenz im Rahmen der Flächenbearbeitungen mit diesem Verfahren veranschaulicht, dass während der ersten Flächenbearbeitung im Bestand I eine maximale Herzschlagfrequenz von  $132 \text{ min}^{-1}$  auftrat, während sie mit den folgenden Bearbeitungseinheiten abnahm. Der über alle Teilflächen berechnete Mittelwert während der GT ist somit stärker von den geschilderten erhöhten Herzschlagfrequenzwerten beeinflusst. Eine knappe Woche später verhielt sich die mittlere Herzschlagfrequenz im Versuchsbestand II wie erwartet, sie stieg im Tagesverlauf an und erreichte eine annähernd gleich bleibende Auslenkung, den sogenannten Steady State (vgl. Abbildung 19). In den übrigen Verfahren bewegten sich die zeitlich gewichteten Mittelwerte der Herzschlagfrequenz in einem Bereich von maximal 6 Pulsen (Differenz zwischen dem Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* und *Weilmünster Waldgrubber*).

Die Ergebnisse des vergleichenden t-Tests für die vorliegenden Mittelwertdifferenzen zwischen den Versuchsbeständen (vgl. Tabelle 47) verdeutlichen, dass sich die Mittelwerte der Herzschlagfrequenz des Bestandes II signifikant von denen der ersten Bestandsvariante unterschieden. In der Regel konnten im Bestand II höhere Werte erfasst werden, die bereits dargestellte Ausnahme stellte das Arbeitsverfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* dar. Die deutlichste Differenz wies das Verfahren *ÖkoSat/U* mit einer um  $21 \text{ min}^{-1}$  höheren Frequenz auf. Für diesen Anstieg war die ungünstige Flächenausprägung (v. a. Schlagabraum) verantwortlich, was sich u. a. über den im Kapitel 4.4.2 dargestellten hohen Anteil der Sekundärtätigkeit der manuellen Flächenräumung auf die Beanspruchung des Probanden auswirkte. Das spiegelte sich auch in den erhöhten Herzschlagfrequenzen während der Sekundärtätigkeiten ( $+2,3 \text{ min}^{-1}$  gegenüber  $129,7 \text{ min}^{-1}$  bei der PT) wider. Auch die Verfahren *EggeSaat* ( $+16 \text{ min}^{-1}$ ) und *Eberswalder Streifenpflug* ( $+13 \text{ min}^{-1}$ ) ließen einen deutlichen Anstieg der Herzschlagfrequenz des Probanden in den Teilflächen der zweiten Bestandsvariante erkennen, während sie hier beim *Weilmünster Waldgrubber* um lediglich 4 Pulse zunahm.

Eine weitere Untergliederung der Mittelwerte der Herzschlagfrequenz in Primär- und Sekundärtätigkeiten innerhalb der untersuchten Arbeitsverfahren und Bestandsverhältnisse ergab, dass sich im Versuchsbestand I mit Ausnahme beim Verfahren *EggeSaat* die mittleren Herzschlagfrequenzen des Probanden während der ausgewiesenen Tätigkeiten nicht signifikant unterschieden. Beim Verfahren *EggeSaat* fiel die mittlere Herzschlagfrequenz während der Primärtätigkeit um  $4,6 \text{ min}^{-1}$  signifikant höher aus als während der Sekundärtätigkeit. Auch in der zweiten Bestandsvariante zeigte sich diese Mittelwertdifferenz zwischen den Tätigkeiten. In den übrigen Verfahren konnte hingegen in den Versuchsflächen des Bestandes II eine signifikant höhere Herzschlagfrequenz in den Sekundärtätigkeiten erfasst werden, dieser Unterschied betrug beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* lediglich  $0,8 \text{ min}^{-1}$ , beim *Eberswalder Streifenpflug* und *ÖkoSat/U* annähernde  $2,0 \text{ min}^{-1}$ . Die größte Differenz der mittleren Herzschlagfrequenz zwischen Primär- und Sekundärtätigkeit von  $3,7 \text{ min}^{-1}$  wurde während der Bodenverwundung mit dem *Meinberg Wundstreifenpflug* erfasst.

Wie dargestellt traten signifikant erhöhte Herzschlagfrequenz-Mittelwerte des Pferdeführers im Bestand II auf, die wahrscheinlich auf die dort vorhandenen Geländeverhältnisse (steilere Lage, Schlagabraum) zurückzuführen waren. Das Gehen am Hang (sprich im Rahmen der Arbeitsaufgabe, dass Führen der Pferde) ist bereits beanspruchender als in ebenen Lagen. Ob es jedoch auch anstrengender ist als das Entfernen von Schlagabraum, sollte separat geprüft werden. Um diesen Aspekt zu analysieren, wurden die einzelnen Teilflächen der zweiten Bestandsvariante anhand ihrer Flächen-Längsneigung in zwei Klassen eingeteilt, wobei die Hangneigung in Klasse 1  $\leq 7 \%$  und in Klasse 2  $> 7 \%$  betrug, und der Verfahrensaspekt *ceteris paribus* ausgeklammert. Die beiden Tätigkeiten *Saat/Verwundung* (repräsentiert hier das Gehen am Hang) und *Räumen von Hiebsresten* gehörten zu den kontinuierlichsten Ablaufab-

schnitten (vgl. Kapitel 4.3) und wurden aus diesem Grund als charakteristische Gruppierungsvariablen herangezogen. Tabelle 48 führt die mittleren Herzschlagfrequenzen des Pferdeführers in den berechneten Gruppen sowie entsprechende Mittelwertvergleiche der t-Statistik an.

Wie in Tabelle 48 zu erkennen stieg innerhalb der beiden untersuchten Tätigkeiten die mittlere Herzschlagfrequenz in der steileren Hangneigungsklasse 2 an. Bei der Saat/Verwundung konnte eine um  $4 \text{ min}^{-1}$  erhöhte Herzschlagfrequenz in der zweiten Neigungsklasse ( $123 \text{ min}^{-1}$ ) erfasst werden. Beim Räumen wurde eine Erhöhung der Frequenz um 7 Pulse ( $126 \text{ min}^{-1}$ ) registriert. Der gerechnete t-Test bestätigt, dass innerhalb der Tätigkeiten die mittlere Herzschlagfrequenz in der zweiten Stufe signifikant höher war als in ebeneren Flächen.

**Tabelle 48: Mittelwert und Standardabweichung der Herzschlagfrequenz des Pferdeführers in Abhängigkeit der klassierten Hangneigung und den Tätigkeiten im Bestand II**

Tätigkeit / Hangneigungsklasse		Herzschlagfrequenz [ $\text{min}^{-1}$ ]		MW-Diff <sup>3)</sup> [ $\text{min}^{-1}$ ]
		MW	SD	
<b>Saat/Verwundung (A1)</b>	1 <sup>1)</sup>	119,0 a	16,0	-4*
	2 <sup>2)</sup>	123,0 A	16,9	
<b>Räumen (A2)</b>	1	119,7 a	17,3	-7*
	2	126,7 B	17,6	

1) Hangneigungsklasse 1,  $\leq 7\%$   
 2) Hangneigungsklasse 2,  $> 7\%$   
 3) Differenz der Mittelwerte (MW) zwischen den Versuchsbeständen I und II; \* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  (t-Test)  
 Verschiedene Buchstaben weisen auf signifikante ( $\alpha = 0,05$ ) Mittelwertdifferenzen hin (t-Test). Kleinbuchstaben beziehen sich auf den Vergleich der Mittelwerte eines Arbeitsverfahrens innerhalb des Bestandes I und Großbuchstaben auf analoge Vergleiche innerhalb des Bestandes II

In der ersten Neigungsklasse bis  $7\%$  existierte zwischen den Aktivitäten kein signifikanter Unterschied der mittleren Herzschlagfrequenz des Pferdeführers, diese war mit ca.  $119 \text{ min}^{-1}$  nahezu identisch. Das Gehen am Hang ist demnach in der ersten Klasse ebenso belastend wie das Räumen von Hiebsresten vergangener Eingriffe, obwohl bei der letztgenannten Tätigkeit ein größerer Einsatz von Skelettmuskulatur unterstellt werden kann. In den stärker geneigten Flächen stieg die Herzschlagfrequenz des Pferdeführers innerhalb der beiden Tätigkeiten unterschiedlich stark an. Der t-Test weist für die Mittelwerte der erfassten Herzschlagfrequenzen hochsignifikante Unterschiede aus, d. h. der Einfluss des Räumens auf die Herzschlagfrequenz fiel in Klasse 2 deutlicher ( $126,7 \text{ min}^{-1}$ ) aus als der des Führens der Pferde ( $123,0 \text{ min}^{-1}$ ). Das Räumen von Hiebsresten wirkte sich in Kombination mit zunehmender Hangneigung beanspruchender auf den Pferdeführer aus als das Führen der Pferde am Hang.

#### 6.4.2 Dauerleistungsgrenze

Die Bewertung der körperlichen Arbeit über eine Klassifizierung der Arbeitsschwere erfolgt i. d. R. über die Erfassung des Energieumsatzes des arbeitenden Menschen. Hierzu wird die Intensität der Sauerstoffaufnahme bei dynamischer Ganzkörperarbeit im Rahmen von spirometrischen Messungen bestimmt. Stehen entsprechende Messmethoden nicht zur Verfügung, kann eine Abschätzung auch auf Basis der Herzschlagfrequenz stattfinden, da diese mit der Sauerstoffaufnahme und somit der inneren Leistung relativ eng korreliert. Über die Herzschlagfrequenz kann beurteilt werden, ob bei körperlichen Arbeiten in unterschiedlichen Arbeitsverfahren eine so genannte individuelle Dauerleistungsgrenze (DLG) unter- oder überschritten

wird. Dies hat den Vorteil, dass auch ohne Kenntnis des Wirkungsgrades und der abgegebenen Leistung jede Tätigkeit entsprechend beurteilt werden kann. Bei Unterschreitung der DLG kann eine Überforderung der individuellen, physiologischen Leistungsfähigkeit des arbeitenden Menschen ausgeschlossen werden (vgl. TRIEBIG ET AL., 2003).

Die Dauerleistungsgrenze ist definiert als Höchstleistung, die ohne Unterbrechung während der normalen Arbeitszeit ohne zunehmende Muskelermüdung bei täglicher Wiederholung ein ganzes Arbeitsleben lang ohne gesundheitliche Beeinträchtigung erbracht werden kann (vgl. KAMINSKY, 1971; BULLINGER, 1994; LFE, 2002; TRIEBIG ET AL., 2003). Das Niveau der Dauerleistungsgrenze wird in Bezug auf die Herzschlagfrequenz nach KAMINSKY (1971) mit 35 Pulsen über dem individuellen, im Sitzen gemessenen Ruhepuls des Probanden angegeben. In der Literatur finden sich darüber hinaus weitere Grenzwerte unterschiedlich ausgewiesener persönlicher Dauerleistungsgrenzen (vgl. KAMINSKY, 1971; BUCHBERGER, 1984 sowie BULLINGER, 1994).

Um die erfassten Herzschlagfrequenzen bei der dynamischen Arbeit des Pferdeführers mit den jeweiligen Bodenverwundungs- und Saataggregaten näher zu interpretieren, wurde für ihn eine individuelle Dauerleistungsgrenze von  $117 \text{ min}^{-1}$  unterstellt, die dem von KAMINSKY (1971) empfohlenen Grenzwert von  $35 \text{ min}^{-1}$  über der im Sitzen ermittelten Ruhe-Herzschlagfrequenz entspricht.

Bei den folgenden Betrachtungen wurden die Mittelwerte der Herzschlagfrequenzen je Verfahren während der Flächen- bzw. Streifen-Bearbeitungen berechnet. Auf eine detaillierte Auswertung durch die Untergliederung und Gegenüberstellung der einzelnen Ereignisse (Ablaufabschnitte) konnte verzichtet werden, da sich die auf die Dauerleistungsgrenze bezogene, während der Primär- und Sekundärtätigkeit ermittelte Herzschlagfrequenz nicht von der innerhalb der reinen Arbeitszeit registrierten unterschied. In Abbildung 27 sind die Ergebnisse in einem Balkendiagramm zusammengefasst.

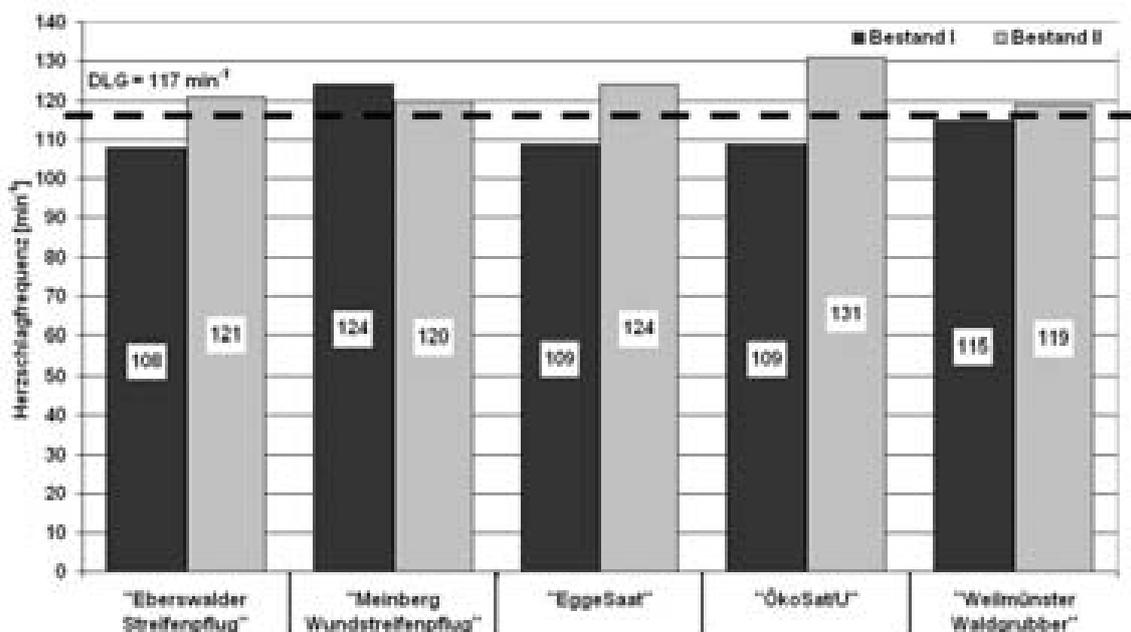


Abbildung 27: Mittelwert der Herzschlagfrequenz des Probanden in Abhängigkeit vom Arbeitsverfahren und der Bestandsvariante sowie die individuelle Dauerleistungsgrenze (DLG, gestrichelte Linie)

Die mittleren Herzschlagfrequenzen lagen bei allen Verfahren im steileren, abraumreicheren Versuchsbestand II über der persönlichen Dauerleistungsgrenze des Pferdeführers. Die durchschnittliche Überschreitung schwankte von  $2 \text{ min}^{-1}$  (*Weilmünster Waldgrubber*) bis zu  $14 \text{ min}^{-1}$  (*ÖkoSat/U*). Die ablauf- und störungsbedingten Unterbrechungen standen dem Pferdeführer nicht zwingend als Erholzeit zur Verfügung, sondern mussten nicht selten für anstrengende Tätigkeiten wie z. B. das Räumen von Hiebsresten genutzt werden (vgl. Kapitel 5.3.1).

Betrachtet man im Vergleich hierzu die Werte des Versuchsbestandes I, so zeigt sich unter diesen gemäßigten Gelände- und Abraubbedingungen, dass die verfahrensspezifischen Belastungen den Pferdeführer *ceteris paribus* geringer beanspruchten. Die mittleren Herzschlagfrequenzen lagen mit  $8\text{--}9 \text{ min}^{-1}$  unterhalb der Dauerleistungsgrenze. Eine bereits in Kapitel 6.4.1 beschriebene Ausnahme stellte das Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* dar. Nahezu identische Werte der mittleren Herzschlagfrequenz wurden bei den Verfahren *Eberswalder Streifenpflug*, *EggeSaat* und *ÖkoSat/U* erfasst. Die um  $6 \text{ min}^{-1}$  höhere Herzschlagfrequenz des Probanden im Vergleich zum Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* kann auf längere Arbeitszeiten und auf häufiges Aushebeln der Federzinken zurückgeführt werden, die den Pferdeführer stärker beanspruchten.

Auf Grundlage der körperlichen Beanspruchung existieren verschiedene Empfehlungen, um die Arbeitsschwere für Ganzkörperarbeit abzuschätzen. TRIEBIG ET AL. (2003) klassifizieren die Arbeitsschwere nach der Höhe der Herzschlagfrequenz bei dynamischer Arbeit, bei der mehr als  $1/7$  der Gesamtmuskelmasse tätig ist, für Männer als *leicht* bei  $< 90 \text{ min}^{-1}$ , *mittelschwer* bei  $90\text{--}100 \text{ min}^{-1}$ , *schwer* bei  $100\text{--}110 \text{ min}^{-1}$  und *sehr schwer* bei  $> 110 \text{ min}^{-1}$ . Unter den für den Pferdeinsatz einfacheren Verhältnissen des Bestandes I weisen die Herzschlagfrequenzen auf eine *mittelschwere* Belastung des Probanden hin, während unter den abraumreicheren und steileren Flächenausprägungen des Bestandes II die körperliche Belastung des Pferdeführers je nach Arbeitsverfahren im Übergangsbereich der *schweren* bis *sehr schweren* Arbeit einzugliedern ist.

Ein ermüdungsbedingter Anstieg der Herzschlagfrequenz über den Arbeitstag konnte aufgrund der versuchsbedingten Unterbrechungen und dem Erhebungskonzept der Gesamtstudie nicht näher untersucht werden.

## 6.5 Tierphysiologische Messungen

### 6.5.1 Zugkraft zwischen Pferd und Betriebsmittel

#### 6.5.1.1 Datenbasis

Die Erfassung der in dem jeweiligen Arbeitsverfahren durch das Pferd (P1) aufzubringenden Zugkraft erfolgte über deren Registrierung zwischen Tier und Betriebsmittel (vgl. Kapitel 5.5.1). Die im *PhysioLogger* gespeicherten Daten wurden im ASCII-Format ausgelesen und mit den Ergebnissen des Arbeitsablaufstudiums synchronisiert, so dass diese Gesamtdatenbasis Informationen getrennt nach Versuchsbeständen, Arbeitsverfahren sowie den ausgewiesenen Tätigkeiten für die Auswertung vorhielt. In der streifenweisen Bearbeitungsvariante wurde darüber hinaus die Bearbeitungsgeschwindigkeit erfasst, um über deren Multiplikation mit der Zugkraft in horizontaler Richtung die äußere Leistung des Pferdes im Sinn der Arbeitsaufgabe zu berechnen (vgl. Kapitel 5.5.1).

Die durch die auszuübende Zugkraft auf das Pferd einwirkende Arbeitsbelastung wurde aus den Daten der praxisnahen Bearbeitungsvariante abgeleitet. Wie bereits in Kapitel 4.3 beschrieben, unterschieden sich hierbei die Arbeitsabläufe der einzelnen Verfahren sehr deutlich.

Die Neben- und Zusatzaktivitäten sowie die Störungsunterbrechungen verursachten stets ein vollständiges Absinken jeglicher Zugkräfte. Deren Vergleich muss sich demnach auf die Primärtätigkeit beschränken. Eine Gegenüberstellung der zeitlich gewichteten Mittelwerte während der Gesamttätigkeit (GT) und der separat betrachteten Primärtätigkeit (PT) wird für die praxisnahe Variante dargestellt.

Im Rahmen der Datenaufbereitung wurden die frequenzüberlagerten Zugkraftwerte zunächst mit Hilfe einer Filterroutine identifiziert, zudem visuell ergänzt bzw. korrigiert und im Anschluss bereinigt. Die vorliegenden Daten wiesen innerhalb weniger Sekunden oftmals eine Vielzahl von Spitzenwerten auf. Für eine weitere Verarbeitung wurde der gleitende Mittelwert aus drei umliegenden Messwerten berechnet.

Größere Datenverluste ergaben sich während der Bearbeitung mit dem *Meinberg Wundstreifenflug*, weil in der zweiten Bestandsvariante aufgrund technischer Probleme bei der telemetrischen Datenübertragung der gespeicherte Datenumfang nach einer Artefaktbereinigung zu gering war und für eine weitere Auswertung nicht herangezogen werden konnte.

Eine statistische Analyse der Daten erfolgte nach Überprüfung auf Normalverteilung innerhalb der zu vergleichenden Gruppen mit Hilfe des Kolmogoroff-Smirnoff-Tests. Für alle Stichproben konnte die Normalverteilung angenommen werden, somit wurde zum Vergleich der jeweiligen Mittelwerte der t-Test bzw. für mehrere Stichproben der Tukey-Test herangezogen. Als Signifikanzniveau wurde jeweils 5 % unterstellt ( $\alpha = 0,05$ ).

### 6.5.1.2 Zugkräfte bei der Bearbeitung von geraden Strecken

In dieser Variante wurden Zugkräfte berücksichtigt, die im Rahmen einer Bearbeitung der markierten Streifen in den ausgewiesenen Teilflächen auftraten. Im Vergleich zur praxisnahen, spiralförmigen Variante wurden hier jegliche Wendemanöver ausgeblendet, so dass ein kontinuierlicher und für die Verfahren auf gerader Strecke typischer mittlerer Zugkraftbedarf registriert werden konnte.

Der Winkel, der sich aus dem Anspannen des Pferdes P1 vor dem jeweiligen Aggregat ergab, betrug im Durchschnitt beim *Eberswalder Streifenflug*  $15^\circ$ , während er beim *Meinberg Wundstreifenflug* um  $5^\circ$  flacher war. Die gemessene Zugkraft reduzierte sich somit auf die effektive Kraft in horizontaler Richtung am Anhängepunkt des Aggregates für den *Eberswalder Streifenflug* um 24 %, während beim *Meinberg Wundstreifenflug* der anhebende Effekt geringer ausfiel. Hier konnte eine effektive Zugkraft am Aggregat berechnet werden, die um 16 % geringer ausfiel als die im Geschirr erfasste. Eine Berechnung der durch das Pferd aufgebrachten äußeren Leistung innerhalb der Streifen erfolgte durch die Multiplikation der sich durch eine Winkelkorrektur ergebenden effektiven Zugkraft und der Bearbeitungsgeschwindigkeit.

Unter den einfacheren Bestandsverhältnissen in Bestand I wurden durchschnittliche Werte der aufgeführten Parameter erfasst, die sich für die beiden Bodenverwundungsverfahren kaum unterschieden. Tabelle 49 weist die Mittelwerte der Geschwindigkeit, der effektiven Zugkraft sowie der Leistung aus. Weitere Angaben zu Parametern der deskriptiven Statistik sind im ANHANG IX aufgeführt. Es zeigt sich, dass in der ersten Bestandsvariante die Geschwindigkeit beim Verfahren *Meinberg Wundstreifenflug* lediglich um  $0,02 \text{ m s}^{-1}$  höher war, während eine nicht signifikant höhere Differenz der effektiven Zugkraft (7 N) und der Leistung (7 W) im Verfahren *Eberswalder Streifenflug* erfasst wurde.

**Tabelle 49: Arithmetische Mittelwerte der Geschwindigkeit, effektiven Zugkraft und äußeren Leistung in der streifenweisen Bearbeitungsvariante in Abhängigkeit der Arbeitsverfahren und Bestandsvariante sowie die Mittelwertdifferenzen der äußeren Leistungen zwischen den Versuchsbeständen**

Verfahren / Bestand		Geschwindigkeit [m s <sup>-1</sup> ]	Effektive Zugkraft [N]	Leistung [W]	MW-Diff <sup>a)</sup> [W]
<i>Eberswalder Streifenpflug</i>	<i>I</i>	0,96	324	328 a	237*
	<i>II</i>	0,63	138	91 A	
<i>Meinberg Wundstrei- fenpflug</i>	<i>I</i>	0,98	316	321 a	k. A.
	<i>II</i>	k. A.	k. A.	k. A.	
<i>EGgeSaat</i>	<i>I</i>	0,78	598	538 a,b	331*
	<i>II</i>	0,60	291	207 A	
<i>ÖkoSat/U</i>	<i>I</i>	0,92	441	431 a	227
	<i>II</i>	0,76	255	204 A	
<i>Weilmünster Waldgrubber</i>	<i>I</i>	0,55	240	139 a,c	72*
	<i>II</i>	0,35	162	67 A	

<sup>a)</sup> Differenz der Mittelwerte (MW) zwischen den Versuchsbeständen I und II; \* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  (t-Test)

Verschiedene Buchstaben weisen auf signifikante ( $\alpha = 0,05$ ) Mittelwertdifferenzen hin (Tukey-Test). Kleinbuchstaben beziehen sich auf den Vergleich der Mittelwerte eines Arbeitsverfahrens innerhalb des Bestandes I und Großbuchstaben auf analoge Vergleiche innerhalb des Bestandes II

Bei den untersuchten Saatverfahren ist zu erkennen, dass die erzielten Bearbeitungsgeschwindigkeiten zwischen  $0,55 \text{ m s}^{-1}$  beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber*,  $0,78 \text{ m s}^{-1}$  (*EGgeSaat*) und  $0,92 \text{ m s}^{-1}$  (*ÖkoSat/U*) deutlich variierten. Der Berechnung der effektiven Zugkraft lagen Winkel zugrunde, die für das Betriebsmittel *EGgeSaat* mit  $10^\circ$  mit dem *Meinberg Wundstreifenpflug* übereinstimmten. Durch den vorgeschalteten Rückewagen fiel bei der *ÖkoSat/U* der Winkel mit  $6^\circ$  relativ flach aus. Beim *Weilmünster Waldgrubber* ergab sich eine Reduktion der registrierten Zugkraft durch einen Zugwinkel von  $12^\circ$ . Die vom Pferd aufgebrachte effektive Zugkraft auf die horizontale Kraft in Zugrichtung reduzierte sich um 16 % bei den Verfahren *EGgeSaat* und *Weilmünster Waldgrubber*, während sie beim Verfahren *ÖkoSat/U* nur um 4 % geringer ausfiel als die im Kuntgeschirr registrierte. Die höchste effektive Zugkraft mit 598 N wurde im Verfahren *EGgeSaat* erfasst, während im Verfahren *ÖkoSat/U* mit 441 N eine geringere Kraft in horizontaler Richtung registriert wurde. Im Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* wirkten im Mittel 240 N, dies ist der geringste Wert im vorliegenden Verfahrenvergleich.

Betrachtet man die Mittelwerte der äußeren Leistung im Sinn der Arbeitsaufgabe, so ergibt sich eine entsprechende Reihung der Arbeitsverfahren (vgl. Tabelle 49). Mit ca. 139 W hatte das Pferd im Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* in der ersten Bestandsvariante die geringste Leistung wie auch Geschwindigkeit und Zugkraft für die Flächenbearbeitung aufzubringen. Die höchste Leistung wurde im Verfahren *EGgeSaat* mit nahezu 540 W registriert. Die daraus resultierende Leistungsdifferenz von ca. 400 W ist im Verfahrenvergleich dieser Bestandsvariante die höchste und allein signifikante. Die Mittelwerte der übrigen Verfahren liegen in einem Bereich von 321–431 W.

Wie bereits in Kapitel 6.1.1 angeführt, kam es in der zweiten Bestandsvariante zu einem deutlich diskontinuierlicheren Arbeitsablauf aller untersuchten Arbeitsverfahren. Dies spiegelt sich auch in den geringeren Geschwindigkeiten wider. Des Weiteren ereigneten sich häufigere Un-

terbrechungen z. B. während der Flächenräumung, woraus eine geringere effektive Zugkraft resultierte (vgl. ANHANG IX). Die Auswirkungen der für den Pferdeinsatz ungünstigen Bestandsverhältnisse im Bestand II auf die Leistung des Pferdes P1 werden in Tabelle 49 dargestellt. Bei den Verfahren der Bodenverwundung erlaubten die zur Verfügung stehenden Daten lediglich beim Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* den Vergleich der mittleren Leistungen zwischen den Beständen. Hier wurde eine um 236 W geringere durchschnittliche Leistung in den Strecken der zweiten Bestandsvariante erfasst. Bei den Saatverfahren unterschied sich die Leistung im Mittel beim Verfahren *EggeSaat* zwischen den Beständen ebenfalls signifikant um 331 W, während für die Mittelwertdifferenz von 227 W im Verfahren *ÖkoSat/U* der t-Test keinen signifikanten Unterschied auswies. Die geringsten signifikanten Einbußen in der Leistung wies das Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* auf, die sich um 72 W gegenüber der ersten Bestandsvariante reduzierte. Ein Vergleich von den Mittelwerten der Leistung im Bestand II zwischen den Verfahren zeigt, dass der größte, jedoch nicht signifikante Unterschied mit 140 W wie bereits in der ersten Bestandsvariante zwischen den Verfahren *EggeSaat* und *Weilmünster Waldgrubber* vorlag.

Wie dargestellt verringerte sich unter den Verhältnissen im Bestand II wider Erwarten die am Aggregat wirkende Leistung, da davon ausgegangen werden konnte, dass sich in den Hanglagen durch die zunehmende Zugkraft bergauf einhergehend mit gesteigerten Geschwindigkeiten auch höhere Leistungen einstellen. Eine detaillierte Betrachtung der Messwerte unter Berücksichtigung der Hangneigung sowie der Klassierung in *bergauf* und *bergab* zeigte jedoch bei den statistischen Analysen keine abgesicherten Mittelwertdifferenzen oder Korrelationen zwischen Leistung und klassierter Hangneigung.

Die verfahrensspezifischen Auswirkungen auf die registrierten Zugkräfte sowie entsprechende Erklärungsansätze in Bezug auf die verringerte Zugkraft im Bestand II werden in Kapitel 6.5.1.3 angeführt.

### 6.5.1.3 Zugkräfte bei der praxisnahen Bearbeitung

Während die vergleichende Darstellung der Verfahren bzgl. der äußeren Leistungen in Kapitel 6.5.1.2 zu Lasten der Praxisnähe ging, werden im Folgenden zur Darstellung der Arbeitsbelastung des Pferdes die registrierten Zugkräfte während der vollständigen Bearbeitung von einzelnen Teilflächen dargestellt. Diese Versuchsvariante berücksichtigt den typischen Arbeitsablauf und beinhaltet somit sämtliche Wendemanöver und vor allem den gemäß der Arbeitsaufgabe verfahrenstypischen Bearbeitungsgrad sowie Zeitverbrauch. Damit einhergehend wirken sich die unterschiedlichen Zeitanteile für Neben- und Zusatzaktivitäten sowie Störungen in Abhängigkeit des Verfahrens auf die zeitlich gewichteten Mittelwerte der registrierten Zugkraft aus. So zeigt sich anhand Tabelle 50, dass die Mittelwerte der gemessenen Zugkraft während der Gesamttätigkeit in dieser Bearbeitungsvariante geringer ausfielen als bei der Bearbeitung gerader Strecken. Eine Abschätzung der Belastung des Pferdes durch die aufzubringende Zugkraft muss sich demnach auf die Arbeit des Pferdes und somit auf die ausgewiesene Primärtätigkeit stützen (vgl. Kapitel 6.1.1).

Die im Rahmen der Bodenverwundung untersuchten Arbeitsverfahren wiesen die in Tabelle 57 dargestellten mittleren Zugkräfte innerhalb der ausgeschiedenen Tätigkeitsklassen auf. Die ermittelten Zugkräfte innerhalb der Primärtätigkeit fielen im Vergleich zu den Werten der Gesamttätigkeit ca. doppelt so hoch aus. Die durchschnittlich registrierten Zugkräfte in den Bestandsvarianten beim Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* unterschieden sich signifikant voneinander.

**Tabelle 50: Mittelwerte der gemessenen Zugkraft in den untersuchten Arbeitsverfahren bei praxisnaher Bearbeitung in beiden Bestandsvarianten**

Verfahren / Bestand		MW [N]		MW-Diff <sup>1)</sup> [N]
		GT	PT	
<i>Eberswalder Streifenpflug</i>	I	354	711	277*
	II	175	434	
<i>Meinberg Wundstreifenpflug</i>	I	303	606	k. A.
	II	k. A.	k. A.	
<i>EggeSaat</i>	I	332	951	61
	II	153	890	
<i>ÖkoSat/U</i>	I	206	642	-409*
	II	172	1.051	
<i>Weilmünster Waldgrubber</i>	I	69	972	-261*
	II	84	1.233	

<sup>1)</sup> Differenz der Mittelwerte (MW) innerhalb der Primärtätigkeit (PT) zwischen den Versuchsbeständen I und II; \* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  (t-Test)

Die Werte im Rahmen der Primärtätigkeit im Bestand II (434 N) waren um ca. 40 % geringer als die für den Bestand I mit 711 N. Die deutlich niedrigeren Werte in den Versuchsflächen des Bestandes II widersprachen auch hier den Erwartungen, da aufgrund der Flächenausprägung (Hangneigung und Schlagabraum) eher damit gerechnet werden konnte, dass die mittlere Zugkraft ansteigt. In diesem Fall kam es allerdings zu einer diskontinuierlichen Freilegung des Mineralbodens (vgl. Kapitel 6.3.1), da der *Eberswalder Streifenpflug* mit seinem vorgeschalteten Scheibenkolter häufig über die Hiebsreste, vor allem Astmaterial rollte, ohne dass das Schar ausreichend tief in den Boden eindringen konnte. Somit wurden die zur Bearbeitung des Bodens notwendigen Kräfte weitgehend reduziert und das im Vergleich zu den anderen Betriebsmitteln mit 150 kg eher leichte Aggregat lediglich über den Boden gezogen.

Beim Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* konnten wiederum nur Daten aus den Bearbeitungen der ersten Bestandsvariante für eine Auswertung genutzt werden (vgl. Kapitel 6.5.1.1). Die in diesem Verfahren gemessene mittlere Zugkraft von 606 N war im Vergleich zum *Eberswalder Streifenpflug* um ca. 25 % geringer. Beim *Meinberg Wundstreifenpflug* sind die beiden Scheibeneggen in Zugrichtung rollend an der Tragachse gelagert, so können Bearbeitungswiderstände während der Bodenverwundung durch Schneiden vermindert werden. Dies lässt jedoch die Vermutung zu, dass auch bei diesem Verfahren Hindernisse, insbesondere Astmaterial vergangener Eingriffe überrollt wurden, ohne dass der Boden ausreichend bearbeitet und demzufolge die daraus resultierenden Kräfte reduziert wurden.

Der Mittelwert der Zugkraft während der Primärtätigkeiten der untersuchten Saatverfahren fiel im Vergleich zu den Bodenverwundungsverfahren in beiden Bestandsvarianten höher aus. Vor allem der Unterschied zwischen den Mittelwerten der Gesamt- und der Primärtätigkeit fiel mit einer um das Mehrfache erhöhten Zugkraft deutlich aus. Im Verfahren *EggeSaat* brachte das Pferd P1 in den Versuchsflächen der zweiten Bestandsvariante mit 890 N eine im Vergleich zum Bestand I um 61 N geringere mittlere Zugkraft auf. Diese geringe Differenz der Mittelwerte

konnte der durchgeführte t-Test als nicht gesichert bestätigen. Bei diesem Verfahren kam das Betriebsmittel *Meinberg Wundstreifenpflug* zum Einsatz, weswegen Hindernisse überrollt und somit die sich aus der Bodenbearbeitung ergebenden Widerstände v. a. durch den erhöhten Anteil an Hiebsresten in den Flächen des Bestandes II herabgesetzt wurden.

Im Verfahren *ÖkoSat/U* wurde zwischen Pferd P1 und Aggregat eine mittlere Zugkraft von 642 N in den Flächen des Bestandes I erfasst. In der zweiten Bestandsvariante ergab sich in erster Linie durch die starken Einbußen in der Kontinuität des Ablaufs ein signifikant höherer Mittelwert der Zugkraft von 1.051 N. Die Ereignisse der Sekundärtätigkeit vermehrten sich somit um ca. 30 % und die Unterbrechungen erzwangen ein häufiges Anziehen des Aggregates durch die Pferde. In Kombination mit der im Vergleich zu den übrigen Verfahren großen Tiefenwirkung der Scheibeneggen und der hohen Eigenmasse von 450 kg sowie der Hangneigung bedurfte es eines höheren Kraftaufwandes des Pferdes P1.

Während bei der streifenweisen Bearbeitungsvariante sowie innerhalb der praxisnahen Bearbeitung bei Betrachtung der Gesamttätigkeit (GT) die Zugkräfte im Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* deutlich geringer ausfielen als innerhalb der übrigen untersuchten Arbeitsverfahren, wies dieses Saatverfahren im Verfahrenvergleich während der Primärtätigkeiten mit 972 N im Bestand I die höchste mittlere Zugkraft auf. Im zweiten Bestand erhöhte sich die durchschnittliche Zugkraft um 27 % auf 1.233 N. Auch hier lagen signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Beständen vor. Diese deutliche Differenz zu den Ergebnissen aus den Zugkraftwerten der Gesamttätigkeit ergab sich vor allem aus den in den Boden eingreifenden Federzinken, der Eigenmasse von 340 kg und der Hangneigung in der zweiten Bestandsvariante. Der sehr häufig unterbrochene Bearbeitungsvorgang wurde mit ausgehebelten Federzinken und somit einer Eliminierung der Bodenkräfte wieder aufgenommen, so dass für das Anziehen eine geringere Kraft durch das Pferd aufgebracht werden musste. Brachte der Pferdeführer dann die Federzinken in den Bearbeitungszustand, trat ruckartig ein erhöhter Zugkraftbedarf auf. Darüber hinaus stellten die flachstreifenden Wurzeln des Fichten-Altholzes während des Saatvorgangs häufig ein Hindernis dar, da diese ab einem gewissen Durchmesser und einer entsprechenden Länge in Kombination mit einer niedrigen Bearbeitungsgeschwindigkeit von  $0,3\text{--}0,5\text{ m s}^{-1}$  nicht mehr durch die Federzinken durchtrennt werden konnten und deshalb der Zugkraftbedarf wieder erhöht wurde. Diese unvermittelten Schläge, die über das Geschirr auf das Pferd übertragen wurden, sorgten unter anderem dafür, dass im Verfahrenvergleich der höchste Anteil des Ereignisses *Verweigerung des Pferdes* (vgl. Kapitel 5.2.3) registriert wurde.

## 6.5.2 Herzschlagfrequenz der Zugpferde

### 6.5.2.1 Datenbasis

Die sich aus den Arbeitsverfahren ergebende Beanspruchung sowie die körperliche Fitness der Versuchspferde wurden über die Erfassung und Auswertung der Herzschlagfrequenz bestimmt.

Die Datenaufbereitung und Berechnung der absoluten Herzschlagfrequenzen der Tiere im Rahmen der ausgewiesenen Tätigkeiten erfolgte analog zu dem unter Kapitel 6.4.1.1 dargestellten Vorgehen. Hieraus resultierte eine Datengrundlage mit Messwerten über den gesamten Arbeitstag zur weiteren statistischen Auswertung. Die im Folgenden dargestellten Herzschlagfrequenzen beziehen sich ausschließlich auf Auswertungen der praxisnahen Versuche, da nur diese Variante eine gemäß der Arbeitsaufgabe verfahrenstypische kontinuierliche Belastung repräsentierte und vor allem die damit einhergehende zeitliche Dauer berücksichtigte.

Wie bereits in Kapitel 6.5.1.1 erwähnt, ergaben sich Datenverluste durch messtechnische Störungen während dieser Bearbeitungsvariante. Darüber hinaus wurden auftretende (Muskel-

)Artefakte vor der statistischen Analyse visuell identifiziert und mit Hilfe von Filterroutinen interpoliert bzw. von weiteren Auswerteschritten ausgeschlossen. Im Anschluss daran standen für das Versuchspferd P1 nicht über alle Verfahren ausreichende Messwerte für die Auswertung zur Verfügung.

Die statistische Analyse der Herzschlagfrequenzwerte und entsprechender Beurteilungsgrößen fand nach positiver Überprüfung auf Normalverteilung der vorliegenden Daten über den Einstichprobentest nach Kolmogoroff-Smirnoff statt. Auf dieser Basis wurde für den Mittelwertvergleich zweier unabhängiger Stichproben der t-Test herangezogen. Als Signifikanzniveau wurde jeweils 5 % unterstellt ( $\alpha = 0,05$ ). Eine Übersicht der deskriptiven Statistik der vorliegenden Datenauswertung kann dem ANHANG X entnommen werden.

### 6.5.2.2 Individuelle Herzschlagfrequenzen der Versuchspferde

Zu Beginn wurde nach dem Anschnallen die Herzschlagfrequenz der Pferde im Stehen mit einem Stethoskop (SK) sowie dem POLAR-Messsystem *Horsetrainer* (HT) über die Dauer von acht Minuten ermittelt. Hintergrund dieser Untersuchung war die Überprüfung der Reliabilität des Messverfahrens *Horsetrainer*. Des Weiteren lieferte diese Erhebung die täglichen Bezugsherzschlagfrequenzen der Pferde vor der Belastung durch das jeweilige Arbeitsverfahren.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 51 vergleichend gegenübergestellt. Die Differenz der Herzschlagfrequenz-Mittelwerte zwischen den Messverfahren betrug für das Pferd P1  $2 \text{ min}^{-1}$  und für das Versuchspferd P2  $1 \text{ min}^{-1}$ . Der t-Test für gepaarte Stichproben lehnte die Nullhypothese identischer Gruppenmittelwerte nicht ab. Somit konnte sichergestellt werden, dass die Werte des POLAR-Messsystems unter den dargelegten Bedingungen mit Ergebnissen des Abhörens vergleichbar waren und daher die interne Validität vorhanden war.

**Tabelle 51: Mittelwert und Standardabweichung der Herzschlagfrequenz (8-Minuten-Intervall) der Versuchspferde vor Belastung in Abhängigkeit der Messmethode**

Pferd	SP	Stethoskop (SK)		<i>Horsetrainer</i> (HT)		MW-Diff <sup>1)</sup> [ $\text{min}^{-1}$ ]
		MW [ $\text{min}^{-1}$ ]	SD [ $\text{min}^{-1}$ ]	MW [ $\text{min}^{-1}$ ]	SD [ $\text{min}^{-1}$ ]	
P1	8	31 a	3	29 a	2	2
P2	4	43 b	3	42 b	3	1

<sup>1)</sup> Differenz der Mittelwerte (MW) zwischen den Messsystemen SK und HT; \* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  (t-Test)

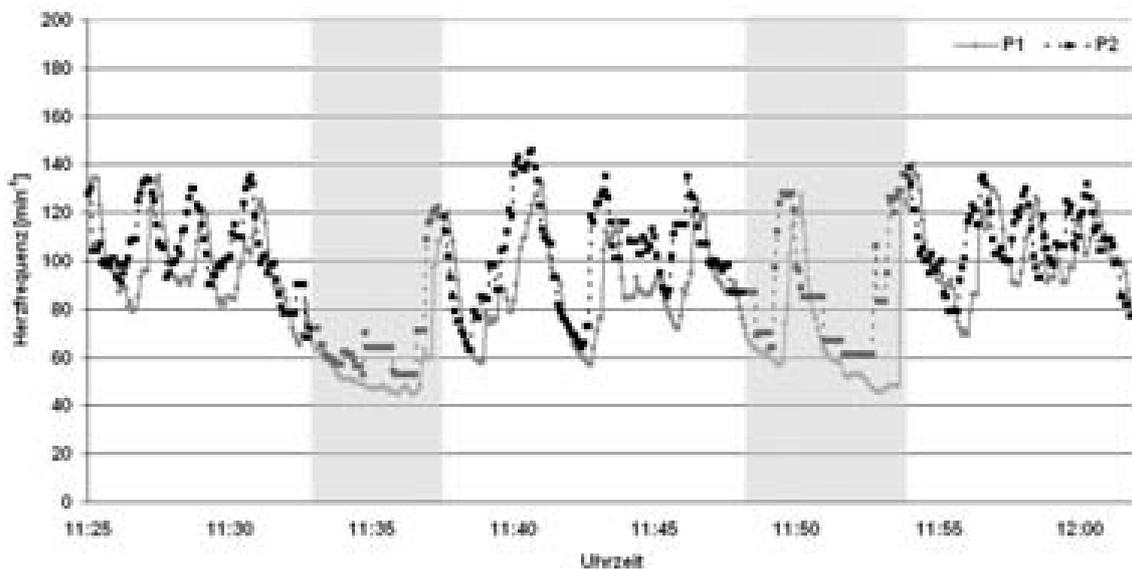
Verschiedene Buchstaben weisen auf signifikante ( $\alpha = 0,05$ ) Mittelwertdifferenzen hin (t-Test). Kleinbuchstaben beziehen sich auf den Vergleich der Mittelwerte eines Arbeitsverfahrens innerhalb des Bestandes I und Großbuchstaben auf analoge Vergleiche innerhalb des Bestandes II

Die mit dem *Horsetrainer* erfassten Mittelwerte der Herzschlagfrequenz unterscheiden sich von den Ruhewerten der tierärztlichen Eingangsuntersuchung nur minimal. Der Ruhepuls wurde für P2 mit einer Frequenz von  $40 \text{ min}^{-1}$  ausgewiesen. Dieses stellte im Vergleich zu P1 eine um  $12 \text{ min}^{-1}$  höhere Herzschlagfrequenz dar.

Die mit dem *Horsetrainer* erfassten Herzschlagfrequenzwerte zeigten für die beiden Versuchspferde P1 und P2 ebenfalls deutliche Unterschiede. Das Versuchspferd P2 wies vor der Belastung eine um  $13 \text{ min}^{-1}$  höhere Herzschlagfrequenz im Stehen auf. Der t-Test verwarf mit einem p-Wert von 0,001 die Nullhypothese, somit konnte die Mittelwertdifferenz der individuellen Herzschlagfrequenz als gesichert nachgewiesen werden.

Diese Variation der individuellen Herzschlagfrequenz kann auf den Altersunterschied der Pferde zurückgeführt werden. Jüngere Pferde (in diesem Fall mit acht Jahren das Pferd P2) haben bei gleicher Rasse i. d. R. eine höhere Herzschlagfrequenz als ihre älteren Artgenossen (P1 mit 13 Jahren).

Die Herzschlagfrequenzwerte der Versuchspferde unter Belastung, in diesem Fall bei der Saat im Arbeitsverfahren *ÖkoSat/U* im Bestand I, lassen ebenfalls individuelle Differenzen im Gespann erkennen. Abbildung 28 stellt einen ca. halbstündigen, charakteristischen Ausschnitt der Herzschlagfrequenzverläufe bei der Saat von drei Teilflächen á 0,1 ha sowie den Unterbrechungen (Schraffur) zwischen der Flächenbearbeitung dar. Es wird deutlich, dass sowohl die Frequenz des Herzschlags beim zweiten Versuchspferd (P2) über der des älteren Pferdes P1 lag. Darüber hinaus zeigte die Herzschlagfrequenz des Pferdes P2 eine schnellere Reaktion auf unter anderem durch Unterbrechungen des Arbeitsablaufes verursachte Veränderungen der Belastung.

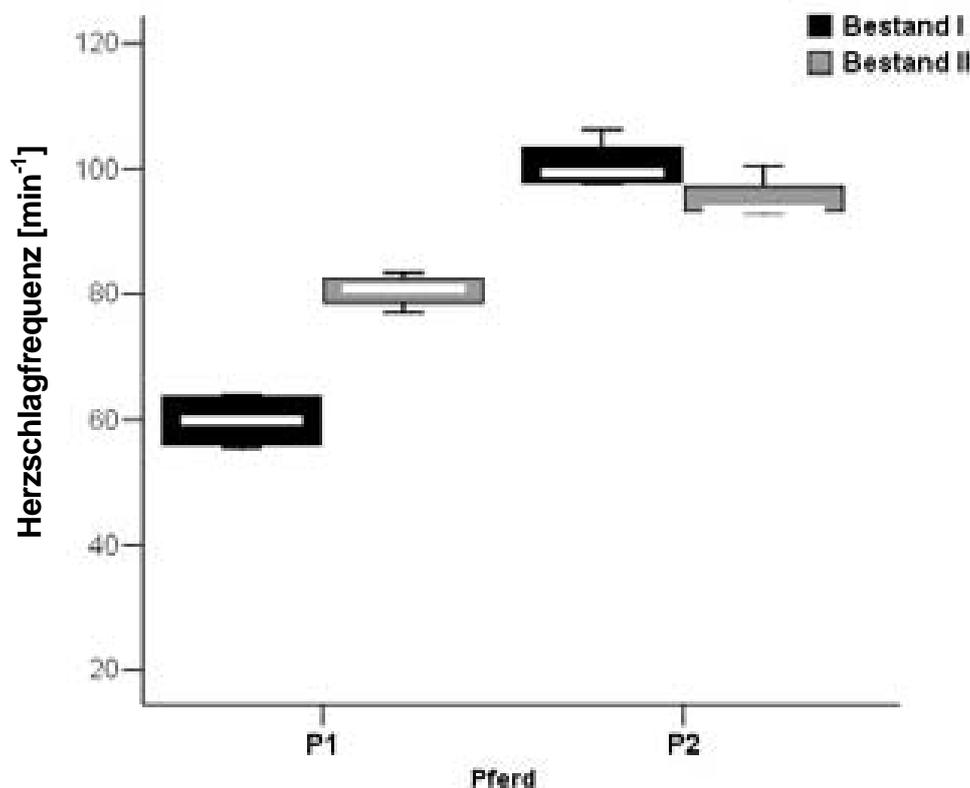


**Abbildung 28:** Verlauf der individuellen Herzschlagfrequenz der Versuchspferde P1 und P2 bei der Bearbeitung von drei Teilflächen der ersten Bestandsvariante im Arbeitsverfahren *ÖkoSat/U* sowie entsprechende Arbeitsunterbrechungen zwischen den Teilflächen (Schraffur)

Betrachtet man die mittlere Differenz der Herzschlagfrequenz der beiden im Gespann arbeitenden Pferde im Arbeitsverfahren *ÖkoSat/U* im Bestand I anhand der Box-Plots in Abbildung 29, so ist zu erkennen, dass die Herzschlagfrequenz vom Pferd P2 im Mittel um nahezu  $41 \text{ min}^{-1}$  höher ausfiel als die des älteren Pferdes P1. Dieser Wert betrug das Dreifache von der im Stehen erfassten Differenz der Herzschlagfrequenz dieser beiden Tiere (vgl. Tabelle 51). Darüber hinaus zeigt sich, dass beim zweiten Tier (P2) die Daten im oberen Wertebereich deutlich streuten und eine linksgipflige Verteilung der Daten vorlag, während sich bei dem älteren Pferd (P1) eine symmetrische Verteilung der Messwerte fand. Dieser enorme Unterschied der Maßzahlen sowie deren Streuung ist zum einen ein Indiz dafür, dass das zweite Pferd auf die Belastungen des kontinuierlichen Verfahrensablaufes stärker reagierte als Pferd P1 und lässt zum anderen die Vermutung zu, dass die geringere Anzahl sowie Dauer der Unterbrechungen im Vergleich zur zweiten Bestandsvariante nicht für eine Erholung genutzt werden konnte.

Unter den widrigeren Verhältnissen im Bestand II verringerte sich die Differenz der Herzschlagfrequenz zwischen den Tieren und betrug im Gespann  $15 \text{ min}^{-1}$ . Dieser Unterschied ergab sich

aus einer deutlich gesteigerten mittleren Herzschlagfrequenz (um  $20 \text{ min}^{-1}$ ) beim Tier P1 und einer verringerten Frequenz beim Pferd P2 in Höhe von  $6 \text{ min}^{-1}$ . Unter diesen Bestandsbedingungen wirkten deutlich höhere Zugkräfte während der Primärtätigkeiten auf das Gespann, während gleichzeitig der Arbeitsablauf häufiger unterbrochen wurde. Das ältere Pferd P1 reagierte durch eine höhere innere Leistung, die sich innerhalb der Unterbrechung kaum reduzierte, während das zweite Versuchspferd in dieser Bestandsvariante eine geringere Leistung aufwandte. Auch die Box-Plots wiesen für Pferd P2 auf eine wiederum linksgipflige (rechtschiefe) Verteilung hin, während die Daten des Pferdes P1 einer symmetrischen Verteilung folgten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das zweite Tier P2 sensibler auf Änderungen der Belastung reagierte. Näheres zu den Auswirkungen der untersuchten Bestandsverhältnisse auf die Herzschlagfrequenz ist dem Kapitel 6.5.2.3 zu entnehmen.



**Abbildung 29: Differenz der Herzschlagfrequenz zwischen den Versuchspferden bei der praxisnahen Bearbeitung im Arbeitsverfahren *ÖkoSat/U* in beiden Bestandsvarianten**

Die angeführten individuellen Differenzen der Herzschlagfrequenzen unter Belastung können ein Hinweis dafür sein, dass Pferde im Gespann ungleichmäßiger arbeiten (vgl. SNOW, 1990).

Vor allem bei einem kontinuierlichen Arbeitsablauf neigte das jüngere Pferd dazu, die Führung im Gespann zu übernehmen und reagierte bei diesen Bearbeitungsbedingungen auf höhere Geschwindigkeiten heftiger, während die widrigen Bestandsverhältnisse von dem erfahrenen Pferd eine höhere Leistung abforderten und es die Leitposition übernahm.

Eine vor diesem Hintergrund durchgeführte nähere Betrachtung der Ergebnisse des Arbeitsablaufstudiums sowie eine Überprüfung der Videoaufzeichnungen in Kombination mit den Zugkraftwerten konnte jedoch die ungleiche Arbeitsweise im Gespann nicht endgültig bestätigen.

### 6.5.2.3 Herzschlagfrequenzen innerhalb der Arbeitsverfahren

Tabelle 52 informiert über die Mittelwerte der Herzschlagfrequenzen des Versuchspferdes P1 während der Bearbeitung mit den Bodenverwundungsaggregaten sowie den kombinierten Ril-lensaaggregaten. Aufgrund der teilweise lückenhaften Datengrundlage war es nicht möglich, für die Bodenverwundungsverfahren Vergleiche der errechneten Herzschlagfrequenzwerte zwischen den Versuchsbeständen anzuführen.

**Tabelle 52: Mittelwerte der Herzschlagfrequenz des Versuchspferdes P1 für die ausgewiesenen Tätigkeiten in Abhängigkeit vom Arbeitsverfahren und der Bestandsvariante während der praxisnahen Bearbeitungsvariante**

Verfahren / Bestand		MW PT [min <sup>-1</sup> ]	MW ST [min <sup>-1</sup> ]	MW GT [min <sup>-1</sup> ]	MW-Diff <sup>1)</sup> [min <sup>-1</sup> ]	MW-Diff <sup>2)</sup> [min <sup>-1</sup> ]
<b>Eberswalder Streifenflug</b>	<i>I</i>	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	<i>II</i>	73,5	70,3	72,0	3,2*	
<b>Meinberg Wundstreifenflug</b>	<i>I</i>	93,2	93,6	93,3	-0,4	k. A.
	<i>II</i>	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	
<b>EggeSaat</b>	<i>I</i>	111,4	89,9	103,4	21,5*	7,8*
	<i>II</i>	100,7	90,6	95,6	10,1*	
<b>ÖkoSat/U</b>	<i>I</i>	75,6	72,4	74,9	3,2*	-6,9*
	<i>II</i>	87,3	76,8	81,8	10,5*	
<b>Weilmünster Wald- grubber</b>	<i>I</i>	85,8	83,1	84,4	2,7*	36,2*
	<i>II</i>	48,5	48,1	48,2	0,4	

<sup>1)</sup> Differenz der Mittelwerte (MW) zwischen den Tätigkeitsklassen PT und ST; \* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  (t-Test)  
<sup>2)</sup> Differenz der Mittelwerte (MW) innerhalb der Gesamttätigkeit zwischen den Versuchsbeständen I und II; \* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  (t-Test)

Betrachtet man die Mittelwertdifferenzen der Herzschlagfrequenz während der Gesamttätigkeit (GT) zwischen den Beständen für die Saatverfahren, so werden starke Unterschiede deutlich. Der t-Test verwarf die Nullhypothese und verwies mit einem sehr geringen p-Wert deutlich darauf, dass diese Unterschiede gesichert waren. In der Regel fielen die Werte im Bestand II geringer aus als in den Versuchsflächen der ersten Bestandsvariante. Eine Ausnahme stellte das Verfahren *ÖkoSat/U* dar, bei dem am Pferd P1 eine um 8 % erhöhte Herzschlagfrequenz registriert wurde. An dieser Stelle sei auf die bereits in Kapitel 6.5.2.2 geschilderten Effekte innerhalb des Gespanns verwiesen. Im Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* wurde mit 48 % nicht nur die größte Differenz zwischen den Werten der Bestände erfasst, sondern mit 48 min<sup>-1</sup> in Bestand II auch die geringste Herzschlagfrequenz während der Bearbeitung festgestellt. Vergleicht man diesen Mittelwert mit der durchschnittlichen Herzschlagfrequenz vor der Belastung des Pferdes P1, so erhöhte sich diese lediglich um 20 min<sup>-1</sup>.

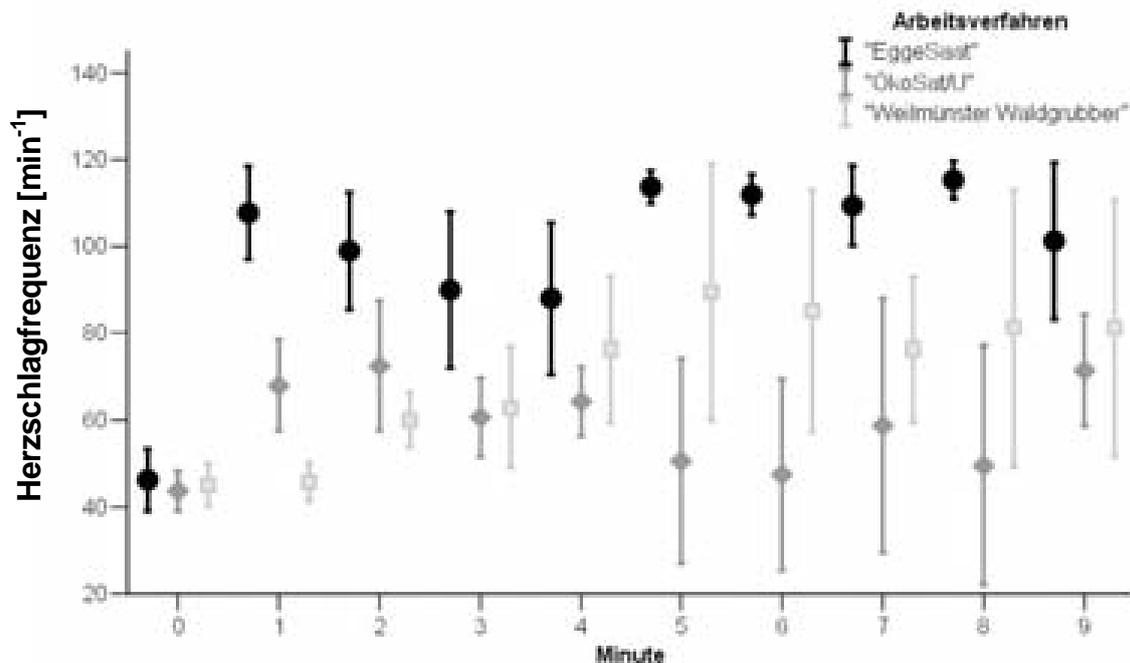
Im Vergleich zur ermittelten Bezugs-Herzschlagfrequenz konnte durch die jeweilige Bearbeitung bei Versuchspferd P1 eine durchschnittliche Erhöhung von 60 min<sup>-1</sup> im Versuchsbestand I und nahezu 45 min<sup>-1</sup> bei der zweiten Bestandsvariante registriert werden.

Bei einer Auswertung getrennt nach den Primär- und Sekundärtätigkeiten zeigte sich, dass die mittleren Herzschlagfrequenzen des Versuchspferdes während der Primärtätigkeit stets höher ausfielen. Eine Ausnahme bildeten die Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* im Bestand I sowie *Weilmünster Waldgrubber* im Bestand II, bei denen jeweils eine marginale und nicht signifikante Differenz von  $0,4 \text{ min}^{-1}$  auftrat, die durch den t-Test als nicht gesichert nachgewiesen werden konnte. Bei den übrigen Arbeitsverfahren bestand hingegen stets ein signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten der Herzschlagfrequenz des Tieres in den ausgewiesenen Tätigkeiten, der zwischen den beiden Tätigkeitsgruppen (PT/ST) mit zunehmendem Anteil sowie wachsender Dauer der Sekundärtätigkeiten (vgl. Kapitel 4.3) in Kombination mit einer höheren Belastung während der Primärtätigkeiten (vgl. Kapitel 5.5.1) anstieg. Das Pferd konnte demnach die sich aus der Unterbrechung der Bearbeitung ergebenden Zwangspausen zur Erholung nutzen. So reduzierte sich die erfasste Herzschlagfrequenz des Pferdes im Bestand II beim Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* während der Sekundärtätigkeit um ca. 4 %, bei den Verfahren *EggeSaat* und *ÖkoSat/U* sogar um 10 % bzw. 12 % gegenüber der Primärtätigkeit.

Aus den vorliegenden Daten kann geschlossen werden, dass die wenigen und zudem kurzen Unterbrechungen bei den kontinuierlichen Abläufen vornehmlich unter den einfacheren Bestandsverhältnissen für das Pferd nicht ausreichten, um die Herzschlagfrequenz deutlich abzusenken.

Die Herzschlagfrequenz des Versuchspferdes P1 reagierte stark auf Änderungen der Belastung (Intensität, Dauer, Sekundärtätigkeiten). In einem Vergleich der Zugkraft während der Primärtätigkeit ist zu erkennen, dass mit zunehmender Zugkraft auch die Herzschlagfrequenz anstieg. Der Einfluss der Dauer einer Belastung zeigte sich bei den Flächen des Bestandes I. Hier war der Arbeitsablauf kontinuierlich (vgl. Kapitel 4.3), die Ereignisse der Sekundärtätigkeit traten seltener auf und beanspruchten je Ereignis weniger Zeit als im Bestand II. Die Herzschlagfrequenz des Versuchspferdes fiel daher im Bestand I mit Ausnahme des Verfahrens *ÖkoSat/U* signifikant höher aus.

Die Reaktion des Herzkreislaufsystems von Versuchspferd P1 kann anhand der Herzschlagfrequenzverläufe bei den Saatverfahren in der praxisnahen Bearbeitungsvariante verfolgt werden. Die Minuten-Mittelwerte mit einfacher Standardabweichung der Herzschlagfrequenz sind für den Bestand I in Abbildung 30 über die Dauer der jeweils ersten 10 Minuten einer Teilflächenbearbeitung abgetragen. Hier zeigt sich, ausgehend von leicht variierenden Mittelwerten der Herzschlagfrequenz über alle Verfahren ( $45 \text{ min}^{-1} \pm 5,27 \text{ min}^{-1}$ ) direkt vor der Belastung, dass die Werte im Verlauf der Teilflächenbearbeitung bereits in den ersten Minuten unterschiedlich stark anstiegen.



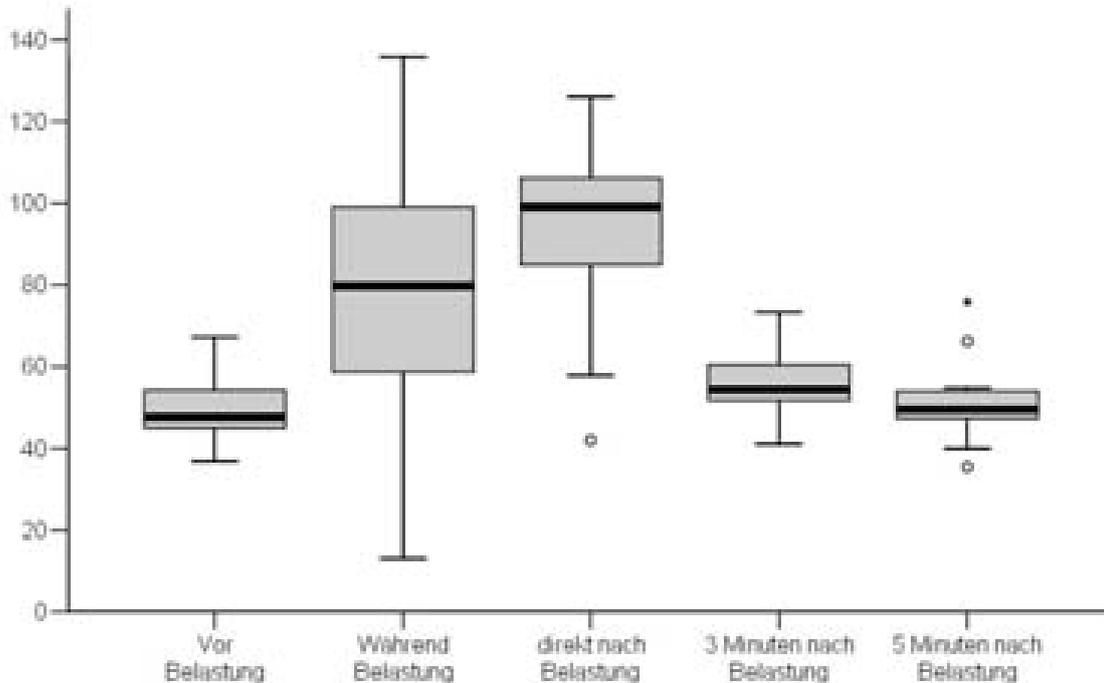
**Abbildung 30:** Entwicklung der Minuten-Mittelwerte sowie die jeweilige Standardabweichung der Herzschlagfrequenz des Pferdes P1 bei der Rillensaart während der praxisnahen Bearbeitungsvariante mit den untersuchten Arbeitsverfahren im Bestand I

Sehr deutlich erkennbar fiel dieser Anstieg in den ersten Minuten beim Verfahren *EggeSaat* aus. Hier erhöhte sich die mittlere Herzschlagfrequenz des Pferdes bereits in der ersten Minute sprunghaft um  $61 \text{ min}^{-1}$  auf einen Minuten-Mittelwert von ca.  $108 \text{ min}^{-1}$ . In den darauf folgenden drei Minuten nahm die mittlere Herzschlagfrequenz bei einer hohen Streuung um  $16 \text{ min}^{-1}$  leicht ab. Beim Verfahren *ÖkoSat/U* verlief der Anstieg der Herzschlagfrequenz in den ersten vier Minuten geringer. In der ersten Minute erhöhte sich die Frequenz um  $24 \text{ min}^{-1}$ , in der zweiten nochmals um ca.  $5 \text{ min}^{-1}$  auf einen mittleren Minutenwert von  $73 \text{ min}^{-1}$ , um im Anschluss wieder leicht zu sinken. Der Verlauf der Herzschlagfrequenz des Pferdes P1 im Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* fiel durch einen flachen Anstieg von lediglich  $1 \text{ min}^{-1}$  in der ersten Minute gegenüber dem Wert direkt vor der Belastung von ca.  $45 \text{ min}^{-1}$  auf. In der daran anschließenden Zeit stieg die Herzschlagfrequenz mit zunehmender Streuung auf einen Minuten-Mittelwert von  $76 \text{ min}^{-1}$  in der vierten Minute kontinuierlich an.

Nach etwa fünf Minuten kam es zu einer annähernd gleichen Auslenkung („Steady State“), die sich bei den verschiedenen Verfahren in der Höhe der Herzschlagfrequenz unterschied. So lagen die erfassten Herzschlagfrequenzen im Zeitintervall von der fünften bis zehnten Minuten nach Beginn der Bearbeitung beim Verfahren *EggeSaat* bei  $110 \text{ min}^{-1}$  ( $\pm 10 \text{ min}^{-1}$ ), für die *ÖkoSat/U* bei  $56 \text{ min}^{-1}$  ( $\pm 23 \text{ min}^{-1}$ ) und beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* bei  $83 \text{ min}^{-1}$  mit einer hohen Standardabweichung von  $25 \text{ min}^{-1}$ . Die Höhe des „Steady State“ sowie die Streuung des jeweiligen Mittelwertes ergaben sich aus den verfahrensspezifischen Belastungen (Betriebsmittel, Zugkraft, Bestand usw.) sowie dem damit verbundenen Arbeitsablauf und den Unterbrechungen.

In Abbildung 31 sind Box-Plots der Herzschlagfrequenzwerte des Versuchspferdes P1 vor, während und nach der Belastung abgetragen. Hierbei wurden Werte über alle Bodenverwendungs- und Saatverfahren hinweg zusammengefasst. Vor der Belastung des Pferdes durch die Rillensaart einer Teilfläche betrug die mittlere Herzschlagfrequenz des Tieres  $49 \text{ min}^{-1}$ . Der dazugehörige Box-Plot weist auf eine linksgipflige Verteilung der Daten und somit eine höhere Streuung der Werte im oberen Bereich bei einem Maximum von  $67 \text{ min}^{-1}$  hin. Der Box-Plot für

die gruppierten mittleren Herzschlagfrequenzwerte während der Belastung belegt eine starke Streuung mit einer Standardabweichung von  $24,2 \text{ min}^{-1}$  und einer Spannweite von  $122 \text{ min}^{-1}$  hin. Der arithmetische Mittelwert mit  $79 \text{ min}^{-1}$  und der Median mit  $80 \text{ min}^{-1}$  fielen annähernd gleich aus und deuten somit auf eine eher symmetrische Verteilung der Messwerte hin.



**Abbildung 31:** Box-Plots der mittleren Herzschlagfrequenz direkt vor, während, direkt nach und 3 bzw. 5 Minuten nach der Belastung für die Saatverfahren bei praxisnaher Bearbeitung in beiden Bestandsvarianten

Aufgrund der bereits geschilderten starken Variation in der Zusammensetzung und Dauer der ausgewiesenen Primär- und Sekundärtätigkeiten während des Arbeitsablaufes entstanden eben jene Unterbrechungen, die das Pferd in Teilen auch zur Erholung nutzen konnte. Im letzten Drittel der Bearbeitungszeit unterblieben i. d. R. längere Unterbrechungen, wie z. B. das Räumen von Schlagabraum. So ist es zu erklären, dass der Mittelwert der Herzschlagfrequenz direkt nach der Belastung mit gut  $16 \text{ min}^{-1}$  höher lag als der Mittelwert während der Bearbeitung. Der Box-Plot für die Frequenzen direkt nach der Belastung weist auf eine rechtsgipflige Verteilung der Messwerte hin. Die Standardabweichung fällt mit  $19 \text{ min}^{-1}$  hoch aus und das Minimum von  $42 \text{ min}^{-1}$  stellt einen Ausreißer dar.

Zur Beurteilung der vorangegangenen Belastung und der körperlichen Fitness des Pferdes sind vor allem Herzschlagfrequenzwerte der Erholungsphase wichtig. Je höher die Fitness des Pferdes, desto schneller kann es sich regenerieren, d. h. die Annäherung der Herzschlagfrequenz an den in Ruhe erfassten Wert findet schneller statt. In der Regel fällt die Herzschlagfrequenz in den ersten Minuten rasch ab, im Anschluss daran etwas langsamer. Beim Pferd ist eine Regenerationszeit von 5–6 Minuten von großer Bedeutung. VALL (1996) führt an, dass die Herzschlagfrequenz drei Minuten nach Belastungsende als guter Indikator zur Beurteilung der Arbeitsschwere sowie körperlichen Fitness der Pferde herangezogen werden kann.

In Abbildung 31 sind auch die Box-Plots der Herzschlagfrequenzmittelwerte des Tieres P1 drei und fünf Minuten nach Belastungsende dargestellt. Der Mittelwert der Herzschlagfrequenz nach drei Minuten fiel mit ca.  $56 \text{ min}^{-1}$  um gut 40 % geringer aus als direkt nach der Saat. Nach insgesamt fünf Minuten sank die mittlere Herzschlagfrequenz des Pferdes weiter und wies mit

einer Differenz von ca.  $1 \text{ min}^{-1}$  zum Wert vor der Belastung auf eine gute Regeneration des kardiovaskulären Systems des Tieres hin. Der entsprechende Box-Plot gibt an, dass diese Werte einer geringen Streuung (Standardabweichung  $\pm 8,09 \text{ min}^{-1}$ ) unterworfen sind, die mit der Variation der Messwerte vor der Belastung vergleichbar sind. Das Minimum der Messwerte mit  $35,5 \text{ min}^{-1}$  ist als Ausreißer und das Maximum mit einer Herzschlagfrequenz von  $75,9 \text{ min}^{-1}$  als Extremwert zu beurteilen. Die Verteilung der Daten ist symmetrisch. Dies kann durch die nahezu identischen Werte der beiden Lageparameter arithmetischer Mittelwert und Median ebenfalls bestätigt werden.

Die registrierten Herzschlagfrequenzen des Pferdes P1 deuten auf eine generell geringe Belastung des Tieres bei der Bearbeitung von entsprechenden Saatparzellen hin. Dem Tier reicht bereits eine kurze Pause von drei Minuten, um die Herzschlagfrequenz dem Ausgangsniveau wieder anzugleichen. Die schnelle Reaktion auf Belastungswechsel während der Saat findet sich in den Verläufen der Herzschlagfrequenzen (vgl. Abbildung 28) wieder und ist zudem ein Zeichen dafür, dass die Belastungen auch im Rahmen der Bearbeitung nur auf eine leichte körperliche Schwere schließen lassen. VALL (1996) gibt für leichte Zugarbeiten von Pferden eine Herzschlagfrequenz von  $80\text{--}90 \text{ min}^{-1}$  drei Minuten nach Belastungsende an. In der vorliegenden Studie wurden 80 % der Werte in einem Bereich von  $40\text{--}65 \text{ min}^{-1}$  registriert und auch der maximale Wert zu dieser Zeit ist mit  $73,4 \text{ min}^{-1}$  von den in der Literatur genannten Grenzwerten entfernt. Dieses Maximum wurde im Anschluss der Bearbeitung einer Fläche mit dem Verfahren *EggeSaat* erfasst. Genau dieses Verfahren beanspruchte das Einzelpferd stärker, was auch die Werte im Vergleich veranschaulichen (vgl. Abbildung 30).

Sowohl die gute körperliche Fitness des Tieres P1 in Kombination mit einer eher geringen Belastung innerhalb der Arbeitsverfahren als auch ein entsprechendes Pausenregime war für die stets gute Regeneration des Herz-Kreislaufsystems im Laufe eines Pferdearbeitstages verantwortlich.

### 6.5.3 Blutlaktat

#### 6.5.3.1 Datenbasis

Die Erfassung des Laktates im Blut der Versuchspferde sollte darüber Aufschluss geben, ob die Belastungen ausgewählter Arbeitsverfahren zu einer Erhöhung der Laktatkonzentration führen und somit ggf. einen Rückschluss auf eine anaerobe Energiebereitstellung und höhere Beanspruchung des Tieres zulassen. Eine Auswahl der Verfahren und somit der Versuchstage orientierte sich zum einen an der Dauer sowie Intensität der Belastung, die sich aus dem jeweiligen Arbeitsablauf ergab. Darüber hinaus wurde darauf geachtet, dass zwischen den Beprobungstagen jeweils ein Tag ohne Blutentnahmen lag. Bei den in diese Untersuchung aufgenommenen Verfahren handelte es sich um das Bodenverwundungsverfahren mit dem *Meinberg Wundstreifenpflug*, dem daran ausgerichteten kombinierten Rillensaatterfahren *EggeSaat* sowie dem Saatterfahren *ÖkoSat/U*.

Die Untersuchungen während der Vorstudie zeigten bereits, dass aufgrund der kurzen Belastungsdauer und dem diskontinuierlichen Arbeitsablauf keine hohen Laktatkonzentrationen von  $> 3 \text{ mmol/l}$  zu erwarten waren. Aus diesem Grund erfolgte die Blutentnahme in der Hauptstudie direkt nach Belastungsende der jeweiligen Bearbeitungsvariante, um somit den Maximalwert dieses Milchsäuresalzes im Blut besser ermitteln zu können (vgl. Kapitel 5.5.3).

Aufgrund des geringen Datenumfanges findet keine weiterführende statistische Analyse der jeweiligen Messwerte statt, sondern ausschließlich die Nennung der ermittelten Laktatkonzentrationen bzw. Mittelwerte.

### 6.5.3.2 Laktatkonzentrationen

Der Ruhewert des Laktatgehaltes im Blut wurde am ersten Versuchstag vor der Belastung für beide Pferde ermittelt. Für das Versuchspferd P1 konnte eine Laktatkonzentration von 0,7 mmol pro Liter Blut nachgewiesen werden, für das zweite Versuchspferd (P2) betrug der Bezugswert 0,9 mmol/l.

Nach der Belastung im Rahmen der praxisnahen Bearbeitung erhöhte sich die Konzentration dieses biochemischen Parameters gegenüber dem Ruhewert geringfügig. Die mittlere Differenz der Blutlaktat-Konzentrationen zwischen Belastungs- und Ausgangswert variierte je nach Verfahren und Pferd im Bereich von 0,1–1,5 mmol/l.

Bei den Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* (0,8 mmol/l) und *EggeSaat* (0,9 mmol/l) wurden nach einer Flächenbearbeitung im Bestand I nahezu identische Laktatwerte im Blut des Pferdes P1 nachgewiesen. Im Versuchsbestand II stieg die Laktatkonzentration im Vollblut des Tieres innerhalb der Bearbeitung mit diesen Verfahren im Durchschnitt um 0,3 mmol/l gering an.

Im Blut des Pferdes P1 konnte nach der Bearbeitung mit der *ÖkoSat/U* ein gegenüber dem Ruhewert erhöhter Wert nachgewiesen werden. Hier betrug die Konzentration des Milchsäuresalzes 1,0 mmol/l (Bestand I) und 1,4 mmol/l (Bestand II). Beim zweiten Tier (P2) fiel die Differenz zum Bezugswert bei diesem Verfahren mit 1,5 mmol/l (Bestand I) und 1,3 mmol/l (Bestand II) etwas größer aus. Vergleicht man diese Ergebnisse mit den Veränderungen der mittleren Herzschlagfrequenz bei den Pferden in diesem Verfahren (vgl. Kapitel 6.5.2), so zeigt sich, dass auch hier das Pferd P2 in der ersten Bestandsvariante eine höhere innere Leistung aufwies als im Bestand II und die Werte für das Tier P1 in der zweiten Bestandsvariante deutlich anstiegen.

Unter nicht standardisierten Belastungen wie in der vorliegenden Untersuchung kann bereits der Ruhewert dieses Parameters um 1 mmol/l sowie entsprechende Konzentrationen nach Belastungen um mehrere mmol/l streuen (vgl. GOTTLIEB ET AL., 1988; PEREZ ET AL., 1992; SCHÄFER, 2000; SCHULZ, 2000). Bei den hier aufgeführten Ergebnissen handelte es sich demnach lediglich um marginale Änderungen. Der Grund hierfür liegt in der Charakteristik der Bearbeitung mit den untersuchten Betriebsmitteln. Der Arbeitsablauf war durch eine Vielzahl von kurzen Unterbrechungen und einer für die Pferde geringen Belastungszeit (< 60 min) bestimmt. Die Intensität des Zugkraftbedarfs war durch den guten Trainingszustand der Versuchspferde nicht ausreichend, um den anaeroben Schwellenwert zu überschreiten. Die dargestellte Erhöhung der Laktatkonzentration im Blut des Pferdes nach Belastungsende weist daher auf eine aerobe Energiegewinnung bei dynamischer Muskelarbeit hin.

## 7 Diskussion

### 7.1 Methodendiskussion

Einzelne Aspekte des methodischen Vorgehens wurden bereits im Kapitel 4 und 5 einer kurzen kritischen Würdigung unterzogen. Nachfolgend sollen wesentliche Gesichtspunkte der einzelnen methodischen Ansätze und deren Integration in das konzipierte Erhebungskonzept hinterfragt werden.

Im Fokus dieser Arbeit stand die vergleichende Untersuchung von fünf pferdegestützten Arbeitsverfahren zur Bodenvorbereitung sowie der kombinierten Rillensaat von Rotbuchen unter Fichtenschirm. Diese Verfahrensvarianten wurden zudem unter für den Pferdeinsatz einfachen sowie erschwerten Arbeitsbedingungen anhand zweier Bestandsvarianten untersucht. Die objektive Basis einer angestrebten Verfahrensbewertung gewährleistete das für Feldversuche entwickelte mehrdimensionale Erhebungskonzept, innerhalb dessen Parameter erhoben wurden, die nach technischen, ökonomischen, ökologischen sowie ergonomischen Teilzielen unterschieden werden können. Viele Einzelergebnisse der ausgewählten Kriterien konnten jedoch nicht statistisch abgesichert werden, da der zur Verfügung stehende Stichprobenumfang für die untersuchte Variantenvielfalt zu gering ausfiel. Ein Grund hierfür war, dass im Landeswald Nordrhein-Westfalen neben den bereitgestellten Fichtenbeständen mit einer Flächengröße von insgesamt 42 ha keine weiteren vergleichbaren und geeigneten Versuchsflächen zur Verfügung standen. Des Weiteren beschränkten die regional-klimatischen Gegebenheiten den Versuchszeitraum für die geplanten Frühjahrssaaten auf wenige Wochen im Monat Mai. Da bereits die vorgestellten Ergebnisse auf insgesamt zehn Versuchstagen im Mai basieren, konnten keine weiteren Saaten im gleichen Versuchsjahr durchgeführt werden.

Je Verfahrens- und Bestandsvariante wurden acht Versuchsflächen mit jeweils 0,1 ha eingerichtet. Um dieser geringen Wiederholungszahl vor allem hinsichtlich der Arbeitsablaufstudien entgegenzuwirken, fand eine Aufteilung der zur Verfügung stehenden Versuchsflächen in eine streifenweise und eine praxisnahe Bearbeitungsvariante statt (vgl. Kapitel 5.2.1).

Bei der standardisierten, streifenweisen Variante stand die Bearbeitung von markierten Streifen mit einer Länge von jeweils 50 m im Vordergrund. Dieses Vorgehen bot sowohl Vor- als auch Nachteile. Einerseits erhöhte es den Stichprobenumfang um den Faktor fünf und erlaubte eine treffsichere analytisch-statistische Identifikation und Beschreibung der produktivitäts-relevanten Faktoren. Darüber hinaus existierte eine vergleichende Basis, um die äußere Leistung des Versuchspferdes in den unterschiedlichen Arbeitsverfahren vergleichend darstellen zu können. Andererseits unterlief die streifenweise Bearbeitung bewährte Arbeitsgefliegenheiten, vor allem durch das Ausblenden der Wendemanöver und zyklenübergreifenden Aktivitäten des Pferdeführers, die in erheblichen Anteilen toleriert werden mussten (vgl. Kapitel 5.2.2). Die praxisnahe Bearbeitungsvariante sicherte die bewährte Praktikabilität durch die Bearbeitung von auftrags- und objektspezifischen Arbeitszyklen und erlaubte bei geringem Stichprobenumfang einen Einblick in die herkömmlichen Arbeitsabläufe der untersuchten Arbeitsverfahren.

Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs und dem daraus resultierenden eingeschränkten Datenumfang kann diese Untersuchung nur als Fallstudie eingestuft werden. Dennoch erlauben die dargelegten Ergebnisse erstmalig einen detaillierten und vergleichenden Einblick in die Rahmenbedingungen des Einsatzes der untersuchten fünf pferdegestützten Arbeitsverfahren. Die gewonnenen Erkenntnisse sind in mancher Hinsicht bemerkenswert, bedürfen im Detail sicherlich intensiver Folgeuntersuchung, führen jedoch auch durchzusetzende Konsequenzen an.

Innerhalb des Erhebungskonzeptes kam den Arbeitsablaufstudien eine wesentliche Bedeutung zu. Sie lieferten sowohl die Basis zur Identifizierung der den Arbeitsablauf störenden Faktoren

und zur Herleitung von Produktivitäten als auch den zeitlichen Bezug für die Synchronisation der physiologischen Messgrößen. Dies führte dazu, dass bei der Datenerhebung ein vergleichbar zeitaufwändiges Vorgehen gewählt werden musste. An die Versuchsdurchführung schlossen sich die Arbeitsablaufstudien daher im Videolabor anhand von Videoaufnahmen an, die während der Außenversuche aufgezeichnet wurden. Diese Methode gewährleistete, dass die im Vorfeld definierten Messpunkte der kurz aufeinander folgenden Arbeitsablaufabschnitte exakt erfasst werden konnten. Allgemeine Vor- und Nachteile der verwendeten technischen Ausstattung hat SCHERER (1995) bereits ausführlich dargelegt. Im vorliegenden Fall muss vor allem auf die vergleichsweise schwere Videokamera und somit relativ unflexible Handhabung eingegangen werden. Um während der Filmaufnahmen mit der Videokamera größere Bildschwankungen zu vermeiden, mussten Schulter- und Dreibeinstative verwendet werden. Diese erlaubten jedoch kaum eine rasche Reaktion auf einen Zykluswechsel, ohne dass dabei ein Verdecken des Arbeitsgespanns durch Fichten in Kauf genommen werden musste. Diese Tatsache bereitete vereinzelt Probleme im IFA-Videolabor die Messpunkte exakt anzusprechen. Eine höhere Flexibilität in Kombination mit einer deutlich verbesserten Handhabung bei Videoaufnahmen bieten heute MiniDV-Camcorder. Diese aktuelle technische Entwicklung zeichnet sich im Vergleich zu S-VHS-Camcordern vor allem durch eine kompaktere Geräteabmessung, geringere Eigenmassen sowie digitale und teilweise auch optische Bildstabilisatoren aus. Die digitalen Videos können zudem parallel mit Messdaten aus verschiedenen Messsystemen am PC dargestellt und auf Basis des *Timecode* automatisch mit diesen verschnitten werden, was die Synchronisation von Messdaten zukünftig deutlich erleichtert (vgl. DREWES, 2004).

Die Zeitaufnahme im Videolabor erfolgte in der vorliegenden Arbeit mit einer Fortschrittszeitstudie. Diese chronologische Registrierung des Arbeitsablaufs schuf die zeitliche Bezugsbasis für die Synchronisation von Messdaten, wie z. B. der Herzschlagfrequenz der Pferde. Die hohe Kontinuität des Arbeitsablaufs, die rasche Abfolge und die sehr kurze Dauer der definierten Ablaufabschnitte erschwerten die Erfassung der Zeiten. Die hierbei auszuführenden Tätigkeiten fanden an Bildschirmen statt. Diese Tatsache sowie das genaue Ansteuern der Messpunkte stellte für die Augen des Zeitnehmers eine belastende Tätigkeit dar und musste auf wenige Stunden bis max. 4 h am Tag unter Berücksichtigung ausreichender Pausen begrenzt werden. Dieses Vorgehen erforderte einen hohen personellen Aufwand während der Felduntersuchungen sowie im Anschluss daran bei der Durchführung der intensiven Zeitstudien am Video. Können die Ablaufabschnitte sowie Messpunkte eindeutig im Vorfeld definiert werden und folgt deren Wechsel nicht zu kurz aufeinander, so erscheint der Einsatz von einem Zeiterfassungsprogramm auf einem PDA (*Personal Digital Assistant*) mit berührungssensitivem Bildschirm für die Zeitaufnahme sinnvoll. Insbesondere vor dem Hintergrund der Datenaufbereitung und der weiteren statistischen Datenanalyse bietet der Markt heute zu einem guten Preis-Leistungsverhältnis ansprechende Möglichkeiten (vgl. REFA, 2004 und BODELSCHWINGH ET AL., 2004).

Die Erfassung von gewählten Parametern zur Charakterisierung der quantitativen sowie qualitativen Arbeitsdurchführung mussten stets am jeweiligen Versuchstag abgeschlossen werden. Dies konnte nur über einen vergleichsweise hohen personellen Aufwand im Zuge der Außen-aufnahmen gewährleistet werden. Die Datenerhebung erfolgte durch insgesamt drei Personen, eine weitere Person erfasste im direkten Nachgang der Bodenverwundung bzw. Rillensaat mit den untersuchten Aggregaten den Bearbeitungsgrad sowie Verletzungen an den stockenden Fichten. Die hierbei eingesetzten Messhilfen (vgl. Kapitel 5.3.3) ermöglichten eine rasche Aufnahme bei hinreichender Genauigkeit. Die Stichprobenaufnahme zur Erfassung weiterer qualitativer Merkmale wie z. B. Arbeitsbreite und -tiefe sowie Bucheckernabstand fand in einer Zwei-Personengruppe statt. Hierbei gestaltete sich vor allem das bei den Saatverfahren verfahrensspezifische Zustriegeln der Rillen für die Aufnahme von Arbeitstiefe, Ablage des Saatgutes und Abstand der Eckern als problematisch. So mussten die Saatrillen vorsichtig und stö-

rungsfrei aufgedeckt und die Parameter vermessen bzw. angesprochen werden. Diese Vorgehensweise stellte sich als sehr zeitaufwändig heraus.

Die Erfassung einer Veränderung der Bodenstruktur durch den Betritt der Pferde bzw. die Befahrung eines für den Forsteinsatz aufgerüsteten landwirtschaftlichen Schleppers verlief mit einem hohen personellen Einsatz von drei Aufnahmegruppen mit jeweils zwei Personen. Diese Tatsache sowie die erforderliche Witterungskonstanz vor allem in Bezug auf die gleich bleibende Bodenfeuchte erlaubte keine Integration in das entwickelte mehrdimensionale Erhebungskonzept (vgl. Kapitel 4.4). Die Luftpermeabilität diente als Parameter zur Charakterisierung von Böden bzgl. ihrer Fähigkeit, konvektive Luft zu transportieren. Die Messungen dieses Parameters wurden an zwei Tagen unter Feldbedingungen durchgeführt. Somit konnten vergleichbare Bedingungen insbesondere vor dem Hintergrund des Bodenwassergehaltes sowie dem Wasserspannungszustand gewährleistet werden. Die Datenaufnahme mit den konzipierten mobilen Luftpermeametern erwies sich als sehr geeignet, um eine rasche Aufnahme sicherzustellen. Auch EBRECHT (2005) wies nach, dass das konzipierte Messinstrument bei der Erfassung der Bodendurchlüftung auf Feinerschließungsmittel ein sehr zweckdienliches Gerät darstellt. Es erlaubte bereits im Feld einen guten, ersten Überblick über die Veränderung der Bodenstruktur durch Betritt bzw. Befahrung. Probleme traten vereinzelt beim Eintreiben der Stechzylinder auf, so dass einige Stichproben bereits während der Außenaufnahme verworfen werden mussten und durch Ersatzpunkte ergänzt wurden. Bei der Aufbereitung der Bodenproben im bodenkundlichen Labor z. B. für die Bestimmung von Wasser- und Humusgehalten muss damit gerechnet werden, dass weitere Messungen vor der statistischen Analyse ausgeschlossen werden müssen, wenn der Anteil von Steinen oder Wurzeln zu hoch ausfällt. In der vorliegenden Arbeit musste im Durchschnitt eine Reduktion des Datenumfangs von 10–15 % hingenommen werden.

Im Zuge der humanphysiologischen Messung gestaltete sich die Erfassung der Herzschlagfrequenz des Pferdeführers mittels eines Elektro-Kardiogramms (EKG) als unproblematisch. Die gewählte bipolare Brustwandableitung in Kombination mit der Fixierung durch Sauna-Einweg-Elektroden sorgte für eine größtenteils verzerrungsfreie Aufzeichnung (vgl. Kapitel 5.4.2.2). Insbesondere das zu dem verwendeten PhysioLogger-Messsystem gehörende Telemetrie-Modul erwies sich als sehr hilfreich bei der Überwachung der Datenaufzeichnung und ermöglichte somit eine zeitnahe Reaktion bei Messabweichungen des Eingangssignals. Dies gewährleistete, dass nur eine sehr geringe Anzahl der Messwerte im Zuge der statistischen Auswertung ausgeschlossen werden mussten. Weitere Vorteile des Messsystems bestehen in der Speicherung der Messdaten auf einer PCMCIA-Speicherkarte, die einen geringeren Stromverbrauch als vergleichbare Speichermedien aufweist, eine permanente Speicherung der Daten auch bei Unterbrechungen der Stromversorgung sicherstellt und über standardisierte Schnittstellen eine rasche Datenübertragung auf z. B. ein Notebook ermöglicht.

Potenzielle Belastungsunterschiede bei den rasch aufeinander folgenden Arbeitsablaufabschnitten konnten nach Verschneidung mit den Ergebnissen der Arbeitsablaufstudien zwar berechnet werden, sind jedoch aufgrund des Nachklings der Herzschlagfrequenz mit Vorsicht zu behandeln (vgl. BÖLTZ, 1988; HOß, 1994; STAMPFER, 1996). Eine Aussage zur Gesamtbeanspruchung bei den ausgewiesenen Tätigkeitsgruppen ist möglich, auch wenn sie sich durch das Versuchsdesign bedingt durch kurze, für einen vollständigen Arbeitstag nicht charakteristisch erscheinende Belastungen auszeichnet.

Die Messung der Zugkraft zwischen Tier und Betriebsmittel erfolgte durch eine messtechnische Integration einer kabellosen, DMS-basierten Zugkraftanlage in das humanphysiologische Messsystem. Die hierbei verwendete Funklösung stellte sich als Ursache von zahlreichen Messausfällen bei der Datenaufzeichnung heraus. Störungen ergaben sich durch einzelne Überlagerungen der verwendeten Funk-Frequenzen bei der Zugkraftmessanlage und dem Herzfrequenzmesssystem für Pferde (vgl. Kapitel 4.4.2). Dies trat vor allem dann auf, wenn

sich der Pferdeführer mit dem Empfänger der Zugkraftanlage den Pferden bis auf einen Abstand von ca. 0,5 m näherte, so z. B. bei der Kontrolle des Kummetsgeschirrs. Diese messtechnischen Probleme entstanden, da die von den Herstellern der Messsysteme bekannt gegebenen technischen Details nicht ausreichten, um durch manuelle Feinjustierung der Funk-Module eine Überlagerung der Signale zu unterbinden. Das zur kabellosen Erfassung der Zugkraft konzipierte Messsystem kann daher trotz der dargelegten Vorteile (vgl. Kapitel 5.5.1.1) als nicht geeignet betrachtet werden.

Demgegenüber traten bei der Erfassung der Herzschlagfrequenzen der Pferde mit dem Polar-Messsystem *Horsetrainer* deutlich weniger systematische Probleme auf. Dieses System erwies sich als sehr genaue Messeinrichtung, was auch die Vergleichsmessung mit dem Stethoskop bestätigte (vgl. Kapitel 5.5.2.2). Der große Vorteil des Polar-Messsystems gegenüber bisherigen Lösungen besteht darin, dass lediglich zwei Elektroden unter einem elastischen Gurt verwendet werden und nicht wie bei früheren EKG-Ableitungen drei und mehr Elektroden über die Dauer der Aktivität an enthaarten Körperstellen separat befestigt werden mussten (vgl. PHYSICK-SHEARD ET AL., 1982; RICHARDS UND LAWRENCE, 1983; HOFMANN, 1992; ROMETSCH ET AL., 1993 und SCHÄFER, 2000). Bei heftigen Bewegungen des Tieres konnte dennoch der Körperkontakt der Elektrode unter dem elastischen Gurt nicht immer gewährleistet werden. Die daraus resultierenden Bewegungsartefakte konnten zwar größtenteils mit Hilfe einer Artefakt-Routine interpoliert werden, es kam jedoch trotzdem zu einzelnen Messausfällen. Darüber hinaus existierten während der Versuche vereinzelt Probleme mit einem der Messwertspeicher, die zunächst auf die oben erwähnten Funkfrequenz-Überlagerungen zurückgeführt wurden. Wie sich im Zuge der Versuche herausstellte, handelte es sich jedoch um einen Wackelkontakt am semi-permanenten Speichermedium im Empfänger. Aus diesem Grund mussten bei den Bodenverwundungsverfahren größere Datenverluste hingenommen werden (vgl. Kapitel 6.5.2.1).

Die Bestimmung des Blutlaktatgehaltes der Pferde erfolgte mit tierärztlicher Unterstützung unter Anwendung eines relativ robusten Systems, das eine Auswertung der Proben einfach und ohne großen apparativen Aufwand direkt unter Feldbedingungen ermöglichte. Auch wenn häufig die Messwerte des Laktatgehaltes im Vollblut niedriger ausfallen als im Blutplasma, ist diese Methode dennoch sehr gut geeignet, um die Auswirkung von Belastungen im Vergleich zum individuellen Wert unter Ruhe rasch zu ermitteln (vgl. RADICKE, 1990).

## 7.2 Ergebnisdiskussion

### 7.2.1 Technische Aspekte der Verfahrensbewertung

Die vorliegende Arbeit verfolgte das Ziel, eine vergleichende Bewertung von insgesamt fünf pferdegestützten Arbeitsverfahren zur Bucheckern-Vorausaat an ausgewählten Kriterien durchzuführen. Diese orientieren sich an vier Aspekten und deren Einfluss auf die angestrebte Optimierung der Sachleistung in den untersuchten Bestandsvarianten. Der Verfahrenvergleich stützt sich im Folgenden auf die Diskussion technischer, ökonomischer, ökologischer sowie ergonomischer Gesichtspunkte.

Für den Einsatz im Wald müssen pferdegezogene Betriebsmittel vor allem eine kompakte Bauweise aufweisen, die wesentlich durch geringe Abmessungen bestimmt ist, um somit eine gute Manövrierfähigkeit auf den Flächen zu gewährleisten. Dazu kommt die Notwendigkeit einer stabilen Bauweise, die den Einsatz auf mit Wurzeln und Steinen durchsetzten Böden sowie Geländeunebenheiten erlaubt. Ein entscheidendes Kriterium bei der vergleichenden Bewertung der tiergezogenen Aggregate stellt darüber hinaus eine geringe Eigenmasse vor dem Hin-

tergrund der Zugkraftminimierung dar. Die Konstruktion des Gerätes sollte daher unter der Berücksichtigung einer ausreichenden Stabilität und voller Funktionalität so leicht wie möglich ausfallen. Die technische Konzeption der jeweiligen Aggregate wurde im Kapitel 3.3 detailliert dargestellt.

Zu den technischen Komponenten, die den Arbeitsfluss behindern oder fördern können, zählt auch die Verbindung zwischen Aggregat und Pferd, also das Geschirr sowie die Zugstränge. Hier ist besonders darauf zu achten, dass es einwandfrei an das Pferd angepasst ist und sich stets in einem guten Zustand befindet, um Scheuer- und Druckverletzungen am Pferdekörper zu vermeiden. Nähere Ausführungen zum Einfluss eines korrekten, angepassten Geschirrs auf die Zugleistung ist unter anderem GOTTLOB (1992) zu entnehmen. In Kapitel 5.5.1 wurde bereits kurz auf die Bedeutung von rückdämpfenden Zugsträngen aus Polyamid-Monofil-Seilen mit Dämpfungselementen aus Naturgummi eingegangen. Diese besitzen den großen Vorteil, einen Teil der Kräfte während des Anziehens oder beim etwaigen Verhaken des Aggregates bzw. der in den Boden eingreifenden Werkzeuge zu kompensieren (vgl. BUHLE, 1923). Im Kapitel 6.5.1.2 wurden die Ergebnisse der am Aggregat wirkenden effektiven Zugkraft unter Berücksichtigung des Zugwinkels zwischen den Zugsträngen und deren Anbringung am Aggregat dargestellt. Vor dem Hintergrund technischer Aspekte zeigte sich, dass bei Geräten mit Radfahrgestellen ein flacher, an die Körperhöhe des Zugtieres angepasster Winkel sich als günstig erwies, um eine im Zug gleichmäßige Kraft aufzubringen.

Neben den Abmessungen und insbesondere der Eigenmasse der jeweiligen Aggregate sowie der Verbindung zwischen diesem und dem Tier haben bei den untersuchten Betriebsmitteln vor allem die jeweils in den Boden eingreifenden Werkzeuge eine große Bedeutung für die durch das Pferd aufzubringende Zugkraft. Anhand der in der praxisnahen Bearbeitungsvariante ermittelten Zugkraftwerte wurden die Unterschiede innerhalb der Arbeitsverfahren aufgeführt (vgl. Kapitel 6.5.2). Durch den relativ tiefen Eingriff des Schar in den Oberboden wurde im Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* in der ersten Bestandsvariante eine Zugkraft von 711 N erfasst. In den Flächen vorhandene Hiebsreste beeinflussten, bedingt durch das dem Schar vorgeschaltete Scheibenkolter, das Eindringen in den Boden und führten somit zu einer deutlichen Minimierung der mittleren Zugkraft. Die beim *Meinberg Wundstreifenpflug* in Zugrichtung rollend an der Tragachse gelagerten Scheibeneggen hatten den Vorteil, dass die Bearbeitungswiderstände beim Abschälen der Humusaufgabe verringert wurden, was sich im Mittel durch eine um ca. 25 % geringere Zugkraft als beim Bodenverwundungsverfahren *Eberswalder Streifenpflug* im Bestand I zeigte. Hindernisse, insbesondere Astmaterial vergangener Eingriffe, verhinderten vielfach den Bodeneingriff der Eggen, was reduzierte Kräfte verursacht.

Im Saatverfahren *ÖkoSat/U* wurde eine um ca. 30 % geringere Zugkraft als beim Verfahren *EggeSaat* mit ca. 950 N erfasst. Als Grund hierfür kann der kontinuierliche Arbeitsablauf dieses Verfahrens und somit der gleichmäßige Kraftbedarf angeführt werden. In der zweiten Bestandsvariante verringerte sich die mittlere Zugkraft bei dem am *Meinberg Wundstreifenpflug* angebrachten Saataggregat *EggeSaat* ebenfalls durch das Überrollen der Hiebsreste durch die Scheibeneggen. Bei den übrigen Saatverfahren wurde eine signifikante Erhöhung der mittleren Zugkraft in der zweiten Bestandsvariante erfasst, die sich bei den im Vergleich schwersten Aggregaten durch den diskontinuierlichen Ablauf und das durch die Unterbrechungen provozierte, kraftaufwändige erneute Anziehen der Aggregate ergab. Dies wirkte sich insbesondere beim *Weilmünster Waldgrubber* deutlich auf den im Vergleich höchsten Mittelwert von über 1.200 N aus, da hier der Pferdeführer das Aggregat zunächst mit ausgehebelten Federzinken anzog und dann in den Bearbeitungszustand brachte, wodurch ruckartig ein erhöhter Zugkraftbedarf auftrat. Darüber hinaus sorgten stärkere Wurzeln für ein Verhaken und somit für Spitzenwerte der Zugkraft in Höhe von bis zu 2.000 N. Die so über das Geschirr auf das Pferd übertragenen Schläge wurden zwar durch das Dämpfungselement im Zugseil minimiert, traten dennoch wie dargestellt sehr deutlich hervor. Dies ging einher mit dem größten Anteil an nicht zuzuordnendem Verweigern des Pferdes (vgl. Kapitel 6.1.1).

Zusammenfassend muss festgehalten werden, dass der Zugkraftbedarf pferdegezogener Betriebsmittel von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird, wie z. B. der Bauweise des jeweiligen Aggregates, also seiner Eigenmasse, der Ausformung der in den Boden eingreifenden Bauteile und deren Schärfe, der Winkel, mit denen die unterschiedlichen Oberflächen der Bauteile mit dem Untergrund Kontakt haben, des Zugwinkels zwischen Aggregat und Pferdegeschirr etc. Darüber hinaus existieren Größen wie z. B. die Arbeitsbreite sowie -tiefe, die durch den Pferdeführer der jeweiligen Arbeitsaufgabe und der Arbeitsumgebung angepasst werden können, so z. B. die Arbeitstiefe in Abhängigkeit der zu räumenden Humusaufgabe. Des Weiteren kommt dem Pferdeführer eine große Bedeutung in Bezug auf die Zugbereitschaft des Pferdes bzw. Pferdegespanns zu. So zeigten PEARSON ET AL. (1989) die Variation der Arbeitsweise von zwei Führern und die Auswirkung auf die Zugkraft der Tiere beim Pflügen.

Neben dem geschilderten Einfluss auf den Zugkraftbedarf stellen die Werkzeuge der Aggregate vor dem Hintergrund der Arbeitsqualität ein wesentliches technisches Kriterium dar. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass sich die untersuchten Arbeitssysteme in den Arbeitsaufgaben der Bodenverwundung und kombinierten Rillensaat unterschieden und demzufolge verschiedene Anforderungen an die zu erzielenden Arbeitsqualitäten gestellt wurden. Die beiden verwendeten Streifenpflüge dienten dem kontinuierlichen Abziehen der Rohhumusaufgabe und somit der Freilegung eines fortlaufenden Mineralbodenstreifens. Die kombinierten Saataggregate hatten hingegen in einem Arbeitsgang die Schaffung eines Keimbettes im Mineralboden und die Saatgutausbringung zum Ziel. In Kapitel 6.3.1 wurden die Einzelergebnisse detailliert angeführt. Hier zeigte sich, dass die Gesamtstrecke innerhalb der praxisnahen Bearbeitungsvariante maßgeblich subjektiv durch den Pferdeführer sowie den gewählten Weg beeinflusst wurde und zwischen den einzelnen Verfahren, Beständen und zu bearbeiteten Teilflächen eine unterschiedlich starke Variation aufwies. Unter den für den Pferdeeinsatz erschwerten Arbeitsbedingungen im Bestand II zeigte sich bei allen Verfahren sehr deutlich, dass die Häufigkeit von unbearbeiteten Teilstrecken und damit auch deren Summe sowie Anteil an der Gesamtstrecke zunahm. Vor allem Schlagabraum und Stöcke behinderten den kontinuierlichen Bearbeitungsvorgang aller Geräte. Wie bereits im Kapitel 6.1.1 dargelegt, reagierte der im Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* eingesetzte Scharpflug sensibler auf Hiebsreste vergangener Eingriffe, so dass der Pferdeführer i. d. R. versuchte, diese zu umfahren oder zu beseitigen. Die Möglichkeit, mit dem *Meinberg Wundstreifenpflug* Hindernisse eher zu überfahren, sorgte für eine Zunahme der mittleren Befahrungslänge, da sich entsprechende Querungen von Hiebsresten über die Anzahl und Länge der unbearbeiteten Teilstrecken deutlich auf die Bearbeitungsqualität auswirkten. Einhergehend mit den unbearbeiteten Teilstrecken bestanden demzufolge Unterschiede in der Mineralbodenfreilegung. Der in Bezug auf die Minimierung des Zugkraftbedarfs angeführte Vorteil des *Meinberg Wundstreifenpflugs* fällt bei der Berücksichtigung dieses Aspektes deutlich negativer aus: die frei abrollenden Scheiben überwinden Hindernisse zwar problemlos, mit zunehmender Bearbeitungsgeschwindigkeit des Gespanns wird jedoch der Eingriff der Scheiben in den Humus reduziert und dadurch der Mineralboden nicht mehr ausreichend freigelegt. Beim *Eberswalder Streifenpflug* hingegen konnte eine deutlich tiefere Bearbeitung durch den Scharpflug und somit eine kontinuierlichere Abräumung der Humusaufgabe erfasst werden.

Mit dem Betriebsmittel *ÖkoSat/U* erfolgte im Vergleich zu den übrigen Saataggregaten für eine kombinierte Rillensaat eine tiefere Bearbeitung, was für einen guten Kontakt der gesäten Eckern mit dem Mineralboden sorgte. Das Saatgut wurde gleichmäßig in der Saatrille abgelegt und diese größtenteils gut wieder verschlossen. Die *ÖkoSat/U* kam auch mit den erschwerten Arbeitsbedingungen im Bestand II am besten zurecht und erlaubte hier ein relativ kontinuierliches Arbeiten. Beim Verfahren *EGGE SAAT* wurde die Bearbeitung der Saatrille häufig unterbrochen, die dem Streifenpflug nachlaufende Säeinheit war nicht in der Lage, die Bucheckern ausreichend in den Mineralboden einzuarbeiten bzw. zu übererden. Der *Weilmünster Wald-*

*grubber* mit aufgebauter Säeinheit konnte bei der Ausbringung des Saatgutes ebenfalls nicht überzeugen. So war es nicht möglich, die Saatgutdosierung zu variieren, weswegen trotz eines höheren Bearbeitungsgrades kaum die Hälfte der angestrebten Saatgutmenge auf der Fläche ausgebracht werden konnte. Die flach anstehenden Wurzeln des Fichtenaltbestandes waren bei diesem Verfahren häufig Auslöser unbearbeiteter Teilstrecken, so dass hier keinesfalls von einer Kontinuität der Bearbeitung gesprochen werden konnte. Eine geringe Saatrillentiefe, kaum Kontakt zum Mineralboden, ausbleibende Einarbeitung und vor allem eine mangelnde Abdeckung des Saatguts deklassierten dieses Saatverfahren innerhalb der untersuchten Arbeitsbedingungen.

Neben der Betrachtung technischer Restriktionen, die sich aus den Geräten und dem daran ausgerichteten Arbeitsverfahren ergeben, zählen nach HÄBERLE (1998) auch technische Merkmale des Arbeitsobjektes, d. h. der zu bearbeitenden Teilfläche, sowie der näheren Arbeitsumgebung zu den Faktoren, die den Arbeitsablauf in Bezug auf die Sachleistung behindern. Anhand der Ergebnisse der Arbeitsablaufstudien wurden die Auswirkungen auf die erzielte Produktivität in den untersuchten Bestandsvarianten detailliert dargestellt (vgl. Kapitel 6.2.2). Eine standardisierte Bearbeitungsvariante von geraden Streifen mit einer Länge von 50 m diente der Identifizierung von Faktoren bzw. Ereignissen, die die verfahrensspezifischen Produktivitäten positiv oder negativ beeinflussten. Für alle Verfahren galt, dass die Bedingungen im Bestand II vor allem durch die Flächendeckung mit Hiebsresten zurückliegender Eingriffe eher an der Grenze dessen lagen, was man aus Aspekten einer sinnvollen Arbeitsvorbereitung für entsprechende Bucheckern-Voraussaaten noch akzeptieren konnte. Die Sachleistungen der untersuchten Bodenverwundungsverfahren wichen zwischen den Versuchsbeständen nicht signifikant voneinander ab, wobei allerdings innerhalb der Verfahren deutliche Unterschiede bestanden. Bei den Saatverfahren dominierte mit einer hohen Sachleistung das Verfahren *ÖkoSat/U*, welches selbst unter den Flächenausprägungen im zweiten Bestand bei Produktivitätseinbußen von 66 % noch die höchste Leistung im vorliegenden Vergleich aufwies. Das Verfahren *EggeSaat* reagierte zwischen diesen Bestandesdifferenzen am geringsten, während das am *Weilmünster Waldgrubber* ausgerichtete Saatverfahren den höchsten Zeitverbrauch aufwies. Die relativ geringe Produktivität dieses Verfahrens wurde noch dadurch gemindert, dass es nicht möglich war, die im Sinn des Arbeitsauftrags geforderte Saatgutmenge auszubringen (s. o.).

Um die wichtigsten Einflussgrößen der jeweiligen Verfahrens-Produktivitäten aufzudecken, wurden die erfassten Zeitverbrauchswerte der einzelnen Ereignisse geclustert. Über autoselektive Regressionen gelang es, die verfahrenstypisch wichtigsten leistungsbeeinflussenden Merkmale herauszustellen. So zeigte sich bei den „schnelleren“ Bodenverwundungsverfahren deutlich, dass die Phasen der Orientierung des Gespannführers neben den von ihm zu erbringenden Räumungsaktivitäten den Arbeitsablauf zeitlich signifikant verzögerten. Bei den Saatverfahren tritt die Orientierung in den Hintergrund, denn sie kann normalerweise mit den hier signifikanten Phasen der Wiederherstellung der Betriebsfähigkeit der Saataggregate verknüpft werden. Auch bei den Saatverfahren erwiesen sich die zu beseitigenden Abraumreste als signifikant leistungshemmend. Die Statistik bestätigt letztlich, was im Grunde plausibel erscheint: derartige Arbeitsverfahren stehen und fallen mit der reibungslosen Zugänglichkeit der Flächen.

Dienten die Arbeitsablaufstudien innerhalb der streifenweisen Versuchsvariante vorrangig der Analyse der den Arbeitsablauf störenden Faktoren, so rückte bei der praxisnahen Bearbeitungsvariante die praxiskonforme Ermittlung des Zeitverbrauchs in den Vordergrund. Da die Bearbeitung dieser Flächen vergleichsweise zeitaufwändig war, bleibt der Stichprobenumfang auf so geringem Niveau, dass sich hier statistische Absicherungen der Daten nicht durchführen ließen. Während bei der Produktivitätsanalyse der Streifenstudien bewusst die Wendemanöver am Ende der vorgegebenen Reihen ausgeblendet wurden, mussten diese Aktionen bei den

Flächenbearbeitungen innerhalb der praxisnahen Variante berücksichtigt werden. Dies führte zunächst zu einem plausiblen Sinken der Sachleistungen aller Verfahren, wenn man sie den Ergebnissen der streifenweisen Bearbeitungsvariante gegenüberstellte. Bei den Bodenverwundungsverfahren und insbesondere beim Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* bereiteten die teils steilen und v. a. abraumüberlagerten Flächen in der zweiten Bestandsvariante Probleme. Die Leistungseinbuße im Vergleich zum Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* wurde hier unter sonst vergleichbaren Bedingungen besonders deutlich. Bei einem Produktivitätsvergleich der Saatverfahren ergab sich folgende Reihenfolge der Streifenbearbeitung: Die höchsten Leistungen erzielte das Verfahren *ÖkoSat/U*. Das Verfahren *EggeSaat* provozierte deutlich längere Bearbeitungswege und fiel deshalb im Vergleich sichtbar ab. Der *Weilmünster Waldgrubber* deklassierte sich wiederum durch eine geringe Produktivität sowie der nicht ausreichenden Ausbringungsmenge des Saatgutes. Die nachteiligen Arbeitsbedingungen in der zweiten Bestandsvariante wirkten bei allen Verfahren leistungshemmend.

## 7.2.2 Ökonomische Aspekte der Verfahrensbewertung

Die auf Basis der Zeitstudienenergebnisse der praxisnahen Bearbeitungsvariante durchgeführten Regressionsanalysen erlaubten es nicht, gleitende Mittelwerte für die Zielgröße zu berechnen, um diese bei der Herleitung von Planzeiten zu berücksichtigen. Ein solches Unterfangen muss sich für die untersuchten Arbeitsverfahren auf deutlich höhere Wiederholungszahlen und ein separates Versuchsdesign stützen.

Für eine ökonomische Bewertung der vorgestellten Arbeitsverfahren zur Bucheckern-Voraussaat mussten daher als Basis die mittleren Zeitverbrauchswerte der jeweiligen Verfahren in den zwei Bestandsvarianten verwendet werden. Die in der Studie für einen erfahrenen Pferdeführer mit gut trainierten Pferden erfassten Zeitwerte wurden über einen durchschnittlichen Leistungsgrad von 135 % normiert. Für die Berücksichtigung der Allgemeinen Zeit erschien aus ergonomischer und arbeitsmethodischer Hinsicht ein pauschaler Zuschlag in Höhe von 35 % zur ermittelten Arbeiter-Normalzeit gerechtfertigt. Die entsprechend hergeleiteten Zeitbedarfswerte dienten nach dem Verschneiden mit der gewählten Bezugseinheit, hier einer Teilfläche mit der Größe von 0,1 ha, einem Vergleich der Sachleistungen der untersuchten pferdegestützten Arbeitsverfahren.

Die präsentierten Produktivitäten können hingegen nur bedingt mit bisherigen Angaben aus der Literatur verglichen werden, da im Zentrum dieser Untersuchungen der waldbauliche Aspekt von Buchensaat stand. Aus diesem Grund wurden vielfach keine Sachleistungen angeführt oder basierten auf forstbetrieblichen Erfahrungswerten ohne detaillierte Informationen zu den jeweiligen Rahmenbedingungen. Darüber hinaus bezogen sich die Werte des angeführten Zeitbedarfs stets auf flächige Saaten mit einer Größe von einem Hektar (vgl. LEDER UND WAGNER, 1996; LANDESFORSTVERWALTUNG NRW, 1997; KWF, 1999).

Eine ökonomische Bewertung von Arbeitsverfahren setzt voraus, dass die Kosten der darin eingesetzten Menschen, Pferde und Betriebsmittel je Zeiteinheit kalkuliert werden. Der Einsatz von Pferden in der Waldarbeit wird aus den verschiedensten Gründen regelmäßig wieder gefordert. Vielfach werden dabei imageträchtige und romantisierende Gesichtspunkte in den Vordergrund gerückt. Dabei muss man sich jedoch vor Augen halten, dass der Pferdeführer neben der eigentlichen Tätigkeit innerhalb des jeweiligen Arbeitsverfahrens im Vorfeld sowie im Anschluss des Pferdeinsatzes zahlreiche Nebentätigkeiten verrichten muss, um eine tiergerechte Haltung und Pflege zu gewährleisten. Dies geschieht nicht nur an Arbeitstagen, sondern ist permanent über ein gesamtes Pferdeleben sicherzustellen. Dieser Umstand muss daher genauso wie der Transport von Pferd und Betriebsmittel – dies vor allem vor dem Hintergrund steigender Treibstoffkosten und zunehmender Entfernungen zum Einsatzort – bei der

Kalkulation Berücksichtigung finden. In Kapitel 6.2.4.1 wurden aus diesem Grund bereits etablierte Kalkulationsschemata präsentiert, um die Kosten einer Pferdeeinsatzstunde inkl. Pferdeführer zu berechnen (vgl. GOTTLOB UND SCHERER, 1994). Hierbei fanden aktuelle Durchschnittspreise für z. B. die Hinzupachtung von Weideland, Tierfutter und Hufschmied Berücksichtigung. Darüber hinaus wurden mittlere Nutzungsdauern für Pferde, Geschirr und Zweiachsanhänger zum Umsetzen der Tiere genauso berücksichtigt wie die tägliche Pferdepflege und der Transport zum Einsatzort. Dieser hergeleitete Stundensatz für das Arbeitsgespann von Pferdeführer und Tier in Höhe von 46,37 € ist nachvollziehbar gewissen Schwankungen unterworfen, die sich insbesondere aus der Betriebsstruktur, der Auslastung der Pferde sowie den Personalkosten zusammensetzen. Im Vergleich mit in der Literatur angeführten Werten fällt dieser Stundensatz relativ hoch aus, den beispielsweise WEIß (1987) bei vergleichbarer Auslastung eines Pferdes ohne Berücksichtigung der Kosten für den Pferdeführer und Transport mit umgerechnet 5,54 € angibt. Diese Kosten entsprechen gut der Hälfte der in der vorliegenden Arbeit präsentierten Sätze für Sach- und Pflegekosten. Für das Jahr 1999 hat SCHRÖDER (1999) im Rahmen einer Befragung von 77 Pferdeführern in Baden-Württemberg einen durchschnittlichen Stundensatz von umgerechnet ca. 27 € ermittelt. Dies deckt sich nahezu mit den veranschlagten Kosten von gut 26 € für Pferd und Pferdeführer, die vielfach in der Literatur angeführt werden (vgl. GOTTLOB, 1992; GOTTLOB UND SCHERER, 1994; LANDESFORSTVERWALTUNG NRW, 1997). Zieht man den von SCHRÖDER (1999) recherchierten Maximalwert des Stundensatzes für ein Pferd inkl. Pferdeführer von nahezu 36 € heran, so liegt selbst dieser deutlich unter dem in der vorliegenden Arbeit kalkulierten. Mit dem angegebenen Verdienst sind nach SCHRÖDER (1999) gut 60 % der Befragten unzufrieden und von den berücksichtigten Nebenerwerbsfuhrleuten gaben annähernd 54 % an, dass die Erlöse des Pferdeeinsatzes die Kosten der Pferdehaltung nicht einmal zur Hälfte decken. Als Hauptgründe für die Spannweite der angeführten Stundensätze gelten die Liebhaberei des Pferderückens oder die Existenz eines angeschlossenen, landwirtschaftlichen Betriebes. Diese Umstände können zwar verlohnungstaktisch als günstig erscheinen, zehren allerdings auf die Dauer an der Substanz des Berufsstandes. Die dargelegte hohe Kostenbelastung je Stunde erfordert eine hohe Produktivität in dem jeweiligen Arbeitsverfahren, um im Vergleich mit teil- und vollmechanisierten Alternativverfahren konkurrenzfähig zu sein und somit die in der Kalkulation berücksichtigte jährliche Auslastung zu gewährleisten. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das hier präsentierte Kalkulationsschema dem betriebswirtschaftlich versierten Pferdeführer eine transparente Grundlage liefert, den Stundensatz für den betrieblich individuellen Pferdeeinsatz zu berechnen.

Das Schema zur Kalkulation der Gerätekosten orientierte sich an der einfachen Ingenieurformel. Hierbei wurden die Unterschiede zwischen einfachmechanisierten Streifenpflügen und kombinierten Rillensaataggregaten in den Anschaffungspreisen sowie der Verfügbarkeit dieser Aggregate auf dem Markt dargestellt (Kapitel 6.2.4.2). Die Kosten für den Geräteeinsatz je Arbeitsstunde sind bei den einfacher konzipierten Streifenpflügen um nahezu die Hälfte geringer als bei den kombinierten Saataggregaten. Diese Geräte sind in der Regel im Besitz von Pferdeführern, die deren Einsatz in ihrem Leistungsangebot neben der Holzurückung anbieten. Aus den Erfahrungen dieser Studie ist die Anwendung dieser Verfahren bei den geschilderten Arbeitsaufgaben trotz des angeführten Bedarfs als eher gering anzusehen. Demgegenüber stehen schleppergezogene Anbaugeräte, die eine deutlich höhere Produktivität aufweisen, jedoch fallen die Anschaffungspreise auch gut um das Doppelte höher aus als die der technisch simpleren Konstruktionen für den Pferdezug (vgl. KWF, 1999)

Eine vergleichende Darstellung der ausgewählten Kriterien wurde bisher getrennt nach Arbeitssystemen vorgenommen. Auf Basis der abgeleiteten Produktivitäten, dem aktuellen Preis für Rotbuchen-Saatgut und der kalkulatorischen Grundlagen der Pferdeeinsatz- sowie Gerätekosten erfolgte eine vergleichende Darstellung der Gesamtkosten für die Bucheckern-Voraussaat mit den untersuchten Arbeitsverfahren im Kapitel 6.2.5. Im Gegensatz zum manu-

ellen Verfahren der Plätzeaat fielen die Kosten der an den untersuchten Streifenpflügen ausgerichteten Verfahren geringer aus. Dies liegt vor allem in der Bodenvorbereitung (Abziehen der Humusaufgabe) begründet, da die Kosten der manuellen die der teilmechanisierten Freilegung des Mineralbodens deutlich übersteigen. Die kombinierte Rillensaat mit den drei Aggregaten ist um ca. 25 % kostengünstiger als die Plätzeaat nach Bodenvorbereitung durch einen Streifenpflug. Bei den Saatverfahren rangiert, nach steigenden Kosten aufgeführt, das Aggregat *EggeSaat* vor *ÖkoSat/U* und *Weilmünster Waldgrubber*. Das am *Weilmünster Waldgrubber* ausgerichtete Arbeitsverfahren schnitt aufgrund des diskontinuierlichen Arbeitsablaufs und der hohen Gerätekosten in einem Einspännerverfahren im Vergleich am schlechtesten ab. Die bereits in Kapitel 6.2.2 dargelegte Störanfälligkeit der einzelnen Aggregate bei schlecht zugänglichen Flächen bestätigte diese Bewertung. So wies lediglich das Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* identische Kostensätze in den beiden Bestandsvarianten bei gleicher Produktivität auf. Bei den übrigen Verfahren stiegen die Kosten zwischen 2 % (*EggeSaat*) und 7 % (*ÖkoSat/U* und *Weilmünster Waldgrubber*) unter den erschwerten Arbeitsbedingungen in der zweiten Bestandsvariante an.

### 7.2.3 Ökologische Aspekte der Verfahrensbewertung

Ein wesentlicher ökologischer Gesichtspunkt einer vergleichenden Wertung der untersuchten Arbeitsverfahren muss sich an dem waldbaulichen Zweck solcher Arbeitsverfahren orientieren: der Buchenverjüngung unter Fichtenschirm. Der Auflauf der durchgeführten Saaten wurde über die quantitative Entwicklung der Keimlinge bzw. Sämlinge erfasst (vgl. Kapitel 6.3.2). In den Flächen des ersten Versuchsbestandes konnten im Herbst 2001 deutlich mehr Keimlinge aufgefunden werden als in der zweiten Bestandsvariante. Bei der Vollaufnahme wurden über alle Verfahren und Bestandsvarianten hinweg über 90 % der Keimlinge als vital eingestuft. Dies kann allerdings auch auf den späten Aufnahmezeitpunkt im Herbst zurückgeführt werden, so dass Schädigungen, die über den Sommer auftraten, ggf. bis zu diesem Zeitpunkt bereits zum Ausfall der jeweiligen Pflanze führten.

Im Vergleich zu den sich an der Saatgutqualität orientierenden potenziellen Keimlingszahlen wurde in den mit den Streifenpflügen vorbereiteten und durch plätzweise Handsaat begründeten Teilflächen im Vergleich zur Rillensaat ein besserer Keimerfolg nachgewiesen. Allerdings lagen auch hier die aufgefundenen Keimprozent z. B. bei ca. 4 % (*Meinberg Wundstreifenpflug*) im Bestand I, während in der zweiten Bestandsvariante kaum noch ein Zehntel dieses Prozentwertes erreicht werden konnte. Bei der kombinierten Rillensaat zeigte das Verfahren *ÖkoSat/U* ein vergleichbar gutes Ergebnis, welches allerdings normiert über die erwartete Keimlingszahl ebenfalls bei ca. 4 % lag. In den mit den Verfahren *EggeSaat* und *Weilmünster Waldgrubber* besäten Teilflächen wurde ein Auflaufprozent in der ersten Bestandsvariante von ca. 1 % und im Bestand II über alle Saatverfahren deutlich darunter erfasst. Die in der vorliegenden Studie dokumentierten Pflanzenzahlen nach den Voraussaaten fallen im Vergleich mit verschiedenen Untersuchungen der Sektion Waldbau innerhalb des Deutschen Verbandes Forstlicher Versuchsanstalten gering aus. So wurde hier für verschiedene Versuchsflächen der manuellen Saat in Nordrhein-Westfalen zum Ende der ersten Vegetationsperiode ein Auflaufprozent der Saaten von 18 %, in Bayern 19 % und in Sachsen sogar 34 % der mit Pflanzen belegten Saatplätze beobachtet (vgl. LEDER ET AL., 2003). Weitere Studien zeigen hingegen, dass die Spannweite der dokumentierten Auflaufprozent von 1–60 % groß ausfällt. Daran ist abzulesen, dass selbst bei auf waldbauliche Aspekte fokussierten Versuchsanlagen ein hohes Risiko bzgl. des Erfolgs entsprechender Maßnahmen besteht (vgl. LEDER, 1998; NÖRR, 2004; DRÖSLER ET AL., 2005).

Bei einer zweiten Aufnahme der für eine Wiederholungsmessung markierten, vitalen Keimlinge im Folgesommer der Saaten wurden Ausfallprozent von über 20 % bei allen Verfahren regist-

riert, wobei der Pflanzenausfall in der zweiten Bestandsvariante im Schnitt deutlich höher ausfiel. Diese Ergebnisse weisen auf eine plausible Beziehung zwischen der Arbeitsqualität, insbesondere hinsichtlich der Freilegung des Mineralbodens und der anschließenden Abdeckung der Eckern mit einem Humus/Mineralbodengemisch, und dem Keimerfolg hin. Dieser Zusammenhang konnte jedoch im Rahmen der vorliegenden Studie statistisch nicht belegt werden. Generell verdeutlicht der geringe Keimerfolg über alle Arbeitsverfahren die hohen Anfangsrisiken einer Buchensaat. Die geschilderten Ausfälle auf den Saatplätzen bzw. innerhalb der Saatreihen im Jahr der Saat sind vielfach auf die Aufnahme der vielfach nur mäßig abgedeckten Eckern durch z. B. Nagetiere und Vögel zurückzuführen (vgl. GUERDAT, 1997; NÖRR, 2004). Die gesäten Verjüngungen sind darüber hinaus vielen abiotischen und biotischen Gefahren ausgesetzt, die wie bereits beschrieben die Pflanzenzahl ebenfalls stark minimieren. Innerhalb der Saatreihen wurden vereinzelt Laufgänge von Mäusen erfasst. Zudem sind einzelne Keimlinge aus den Saatrillen bzw. Plätzen herausgezogen und von der Ecker bis zu den Keimblättern gefressen worden, was den Verdacht auf Wühlmäuse zulässt. Bei erhöhter Keimlingsdichte mussten teilweise erhebliche Pflanzenausfälle durch Hasenverbiss registriert werden, während ein Verbiss durch Schalenwild in den vorliegenden Saatversuchen durch die Umzäunung der Fläche verhindert werden konnte (vgl. Kapitel 3.4.4). GUERDAT (1997) zeigt in Versuchen zur Freilandbegründung von Treibholzarten mit direkten Saaten, dass die Verwendung von Plastiksaatkegeln den Keimerfolg deutlich erhöhte, da diese Minitreibhäuser einen wesentlichen Schutz gegen Schädigung der Keimlinge durch Schnecken und Käfern bieten. NÖRR (2004) stellte mit Hilfe von aufwändig konstruierten Drahtkäfigen deutlich den Einfluss von Vögeln, Eichhörnchen und Mäusen auf den Saaterfolg dar.

Vor dem Hintergrund der hohen Pflanzenverluste in den ersten Jahren nach der Saat ist es zwingend erforderlich, die waldbaulichen Rahmenbedingungen zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 3.4.1), damit sich die hohen Investitionen für die forstbetriebliche Praxis im Waldumbau auch lohnen. Die vorliegenden Erhebungen waren schwerpunktmäßig nicht auf eine waldbauliche Wertung der Saaten in Abhängigkeit standörtlicher Voraussetzungen oder der Konkurrenz zur Fichtennaturverjüngung ausgerichtet. Aus diesem Grund erfolgte keine nähere waldbauliche Quantifizierung der genannten Gefährdungen, denen die Saaten ausgesetzt waren. Die Ausführungen basierten auf Beobachtungen während der Flächenbetreuung in den Jahren 2001–2003. Zu näheren Informationen über waldbauliche Aspekte sei unter anderem auf LEDER (1998), AMMER (2000), LEDER ET AL. (2003), NÖRR, 2004 sowie DRÖBLER ET AL. (2005) verwiesen. Auf Basis der Ergebnisse dieser Untersuchungen sowie Erfahrungen aus der forstbetrieblichen Praxis wurden verschiedene Merkblätter zur Thematik der Buchensaat erarbeitet, wie z. B. LANDESFORSTVERWALTUNG NORDRHEIN-WESTFALEN (1998), KWF (1999) und LWF (2004).

Eine Verschneidung der durchschnittlichen Keimlingszahlen auf den Teilflächen mit den Kosten der Saat je Kleinfläche aus Kapitel 6.3.4.2 liefert eine Rangfolge der Arbeitsverfahren, die angibt, welches Arbeitsverfahren ein vorteilhaftes Kosten-/Leistungsverhältnis aufweist. Es zeigte sich unter normalen Bestandesbedingungen, dass beim Verfahren *ÖkoSat/U* die Kosten pro Keimling am geringsten waren, gefolgt vom *Meinberg Wundstreifenpflug*, *EggeSaat* und *Weilmünster Waldgrubber*. Das Verfahren *Eberswalder Streifenpflug* konnte aufgrund nicht vergleichbarer Keimlingszahlen nicht berücksichtigt werden. In der zweiten Bestandsvariante ergab sich eine veränderte Reihenfolge der Arbeitsverfahren. Die mit Abstand niedrigste finanzielle Belastung je Keimling wies wiederum das Saatverfahren *ÖkoSat/U* aus, daran schlossen die Verfahren *Weilmünster Waldgrubber*, *Meinberg Wundstreifenpflug*, *Eberswalder Streifenpflug* und *EggeSaat* an. Im Bestand I schwankten die Begründungskosten je Keimling zwischen 0,4–2,4 €, während sich die Kosten in der zweiten Bestandsvariante im Bereich von 5,8–11,6 €/St. bewegten.

Neben dem waldbaulichen Ziel besagter Arbeitsverfahren, das eindeutig den ökologischen Vorteilen des Waldumbaus zuzuordnen ist, ergeben sich gewisse Einschränkungen beim Einsatz dieser teilmechanisierten Arbeitsverfahren. So müssen vor allem die Störfaktoren in Hinsicht auf den Fichtenbestand in eine vergleichende Bewertung dieser Verfahren mit einbezogen werden. Pferde werden bezüglich mechanischer Verletzungen am Fichtenstamm sowie der Wurzel durch Abscheren der Rinde und Freilegen des Holzkörpers günstiger beurteilt als motorisierte Zugmittel wie z. B. aufgerüstete Ackerschlepper (vgl. Kapitel 5.3.3). Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurden die in den bearbeiteten Versuchsflächen aufgetretenen Verletzungen an oberirdischen Holzkörpern getrennt nach Größenklassen dargestellt (Kapitel 6.3.3.2). Bei den erfassten Verletzungen handelte es sich schwerpunktmäßig um Abschürfungen der Rinde und Schnittverletzungen, die durch Kontakte mit dem jeweiligen Aggregat zustande kamen. Durch die beschlagenen Hufe der Pferde konnten nur selten Stammverletzungen registriert werden. Der größte Anteil der Verletzungen entfiel auf bodennahe Wurzelanläufe und untere Stammteile. Die Häufigkeit dieser Ereignisse über alle Verfahren in der ersten Bestandsvariante fiel im Mittel mit unter einer Verletzung je Teilfläche gering aus. Ausnahmen stellten die am *Meinberg Wundstreifenpflug* ausgerichteten Arbeitsverfahren dar, hier traten die häufigsten Verletzungen in beiden Bestandsvarianten auf.

Das über alle Verfahren vermehrte Auftreten von Verletzungen in der zweiten Bestandsvariante konnte genauso wenig statistisch abgesichert werden wie ein Zusammenhang zwischen den jeweiligen Flächenausprägungen (z. B. Anzahl von Fichten, Stockanzahlen und Deckung Schlagabraum) und der Wahrscheinlichkeit eines Verletzungsereignisses. So bleibt nur die Vermutung, dass mit zunehmender Deckung der zu bearbeitenden Fläche mit Hiebsresten sowie geringen Baumabständen in Kombination mit breiten und langen Arbeitsgespannen (z. B. in den Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* und *EggeSaat*) die Wahrscheinlichkeit eines Verletzungsereignisses zunimmt. Bei einer näheren Betrachtung der Wundgrößen zeigte sich, dass die vierte Kategorie ( $> 10 \text{ cm}^2$ ) am häufigsten registriert wurde, gefolgt von den Kleinstschäden ( $< 5 \text{ cm}^2$ ). Insbesondere die für Fichte als kritisch eingestufte Verletzungsfläche von  $> 10 \text{ cm}^2$  wurde anhand des von MENG (1978) definierten Schadensprozents als Vergleichsmaßstab bewertend herangezogen. Das Schadensprozent der zweiten Bestandsvariante fiel höher aus als im Bestand I. In der ersten Bestandsvariante wurden durchschnittlich weniger als 2 % der auf den Teilflächen stockenden Fichten beschädigt. Bei den Bodenverwundungsverfahren und dem Saatverfahren *EggeSaat* wurde mit ca. 1,7 % und 1,5 % das im Verfahrenvergleich der ersten Bestandsvariante höchste Schadensprozent festgestellt. Beim Verfahren *ÖkoSat/U* betrug es hier lediglich 0,3 %. Im Bestand II wurden bei den Bodenverwundungsverfahren Mittelwerte des Schadensprozents von ca. 4 % registriert, während das im Verfahrenvergleich höchste Schadensprozent im Bestand II auf das Verfahren *EggeSaat* (6,0 %) entfiel. Zur vergleichenden Diskussion der Ergebnisse sind zu den in der vorliegenden Studie präsentierten Arbeitsverfahren keine Veröffentlichungen bekannt, da schwerpunktmäßig Baumschadensanalysen bei Arbeitsverfahren der Holzernte bzw. Holzurückung erfolgten. Ein Überblick zu den darin nachgewiesenen und im Vergleich zu den in der vorliegenden Arbeit dargestellten Schadprozents i. d. R. höheren Werten ist u. a. AGREN (1969), MENG (1978), DENNINGER (1991), SUWALA (1997), SUWALA ET AL. (2000) und BACHER-WINTERHALTER (2004) zu entnehmen.

Lokal begrenzte Beschädigungen der Rinde und eine Freilegung des Holzkörpers, wie in der vorliegenden Studie durch die Betriebsmittel verursacht, führen in der Regel zu keiner bedeutenden physiologischen Schwächung und damit auch zu keinem Zurückbleiben des Einzelbaums im Wachstum (vgl. MENG, 1978). Einen weiteren bei den vorliegenden Verletzungen zu berücksichtigenden Gesichtspunkt stellen die so geschaffenen Eintrittspforten für Pilzinfektionen dar. Insbesondere, weil entsprechende Frühjahrssaaten während der Vegetationszeit durchgeführt werden, steigt das Risiko einer Hauptinfektion durch den Wurzelschwamm (*Heterobasidion annosum*), der gerade in Fichtenbeständen eine große Rolle bei der wirtschaftlichen

Entwertung des Rohholzes spielt (vgl. DIMITRI, 1986; BUTIN, 1996; SCHÖNHAR, 2001). Bei den registrierten mechanischen Verletzungen muss vor dem Hintergrund einer Wertminderung des stockenden Fichtenbestandes die in Kapitel 3.4.3 angeführte Ausgangssituation berücksichtigt werden. So betrug der Anteil der vor allem nach Rindenschälung hauptsächlich durch Rotwild mit Wurzelschwamm infizierten und bereits rotfaulen Fichten in den untersuchten Bestandsvarianten über 50 %. Handelt es sich hingegen bei der Ausgangssituation um gesunde bzw. nur gering rotfaule Bestände, so ist zu bedenken, dass sich das Risiko durch eine Bodenverwundung und vor allem Beschädigung des Wurzelbereichs erhöhen kann. Zu den Infektionswegen sowie der Entwicklung von Stammfäule bei Fichte sei auf GUGLHÖR (1999), SCHÖNHAR (2001) und BLASCHKE ET AL. (2004) verwiesen.

Im Hinblick auf die angestrebte Minimierung von Verletzungsereignissen nimmt der Pferdeführer in den untersuchten Arbeitsverfahren eine bedeutende Stellung ein. Die geforderte Sorgfalt bei der Durchführung der Arbeiten wird vor allem durch die Erfahrung mit pferdegezogenen Betriebsmitteln und insbesondere durch die Übersichtlichkeit des Arbeitsgespanns bestimmt.

Vor dem Hintergrund einer potenziellen Infektion holzerstörender Pilze in Fichtenbeständen (s. o.) kommt den Wurzelverletzungen bei der Bodenbearbeitung eine besondere Bedeutung zu. Dies ist bei dem untersuchten Einsatz der Betriebsmittel zusätzlich problematisch, da im Sinn der Arbeitsaufgabe ein Eingriff in den Oberboden durch die Werkzeuge der eingesetzten Aggregate erforderlich wird. Hierbei ist jedoch gerade durch das flachstreifende Wurzelsystem der Fichte eine Beschädigung dieser Wurzeln kaum zu vermeiden. Die im Boden vorkommenden Sporen des Pilzes können dann Wundstellen sofort besiedeln. Somit ist in den untersuchten Arbeitsverfahren eine möglichst geringe Anzahl an Wurzelverletzungen durch mechanische Einwirkung anzustreben und muss im Zuge einer Bewertung berücksichtigt werden. Die quantitative Erhebung der Wurzelverletzungen wurde im Kapitel 6.3.3.3 anhand der Ergebnisse der durchgeführten Stichprobenerhebung dokumentiert. Einhergehend mit den untersuchten Arbeitsaufgaben und den Bestandesverhältnissen ergab sich, dass im Mittel bei 70 % der Beobachtungen eine Verletzung des oberirdischen Wurzelwerkes aufgefunden wurde, wobei die Verfahren *EggeSaat* und *Meinberg Wundstreifenpflug* am häufigsten Schäden verursachten. Im Vergleich zu den Bearbeitungstiefen (Kapitel 6.3.1) fällt hier auf, dass beim Verfahren *ÖkoSat/U* trotz der mit den Bodenverwundungsverfahren nach Meinberg vergleichbaren Arbeitstiefen deutlich weniger Verletzungen an den Wurzeln erfasst wurden. Diese Tatsache ist sehr wahrscheinlich auf die Erhebungsmethodik zurückzuführen, da die relativ schmale, nach der Saat wieder verschlossene Saattrille im Saatverfahren *ÖkoSat/U* erst wieder freigelegt werden musste. Hierbei fielen die Beschädigungen weniger deutlich auf als bei den im Durchschnitt > 40 cm breiten Arbeitsstreifen der Verfahren *Meinberg Wundstreifenpflug* und *EggeSaat*. Durchtrennte Wurzeln wurden schwerpunktmäßig bei den Verfahren *EggeSaat* mit ca. 36 % und *Weilmünster Waldgrubber* (ca. 17 %) aufgefunden, bei den übrigen Verfahren betrug der Anteil an Stichprobenpunkten mit diesem Ereignis unter 10 %. Die Konstruktion des Federzinkengrubbers sorgte dafür, dass in nahezu 40 % dieser Fälle einzelne Wurzeln über mehrere Meter aus dem Boden herausgelöst wurden und so nach der Saat frei auf dem Waldboden lagen. Beim Verfahren *EggeSaat* verhakten sich ebenfalls Wurzeln in den kleineren Scheibeneggen der Säeinheit des Aggregates und wurden bei ca. 14 % der Beobachtungen aus dem Wurzelgeflecht herausgerissen. Zu den hier bestätigten Wurzelverletzungen der untersuchten Arbeitsverfahren können keine Vergleichswerte sowie mögliche Auswirkungen auf den Fichtenbestand aus der Literatur angeführt werden, da Wurzelverletzungen schwerpunktmäßig im Zusammenhang mit der Befahrung von Waldstandorten und in den vergangenen Jahren hauptsächlich im Vergleich unterschiedlicher Fahrwerkskonfigurationen von selbstfahrenden Großmaschinen untersucht wurden (vgl. BECKER ET AL., 1986; KREMER ET AL., 2003; UHL ET AL., 2004 und MATTHIES ET AL., 2005). Aus den geschilderten Verletzungsereignissen und dem Risiko einer Erstinfizierung oder der Verbreitung holzersetzender Pilze im Fichtenbestand ergibt sich die mögliche Konsequenz, dass die Anwendung dieser Arbeitsverfahren sich auf Bestän-

de beschränken sollte, in denen das wirtschaftliche Schwergewicht des Forstbetriebes nicht mehr auf der Fichte liegt und eine weitere Entwertung vertretbar erscheint.

Die Untersuchung der Bodendurchlüftung unter dem Pferdehuftritt bzw. der Spur eines für den Forsteinsatz aufgerüsteten Ackerschleppers fällt nicht direkt in die vergleichende Bewertung der hier vorgestellten Arbeitsverfahren, da hier das Aggregat (in diesem Fall der *Meinberg Wundstreifenpflug*) zwar identisch war, sich jedoch das Zugmittel änderte. In Kapitel 5.3.4 wurde vor diesem Hintergrund die besondere Bedeutung des Bodens als Kulturgut und Produktionsgrundlage bei der Waldbewirtschaftung dargestellt und insbesondere die Bedeutung der Zugmittelwahl von Tier vs. Schlepper hinsichtlich der Bodenverdichtung dargelegt.

Der Zugmitteleinsatz von Pferd und Schlepper bei der Bodenvorbereitung vermindert im Vergleich zu einer Referenzfläche die konvektive Luftleitfähigkeit unterhalb des Hufabdrucks und der Schlepperspur nur gering. Eine vorsichtige Beurteilung der erfassten Werte des Bodenlufthaushaltes in Waldböden erfolgte nach einer Klassifikation von KREMER (1998). Diese weist drei Permeabilitätsklassen aus und orientiert sich neben den gasbezogenen Transferparametern auch an den Auswirkungen der forstlichen Vegetation wie Naturverjüngung, Volumenzuwachs, Wurzelentwicklung etc. Es zeigte sich, dass sich innerhalb der für die Referenzfläche angegebenen beeinträchtigten Belüftungssituation durch die aktuelle Befahrung bzw. den Betritt die Werte an die Klassenuntergrenze verschieben, jedoch nicht dem kritischen Bereich zugeordnet werden können. In der Fahrspur des Schleppers wurden im Vergleich zum Huf leicht geringere  $k_i$ -Werte erfasst. Diese schlechtere Belüftungssituation konnte jedoch statistisch nicht abgesichert werden. Die Untersuchung lässt erkennen, dass bei diesem Einsatzgebiet der Bodenvorbereitung unter der Fahrspur eines für den bodenschonenden Einsatz ausgestatteten Schleppers (in diesem Fall ein MB-trac mit Niederquerschnittreifen und einem Reifeninnendruck von 0,5 bar) keine schlechtere Bodendurchlüftung herrschte als unter dem Huftritt des Pferdes. Die vielfach in der Literatur geäußerten Bedenken, dass der Einsatz von selbstfahrenden Maschinen auf Waldböden zwangsläufig zu einer gravierenden Strukturveränderung des Waldbodens führt, kann bei dieser im Vergleich zur Holzurückung leichteren Arbeitsaufgabe der Bodenbearbeitung nicht bestätigt werden (vgl. SCHACK-KIRCHNER UND HILDEBRAND, 1994; WALKER, 1994 sowie WILPERT, 1998).

#### 7.2.4 Ergonomische Aspekte der Verfahrensbewertung

Die Bearbeitung der Versuchsflächen erfolgte stets durch ein und denselben versierten Pferdeführer, der langjährige Erfahrung und entsprechende Sachkunde im täglichen Umgang mit den Pferden in Land- und Forstwirtschaft aufwies. Eine arbeitsmedizinische und leistungsphysiologische Eingangsuntersuchung attestierte innerhalb dieser Studie eine gute und der Arbeitsaufgabe entsprechende Kondition des Probanden. Die Ergebnisse aus den Herzfrequenzmessungen erlauben den Schluss, dass unter den für den Pferdeinsatz normalen Arbeitsbedingungen in Bestand I die in der Studie erbrachten Leistungen auf Dauer über mehrere Arbeitsschichten hinweg gehalten werden können. Unter den erschwerten Bedingungen in der zweiten Bestandsvariante wird der Gespannführer z. B. durch ein anderes Pausenregime seine Leistungshergabe mindern müssen. Derartig hohe Arbeitsbelastungen können ein erhöhtes Risiko für das kardiovaskuläre System darstellen. Die eigenverantwortlich vorgenommenen Arbeitsunterbrechungen sind daher für die Erholung unabdingbar.

Die in der vorliegenden Arbeit aufgrund der Probandenauswahl günstige Ausgangssituation erlaubt nur eine bedingte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die normalen in Deutschland anzutreffende Verhältnisse. Der Grund hierfür liegt darin, dass die zur Verfügung stehenden Pferdeführer dieser Tätigkeit vielfach im Nebenerwerb nachkommen und somit ihr Trainings-

zustand, vor allem aber der ihrer Pferde nicht zwingend mit den hier dokumentierten vergleichbar ist.

Auch die in der vorliegenden Studie eingesetzten Rheinisch-Deutschen Kaltblutpferde aus dem Betrieb des Probanden wiesen einen sehr guten Trainingszustand auf. Diese Tatsache bestätigte eine tierärztliche Eingangsuntersuchung. Je nach dem untersuchten Arbeitsverfahren wurde das ältere Pferd (P1) allein oder im Gespann mit dem acht Jahre jüngeren (P2) eingesetzt. Das Hauptaugenmerk der tierphysiologischen Untersuchung lag auf dem älteren und mit dem Umgang der Aggregate erfahreneren Tier P1.

Die Belastung der Pferde wurde während der Bearbeitungen mit den jeweiligen Betriebsmitteln anhand der Kräfte zwischen Tier und Betriebsmittel im Geschirr vergleichend dargestellt (vgl. Kapitel 6.5.1). Darüber hinaus wurde auf Basis der Zugkraft und der aggregatabhängigen Korrektur über den Zugwinkel sowie der Bearbeitungsgeschwindigkeit die äußere Leistung des Pferdes innerhalb der unterschiedlichen Arbeitsverfahren berechnet. Der Einfluss aus der höheren Neigung in den Flächen des Bestandes II auf die erbrachte Leistung konnte aufgrund der großen Einzelstreuung der Messwerte, dem diskontinuierlichen Arbeitsablauf und dem geringen Stichprobenumfang nicht näher belegt werden. Ein Abgleich der berechneten Leistungen mit der Eigenmasse des Tieres P1 von 770 kg zeigt, dass es bei den Bodenverwundungsverfahren durchschnittlich 0,4 W/kg und bei den Saatverfahren zwischen 0,2 W/kg (*Weilmünster Waldgrubber*) und 0,7 W/kg (*EggeSaat*) aufbrachte. Diese Werte fallen im Vergleich mit den Literaturangaben gering aus, so wiesen BIRLENBACH POTARD ET AL. (1998) für Geschwindigkeiten von 2–6 m/s nach, dass die durch Kaltblutpferde aufzubringende Leistung 4 W/kg beträgt, während Vollblüter 8 W/kg leisten können. PROCTER ET AL. (1934) wiesen beim Pflügen von landwirtschaftlich genutzten Böden innerhalb eines mit der vorliegenden Studie vergleichbaren Geschwindigkeitsbereichs von 0,5–1,4 m/s eine durchschnittliche Leistung je Eigenmasse des Pferdes von 1,8–3,7 W/kg nach.

Hinsichtlich der Zugkraft werden in der Literatur Grenzwerte für eine dem Tier zumutbare Dauerzugkraft angegeben, die sich an der Gewichtskraft des Pferdes orientiert und ca. 10–15 % betragen sollte (vgl. u. a. HOPFEN, 1969; GOE UND McDOWELL, 1980; KWF, 1990; HOFFMANN, 1992; VALL, 1996). Bei dem in der Studie eingesetzten Pferd P1 resultiert daraus eine durchschnittlich zumutbare Dauerzugkraft von ca. 755–1.130 N (vgl. Kapitel 6.5.1). Bei Betrachtung der ausgewiesenen Mittelwerte der Zugkraft während der Gesamttätigkeit (Primär- und Sekundärtätigkeiten) blieben diese deutlich unter der gesetzten Grenze. Bei den Mittelwerten der Zugkraft während der Primärtätigkeit zeigte sich, dass bei den in der Regel „leichteren“ Bodenverwundungsaggregaten die erfassten Kräfte stets unter dem individuell zumutbaren Bereich lagen. Bei den Saatverfahren konnten im Bestand I Zugkräfte innerhalb der Empfehlung für die Dauerzugkraft registriert werden, unter den erschwerten Bedingungen des zweiten Versuchsbestandes lagen die Mittelwerte beim Verfahren *ÖkoSat/U* wenn auch an der Obergrenze, so doch noch innerhalb des Grenzbereiches während beim Verfahren *Weilmünster Waldgrubber* der gesetzte Richtwert überschritten wurde.

Bei den vorgestellten Werten der Zugkraft muss berücksichtigt werden, dass es sich bei den in den Versuchen eingesetzten Tieren um Pferde mit einem sehr guten Trainingszustand handelte. BRUNNER (1942) führte an, dass die zu realisierende Zugkraft bei nicht oder schlecht trainierten Pferden um 25 % geringer zu veranschlagen ist als bei im Sinn der Aufgabe trainierten.

Die Werte der individuellen Herzschlagfrequenz bestätigten die für die Studie sehr guten Voraussetzungen bzgl. der Fitness und des Trainingszustandes der eingesetzten Tiere. Bereits deren Ruhewert lag mit 42 min<sup>-1</sup> beim jüngeren Pferd P2 im Bereich des für Kaltblüter als typisch angegebenen, während das ältere und erfahrenere Pferd P1 eine deutlich niedrigere

Ruheherzfrequenz von  $29 \text{ min}^{-1}$  aufwies, die den entsprechend guten Trainingszustand unterstrich (vgl. HINTZ ET AL., 1989). Für das jüngere Pferd P2 wurden in der Regel höhere Herzfrequenzen nachgewiesen, dies galt insbesondere unter Belastung und bezeugte hier vor allem eine sensiblere Reaktion durch ein Überschießen der Frequenz mit größerer Streuung der Messwerte. Die Herzschlagfrequenzen des älteren Pferdes stiegen ebenfalls bei geänderten Bearbeitungsbedingungen an, im Vergleich zu P2 jedoch deutlich gleichförmiger. Die dargestellten individuellen Unterschiede weisen zum einen auf den deutlichen Altersunterschied hin und lassen zum anderen einen Rückschluss auf eine unabgestimmte Arbeitsweise der Pferde im Gespann zu (vgl. HINTZ ET AL., 1989; SNOW, 1990). Für die Arbeitsverfahren, in denen ein Pferdegespann die untersuchten Betriebsmittel zog, konnte für beide Versuchspferde festgehalten werden, dass sie sich bezüglich der Herzfrequenzanpassung als Reaktion auf die sich aus dem Verfahren und der Bestandsvariante ergebenden Belastung ähnlich verhielten (vgl. Kapitel 6.5.2.2). Der jeweilige Anstieg und Verlauf der Herzfrequenzwerte in der zeitlichen Abfolge der Belastung sowie das Erreichen eines Erhaltungswertes, wie er vielfach in der Literatur beschrieben ist (vgl. KRZYWANEK ET AL., 1970; LINDHOLM UND SALTIN, 1974; ART ET AL., 1990; HARKINS UND KAMERLING, 1991; SCHÄFER, 2000), konnte lediglich anhand von Minuten-Mittelwerten für die einzelnen Saatverfahren dargestellt werden (vgl. Abbildung 30). Die Höhe des „Steady State“ sowie die teilweise enorme Streuung des jeweiligen Mittelwertes ergaben sich aus den verfahrensspezifischen Belastungen von Betriebsmittel, Zugkraft, Bestand usw. sowie dem damit verbundenen Arbeitsablauf und dessen Unterbrechungen.

In Bezug auf die Auswirkung von Verfahren und Bestandesbedingungen auf die Herzschlagfrequenz der Pferde wurde wie bereits bei der Zugkraft der Schwerpunkt auf die vergleichende Untersuchung der erfassten Werte des Tieres P1 gelegt. Diese blieben während der Flächenbearbeitung stets in tiermedizinisch tolerierten Schranken. Hinsichtlich der den Arbeitsablauf störenden Faktoren (v. a. Hiebsreste) verhielt sich die Herzfrequenz des Pferdes umgekehrt proportional zur entsprechenden Belastung des Pferdeführers. Je häufiger eine Beseitigung dieser Störfaktoren durch den Fuhrmann auftrat und je länger diese andauerte, desto intensiver konnten die Pferde diese Unterbrechung zur Erholung nutzen (vgl. Abbildung 27). Vor dem Hintergrund eines Verfahrensvergleichs können die Herzschlagfrequenzen während der Gesamttätigkeit, also Primär- und Sekundäraktivitäten, des Tieres P1 herangezogen werden. Diese bewegten sich bei den Saatverfahren unter den für den Pferdeinsatz einfacheren Bestandesverhältnissen in einem Bereich zwischen ca.  $75 \text{ min}^{-1}$  beim Verfahren *ÖkoSat/U* und  $103 \text{ min}^{-1}$  beim Saatverfahren *EggeSaat*. Im Bestand II sanken die Herzschlagfrequenzen und es zeigte sich, dass das Verfahren mit dem größten Anteil an Arbeitsunterbrechungen (*Weilmünster Waldgrubber*) die im Vergleich geringste Herzfrequenz ( $48 \text{ min}^{-1}$ ) aufwies und somit lediglich um  $20 \text{ min}^{-1}$  über dem individuellen Ruhewert lag. Der höchste Wert wurde wiederum im Verfahren *EggeSaat* mit ca.  $96 \text{ min}^{-1}$  erfasst. Ein Vergleich mit Angaben aus Untersuchungen anderer Autoren ist nur bedingt möglich, da nicht nur die Tätigkeiten differierten, sondern auch methodische Unterschiede vorlagen. In verschiedenen Studien mit Zugbelastungen bis  $1.000 \text{ N}$  erfasste PEREZ (1992A, 1992B und 1996) mittlere Herzfrequenzen nach Belastung von  $78\text{--}118 \text{ min}^{-1}$ . Anhand der Herzschlagfrequenz drei Minuten nach Belastungsende wurde in Anlehnung an VALL (1996) die gute körperliche Verfassung und Regenerationsfähigkeit des Pferdes näher dargelegt (vgl. Kapitel 6.5.2.3). Im Gegensatz zu den Untersuchungsergebnissen von VALL (1996) befanden sich die in der vorliegenden Studie registrierten Herzfrequenzen deutlich unter dem dort für leichte Zugarbeiten angegebenen Bereich.

Die Analyse des Laktatgehaltes im Blut der Pferde unterstrich die tierphysiologisch günstigen Voraussetzungen in der vorliegende Studie. Der Laktatruhwert im Blut der Versuchspferde lag mit  $0,7 \text{ mmol/l}$  (P1) bzw.  $0,9 \text{ mmol/l}$  (P2) am unteren Bereich der vielfach in der Literatur angeführten Werte (vgl. LINDNER, 1997; SCHÄFER, 2000).

Im Zuge der Flächenbearbeitung mit den untersuchten Arbeitsverfahren innerhalb der Bestandsvarianten konnten Laktatgehalte im Pferdeblut nachgewiesen werden, die sich mit

maximal 1,5 mmol/l beim Versuchspferd P2 im Verfahren *ÖkoSat/U* gegenüber dem Ruhewert nur marginal erhöhten. Die Intensität der Tätigkeit war durch den guten Trainingszustand der Versuchspferde nicht ausreichend, um den anaeroben Schwellenwert zu überschreiten. Die Belastung der Tiere blieb somit in jenem Bereich innerer Leistung, in dem die Energiezufuhr aerob gedeckt werden konnte. In Abhängigkeit von der vorangegangenen Belastung werden in der Literatur Laktatkonzentrationen im Pferdeblut von mehr als 30 mmol/l bei Vielseitigkeitsprüfungen und Galopprennen angegeben (vgl. SNOW ET AL., 1983 und MARLIN ET AL., 1995). Beim Fahrsport und Distanzreiten konnten Konzentrationen von 2–10 mmol/l erfasst werden (vgl. GROSSKOPF ET AL., 1983; SNOW, 1990 und LINDER, 1997). Bei Arbeitspferden wurden z. B. beim Pflügen mit geringen Geschwindigkeiten und vergleichbaren Zugkräften, Blutlaktatkonzentrationen von bis zu 4 mmol/l nachgewiesen (vgl. GOTTLIEB ET AL., 1989; GOTTLIEB ET AL., 1991; PÉREZ ET AL., 1992 sowie PÉREZ ET AL., 1996).

## 8 Zusammenfassung

In vielen Forstbetrieben wird der Umbau von nicht standortgemäßer Fichtenreinbestockung durch Einbringung der Rotbuche gefordert. Mit den zu erziehenden Buchen-Fichten- oder Fichten-Buchen-Mischbeständen soll die langfristige Entwicklung zum strukturreichen und stufigen Dauerwald eingeleitet werden. Diese Aufgabe fordert ökonomische und ökologische Verfahren der Einbringung einer Mischbaumart. Als kostengünstige Alternative zum Buchen-Voranbau wird vor allem nach Mastjahren die Saat von Bucheckern betrachtet. Neben Handsaatverfahren und dem Einsatz von Anhängeaggregaten für den Forstschlepper wurden nach Abwägung ökonomischer und ökologischer Forderungen in den zurückliegenden Jahren immer wieder pferdegestützte Arbeitsverfahren propagiert.

In der vorliegenden Arbeit wurden aktuelle pferdegestützte Arbeitsverfahren zur Bucheckern-Vorausaat in Fichtenreinbeständen einer vergleichenden wissenschaftlichen Untersuchung unterzogen. Im Fokus standen zwei Arbeitssysteme mit den verschiedenen Arbeitsaufgaben der Bodenvorbereitung und kombinierten Rillensaat. Zudem differierten die Systeme in ihren Arbeitsverfahren, bei denen unterschiedliche pferdegezogene Betriebsmittel zum Einsatz kamen. Insgesamt erfolgte die Betrachtung von fünf Verfahren, nämlich zwei Bodenverwundungsverfahren mit anschließender plätzeweisen Handsaat und drei kombinierte einfachmechanisierte Rillensaatverfahren.

Für die Durchführung der Arbeiten stand ein erfahrener Forst-Dienstleister mit seinen Pferden zur Verfügung. Alle Verfahren wurden unter für den Pferdeeinsatz *normalen* und *erschweren* Arbeitsbedingungen im Eggegebirge in Nordrhein-Westfalen erprobt.

Als Grundlage der Verfahrensbewertung dienten Ergebnisse aus einem für Feldstudien entwickelten, mehrdimensionalen Erhebungskonzept. In diesem wurden aktuelle methodische Aspekte vereint, um kombiniert und integrativ technische, ökonomische, ökologische sowie ergonomische Kriterien der jeweiligen Verfahren zu erfassen. Vergleichbare wissenschaftliche Untersuchungen zu diesen Arbeitsverfahren lagen bisher nicht vor.

Zu den technischen Aspekten zählten neben konstruktiven Elementen der jeweiligen Aggregate auch die Produktivität der Arbeitsverfahren sowie sie beeinflussende Größen. Das Bodenverwundungsverfahren *Eberswalder Streifenpflug* zeigte eine hohe Leistung, wobei sich der Schlagabraum stark auf die Kontinuität des Arbeitsablaufes und somit auch auf die Produktivität auswirkte. Eine Bearbeitung konnte oft erst nach einer manuellen Teil-Flächenräumung durch den Pferdeführer stattfinden. Zudem war ein häufiges Eingreifen des Fuhrmanns erforderlich, um das Aggregat in der Spur zu halten. Mit diesem Arbeitsverfahren erfolgte eine gute Freilegung des Mineralbodens, die jedoch in ihrer Kontinuität von vorhandenem Schlagabraum und Stöcken stark beeinflusst wurde. Vor allem der tiefe Eingriff des Pflugschars in den mineralischen Oberboden sorgte für einen höheren Zugkraftbedarf als bei dem zweiten Streifenpflug.

Bei vergleichbarer Eigenmasse des *Meinberg Wundstreifenpflugs* fiel die Zugkraft bedingt durch die frei abrollenden Scheibeneggen und den somit verringerten Bodenwiderständen um gut ein Viertel geringer aus als beim Verfahren *Eberswalder Streifenpflug*. Darüber hinaus zeigte dieses Aggregat innerhalb des Arbeitsverfahrens eine hohe Funktionalität und gute Leistung, die insbesondere auch bei einer ungünstigen Flächenausprägung durch Schlagabraum und Hangneigung vorhanden war. Durch die robuste und funktionelle Konstruktion mit vertikal beweglichen rollenden Scheiben war es möglich, über Hiebsreste und Stöcke zu fahren, was allerdings die kontinuierliche Mineralbodenfreilegung behinderte. Zudem konnten nur geringe Bearbeitungstiefen mit dieser Scheibenpflugvariante erzielt werden. Die Orientierung im Be-

stand und das Räumen von Hiebsresten auf den zu bearbeitenden Flächen durch den Pferdeführer beeinflussten signifikant die Sachleistung beider Bodenverwundungsverfahren.

Das auf das Betriebsmittel *ÖkoSat/U* abgestimmte Rillensaatterfahren war mit Abstand am leistungsfähigsten. Mit diesem Aggregat konnte über einzelne Hiebsreste (kleinere Kronen und Äste) gefahren werden, ohne dass der Saatvorgang unterbrochen wurde. Mit zunehmender Flächendeckung durch Schlagabraum stieg nicht nur der Anteil der erforderlichen Flächenräumung, sondern auch deutlich der registrierte Zugkraftbedarf. Mit diesem Saatverfahren erfolgte eine auch unter erschwerten Bedingungen kontinuierliche und tiefe Bearbeitung, so dass das Saatgut gleichmäßig in die Saatrille abgelegt und diese fest verschlossen wurde.

Die Rillensaart mit der *EggeSaat* fiel durch einen kontinuierlichen Arbeitsablauf auf, allerdings wurde durch einzelne zeitaufwändige Fehlerbereinigungen am Aggregat die ansonsten gute Leistung beeinträchtigt. Die konstruktive Anordnung durch eine Anhängung an den *Meinberg Wundstreifenpflug* und die dadurch erzielte Gerätelänge sowie hohe Eigenmasse sorgten für einen hohen Zugkraftbedarf dieses Einspännerverfahrens. Im Vergleich zeigte das Verfahren auch unter ungünstigen Flächenverhältnissen kaum Leistungseinbußen. Die Ausbringung der Bucheckern wurde jedoch häufig unterbrochen und die Säeinheit ermöglichte keine ausreichende Einarbeitung des Saatguts in den Mineralboden.

Der *Weilmünster Waldgrubber* mit Saataggregat überzeugte dagegen während der gesamten Versuchsdurchführung nicht. Das Verfahren wies mit deutlichem Abstand die geringste Produktivität auf, die sich vor allem aus dem hohen Anteil an Sekundäraktivitäten innerhalb des Zeitverbrauchs ergab. Auch hier war häufig ein Orientieren im Bestand und Räumen auf den Flächen erforderlich. Neben Schlagabraum behinderten zusätzlich flach anstehende Wurzeln des Fichtenaltbestandes den Arbeitsablauf stark. Diese waren im Zuge eines Verhakens mit den Federzinken Auslöser für Zugkraftspitzen und somit verantwortlich für den höchsten Zugkraftbedarf im Vergleich. Eine weitere Deklassierung des Verfahrens verursachte die nicht zu variierende Saatgutdosierung, so dass trotz erhöhtem Bearbeitungsgrad nur ca. die Hälfte des angestrebten Saatgutes auf der Fläche ausgebracht werden konnte. Vielfach unbearbeitete Teilstrecken, eine sehr geringe Bearbeitungstiefe einhergehend mit einem geringen Kontakt zum Mineralboden und eine mangelnde Abdeckung der Saatrille ließen dieses Verfahren innerhalb der untersuchten Arbeitsbedingungen am schlechtesten abschneiden.

Auf Basis der durchgeführten Zeitstudien erfolgte eine ökonomische Bewertung der Arbeitsverfahren anhand der Zeitbedarfswerte für die Bearbeitung einer Teilfläche in der Größe von 0,1 ha. Darüber hinaus wurden Gerätekosten sowie Kosten einer Pferdeinsatzstunde kalkuliert. Die Gesamtkosten der kombinierten Rillensaatterfahren fielen im Durchschnitt um 25% niedriger aus als die plätzeweise Handsaat im Anschluss an die Bodenvorbereitung durch einen der Streifenpflüge. Dabei schloss das Verfahren *EggeSaat* am günstigsten ab, gefolgt vom Zweispännerverfahren *ÖkoSat/U*. Das Saatverfahren *Weilmünster Waldgrubber* hielt dem Vergleich am schlechtesten stand, was auf die geringe Produktivität in Kombination mit den hohen Gerätekosten zurückzuführen war. Eine Verschneidung der Saatkosten mit den durchschnittlichen Keimlingszahlen auf den Kleinflächen zeigte, dass bei der Saat unter normalen Bestandesbedingungen mit dem Verfahren *ÖkoSat/U* geringere Kosten je Keimling entstanden als bei den übrigen Verfahren. Unter erschwerten Arbeitsbedingungen stieg die finanzielle Belastung je Keimling über alle Verfahren an, wobei wiederum das Verfahren *ÖkoSat/U* am besten abschnitt.

Als Kriterium der ökologischen Bewertung wurden zunächst der Keimerfolg und die erste quantitative Entwicklung der durchgeführten Frühjahrssaaten präsentiert. Ein teilweise sehr geringer Auflauf der Buchensaart über alle Verfahren verdeutlichte die hohen Anfangsrisiken.

Tendenziell ließ sich bestätigen, dass Mineralbodenkontakt und eine gute sowie feste Abdeckung der Bucheckern mit Mineralboden den Keimerfolg positiv beeinflussten. Ein Vergleich der Arbeitsverfahren zeigte, dass beim Verfahren *ÖkoSat/U* sowie den beiden Bodenverwundungsverfahren mit anschließender Handsaat geringere Verluste erfasst wurden als bei den Verfahren *EggeSaat* und *Weilmünster Waldgrubber*.

Die durch die Aggregate verursachten mechanischen Verletzungen an den Fichten waren schwerpunktmäßig kleinflächiger Art und das Schadprozent fiel geringer aus als z. B. beim Rücken von Rohholz mit Pferden. Die meisten Verletzungsereignisse wurden bei dem von Meinberg konzipierten Streifenflug und Saataggregat erfasst. Mit Abstand die geringsten Beschädigungen provozierte das Saatverfahren *ÖkoSat/U*. Die registrierten Wurzelverletzungen bei der Bodenbearbeitung fielen am häufigsten bei den Verfahren *EggeSaat* und *Weilmünster Waldgrubber* auf.

Nicht in das entwickelte mehrdimensionale Erhebungskonzept zu integrieren, waren die Untersuchungen zur Strukturveränderung des Waldbodens über die Bestimmung der konvektiven Leitfähigkeit der Bodenluft in der Schlepperspur und im Pferdehuftritt. Bei beiden Zugmitteln konnten im Vergleich zur Referenzfläche geringere Luftleitfähigkeiten nachgewiesen werden. Eine Bewertung dieser Belüftungssituation über bestehende Klassifikationen zeigte jedoch nur einen geringen bodenökologischen Effekt innerhalb dieser Arbeitsaufgaben. Ein Unterschied zwischen der Bodendurchlüftung unter der Fahrspur und dem Pferdehuf konnte nicht nachgewiesen werden.

In die ergonomische Bewertung der untersuchten Arbeitsverfahren flossen neben der Beanspruchungsanalyse des Probanden mit Hilfe der Herzfrequenz auch die Erfassung tierphysiologischer Belastungs- und Beanspruchungsparameter ein. Unter den erschwerten Arbeitsbedingungen kam es zu einer deutlichen Verschiebung der Aktivitäten. Dominierte bei den für den Pferdeinsatz als normal geltenden Bestandesverhältnissen die Hauptaktivität, so wurde diese von ablaufkonformen Zusatz- und Nebentätigkeiten in der zweiten Bestandsvariante eingeholt. Die humanphysiologischen Untersuchungen ergaben für die Arbeit unter den ungünstigeren Arbeitsbedingungen, dass der Pferdeführer (unabhängig von den Verfahren) oberhalb der Grenze der arbeitsmedizinisch tolerierbaren Dauerleistung arbeitete. Diese Tatsache ergab sich aus der vermehrten Räumaktivität sowie dem erschwerten Führen der Pferde am Hang.

Den gut trainierten Pferden wurden vor allem unter den schwierigeren Voraussetzungen bei der Bearbeitung mit den Saatverfahren maximale Zugkräfte zugemutet. Bei den Verhältnissen in der ersten Bestandsvariante bzw. mit den leichteren Aggregaten zur Bodenverwundung lagen die erfassten Zugkräfte im Rahmen der erträglichen Dauerzugkraft. Die Herz-Kreislauf-Belastung der Pferde verhielt sich hinsichtlich der äußeren leistungsbeeinflussenden Faktoren wie z. B. Hiebsresten umgekehrt proportional zur entsprechenden Belastung des Pferdeführers. Je häufiger diese Störfaktoren beseitigt werden mussten, desto intensiver konnten die Pferde diese Unterbrechung zur Erholung nutzen. Die Herzfrequenz der Versuchspferde befand sich während der Bearbeitungsvarianten stets in tiermedizinisch tolerierten Bereichen. Auch die Analyse des Blutlaktats bestätigte, dass die Belastung der Tiere in jenem Bereich innerer Leistung verblieb, in dem die Energiezufuhr aerob gedeckt werden konnte.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Arbeitsverfahren zur Bucheckern-Voraussaat unter Berücksichtigung der dargelegten Gesichtspunkte eine interessante Alternative bei der Umwandlung von Fichtenreinbeständen darstellen. Aufgezeigt wurden die konstruktiven Vor- bzw. Nachteile pferdegezogener Aggregate und die daraus resultierende Eignung für die jeweilige Arbeitsaufgabe bei entsprechender Flächenausprägung.

Bei gutem Trainingszustand der eingesetzten Pferde und Fuhrleute bestehen keine gesundheitlichen Bedenken bei der Arbeit mit den Geräten. An ihre Grenzen stoßen die Verfahren bei starker Flächendeckung durch Hiebsreste vergangener Eingriffe und zunehmender Hangneigung. Im Vergleich zur rein manuellen Handsaat liegen die Leistungen dieser Verfahren höher und verursachen insgesamt geringere Kosten. Die Gefährdung des ausgebrachten Saatgutes und der jungen Buchenpflanzen durch eine Vielzahl von möglichen biotischen und abiotischen Schädigungen können den Saaterfolg sehr stark beeinträchtigen. Aus diesem Grund muss sich die angestrebte Buchensaat auf Fichtenbestände beziehen, in denen hinsichtlich Standort, Schlussgrad, Alter, Vegetation etc. optimale waldbauliche Voraussetzungen gegeben sind. Um die Kosten dieser Umwandlungsmaßnahme zu reduzieren, sollte das Saatgut in Mastjahren in Eigenregie des Forstbetriebes geerntet werden und eine Bearbeitung durch regionale Fuhrleute erfolgen.

## 9 Literaturverzeichnis

**AFZ/Der Wald** – mit der 21. Ausgabe im Jahr 1995 erfolgte die Fusion der Zeitschriften „*Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltsorge (AFZ)*“ und „*Der Wald*“

**AG STANDORTSKARTIERUNG (1985):** Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke in der Bundesrepublik Deutschland. Eching Verlag, München.

**AGREN, A (1969):** Produktionsverluste in Durchforstungsbestände als Folge moderner Rücketechnik. AFZ. 24. Jg. (39): 758.

**ARENHÖVEL, W. (1996):** Waldumbau als Bestandteil des naturnahen Waldbaus. AFZ/DerWald. 51. Jg. (9): 486–489.

**AITKEN, M. M.; SANFORD, J. und MACKENZIE, G (1973):** Factors influencing deceleration of heart and respiratory rates after exercise in the horse. Equine Veterinary Journal. (5): 8–14.

**AMMER, C. (2000):** Untersuchungen zum Einfluss von Fichtenaltbeständen auf die Entwicklung junger Buchen. Habilitationsschrift TU München. Shaker Verlag, Aachen. 185 S.

**AMMER, C. und EL KATEB, H. (2001):** Die Entwicklung von Buchensaat im Vergleich zu Pflanzungen. AFZ/DerWald. 56. Jg. (23): 1208–1210.

**AMMER, C. und WILNHAMMER, M. (2004):** High noon in der Verjüngung – wer zieht am schnellsten. Vergleich von Buchensaat, -pflanzung und Fichtennaturverjüngung. LWF aktuell Nr. 46 (4): 4–6.

**ART, T.; AMORY, H; DESMECHT, D. und LEKEUX, P. (1990):** Effect of show jumping on heart rate, blood lactate and other plasma biochemical values. Equine Veterinary Journal. (9): 78–82.

**BACHER-WINTERHALTER, M. (2004):** Optimierungsmöglichkeiten und Restriktionen eines mechanisierten Holzerntesystems bei der Umsetzung moderner Waldbaukonzepte am Beispiel des Südschwarzwaldes. Dissertation. Freiburg. 206 S.

**BACKHAUS, G. (1990):** Die Allgemeinen Zeiten im forstlichen Arbeitsstudium. Forsttechnische Informationen. 42. Jg. (1): 1–5.

**BACKHAUS, K.; ERICHSON, B.; PLINKE, W. und WEIBER, R. (2000):** Multivariate Analysemethoden – Eine anwendungsorientierte Einführung. 9. überarb. und erw. Auflage. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York. 660 S.

**BAUMHAUER, H. (1996):** Verjüngung durch Saat – ein Beitrag zur Kostensenkung. AFZ/DerWald. 51. Jg. (21): 1192–1194.

**BAYER, A. (1968):** Das Verhalten der Herzschlagfrequenz von Trabrennpferden im Training und beim Rennen. Tierärztliche Wochenschrift (1): 8–11.

**BECK, W. (1994):** Pferde – wertvolle Helfer beim Holzrücken. Forst und Technik. 6. Jg.(1): 4–6.

**BERGER, C. (2003):** Belastungs- und Beanspruchungssituation bei Forstarbeiterinnen: Evaluierung, Analyse und Verbesserungsmaßnahmen. Dissertation. Wien. 102 S.

**BERGMANN, J.-H. (2003):** Denkanstöße: III. Minimierung des finanziellen Aufwandes bei der Begründung von Buchenunterbauten durch Plätzeaat. Forst und Holz. 58. Jg. (4): 97–98.

**BIRLENBACH POTARD, U. S.; LEITH, D. E. und FEDDE, M. R. (1998):** Force, speed and oxygen consumption in Thoroughbred and draft horses. Journal of Applied Physiology (84) 2052–2059.

**BJÖRCK, G. (1958):** Studies on the draught force of horse. Acta Agriculturae Scandinavica (4) 1–109.

**BLUME, H.-P. (1992):** Handbuch des Bodenschutzes: Bodenökologie und -belastung, vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 2. Auflage. Ecomed-Verlag, Landsberg am Lech.

- BMJ (Bundesministerium für Justiz) (1998):** Bundes-Bodenschutzgesetz. Bundesgesetzblatt 1998 Teil 1 Nr. 16 vom 24.03.1998.
- BODELSCHWINGH, E. v.; HÖLDRICH, A. und SOMMER, W. (2003):** PDA statt Stoppuhr – Neue Möglichkeiten im Bereich forstlicher Zeitstudien. AFZ/Der Wald. 58. Jg. (26): 1334–1336.
- BÖLTZ, K. (1988):** Entwicklung der Psycho-physischen Belastung und Beanspruchung als Folge der Mechanisierung und Teilautomatisierung der Holzernte. Dissertation. Freiburg im Breisgau. 223 S.
- BÖNIN, A. (1999):** Pferde an die Arbeit, Landwirtschaft mit Pferden – am Beispiel der Waldbewirtschaftung. Diplomarbeit. Kassel. 79 S.
- BRAND-SASSEN, H. (2004):** Bodenschutz in der deutschen Landwirtschaft – Stand und Verbesserungsmöglichkeiten. Dissertation. Göttingen. 307 S.
- BRUNNER, E. und MUNZEL, U. (2002):** Nichtparametrische Datenanalyse – Unverbundene Stichproben. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York. 312 S.
- BUHLE, P. (1923):** Das Zugpferd und seine Leistungen. Stuttgart, 135 S.
- BURSCHEL, P. (1990):** Waldumbau; Belastung für die Gegenwart – Hoffnung für die Zukunft. AFZ. 45. Jg. (3): 57 - 59.
- BUTIN, H. (1996):** Krankheiten der Wald- und Parkbäume. 3. Auflage. Thieme Verlag, Stuttgart.
- BUTTER, D. (2001):** 10 Jahre Waldumbau in Sachsen. AFZ/Der Wald. 56. Jg. (19): 995–997.
- CEEMAT/FAO (1972):** The employment of draught animals in agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy. 249 p.
- CERNY, K. (1987):** Möglichkeiten, Grenzen und Organisation des Pferdeinsatzes in der Holzbringung. AFZ. 31. Jg. (51/52): 1348.
- DAHMER, J. (1998):** Wurzelentwicklung bei Winkel- und Lochpflanzung im Vergleich: Einfluss der Pflanzmethode noch nach 40 Jahren noch erkennbar. AFZ/Der Wald. 53. Jg. (18): 964 - 965.
- DEGREIF, E. (1987):** Beim Pferdezug wirkende Kräfte und Widerstände. AFZ. 42. Jg (51/52): 1352–1353.
- DENNINGER, W. (1991):** Das Ausmaß und die Bewertung von Baumverletzungen beim Vorrücken von Nadelholz mit dem Pferd. Forst und Technik 3. Jg. (12): 8–10.
- DIETZ, P. (1981):** Vermeidung und Behandlung von Rückeschäden. AFZ 36. Jg. (12): 263–265.
- DIMITRI, L. (1986):** Biologie der Stammfäule, ihre Bedeutung für den Waldbau und die Möglichkeiten ihrer Verhütung. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen. 137 Jg. (5): 377–388.
- DÖRFLINGER, H. (1992):** Struktur und Entwicklung des Marktes für forstliches Saat- und Pflanzgut. AFZ/Der Wald. 47. Jg. (5): 210 - 213.
- DREWES, D. (2004):** Zugkraft- und Schlupfmessungen an Forstmaschinen. Hottinger HOTLine (1): 16–17, Darmstadt.
- EHRLEIN, H. J. (1970):** Untersuchung über die Herzschlagfrequenz als Maß für die Leistungsfähigkeit von Pferden. Habilitationsschrift. Tierärztliche Hochschule Hannover.
- EHRLEIN, H. J.; HÖRNICKE, H.; VON ENGELHARDT, W. und TOLKMITT, G. (1973):** Die Herzschlagfrequenz während standardisierter Belastung als Maß für die Leistungsfähigkeit von Pferden. Zentralblatt für Veterinärmedizin. (20): 188–208.
- EIJKELKAMP AGRISearch EQUIPMENT (1983):** The air permeameter – for determining the air permeability of undisturbed soil samples. Giesbeek/Niederlande.

- ERLER, J. (2000):** Forsttechnik: Verfahrensbewertung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart. 246 S..
- FSC (2001):** Deutscher FSC – Standard vom 28. November 2001, <http://www.fsc-deutschland.de/docs/richtlin/fscstand.pdf> (Zugriffsdatum: 16.02.02)
- FLEDER, W. (1991):** Erfahrung mit Unterbau und Voranbau der Buche in Unterfranken. AFZ. 45. Jg. (6): 307 - 309.
- FN (2002):** FN-Jahresbericht 2002. Deutsche Reiterliche Vereinigung e. V.; Bundesverband für Pferdesport und Pferdezucht – Fédération Equestre Nationale. Warendorf.
- FREGIN, F. und THOMAS, D. P. (1983):** Cardiovascular response to exercise in the horse: a review. In: SNOW, D.H.; PERSSON, S. G. B. und ROSE, R. J. (Hrsg.): Equine Exercise Physiology 1 Granta Editions, Cambridge, 76–89
- FRÖBA, D. (1992):** Pferdeinsatz und Mechanisierung im 19. und 20. Jahrhundert. Das Zugpferd (4): 10.
- GERSTENGABE, F.W., BADECK, F., HATTERMANN, F., KRYSANOVA, V., LAHMER, W., LASCH, P., STOCK, M., SUCKOW, F., WECHSUNG, F. und WERNER, P. C. (2003):** Studie zu klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und den Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK Report, No. 83, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam.
- GILLE, K. (2000):** Langfristige Bucheckernlagerung in Abhängigkeit vom Früchtewassergehalt. Forst und Holz. 55. Jg. (6): 181–184.
- GOE, M. R. and MCDOWELL, R. E. (1980):** Animal traction: guidelines for utilization. International Agricultural Development Mimeograph 81, Ithaca/USA: Cornell University. 84 S.
- GOMMEL, H. J. (1994):** Umbau von Fichten-Beständen durch Buchen-Saat. AFZ 49. Jg. (10): 516–518.
- GOTTLIEB, M., ESSEN-GUSTAVSSON, B., LINDHOLM, A. und PERSSON, S. G. B. (1988):** Circulatory and muscle metabolic response to draught work compared to increasing trotting velocities. Equine Veterinary Journal. 20:430–434.
- GOTTLIEB, M., ESSEN-GUSTAVSSON, B. und SKOGLUND-WALLBERG, H. (1989):** Blood and muscle metabolic responses to draught work of varying intensity and duration in horses. Research in Veterinary Science. (47): 102–109.
- GOTTLIEB-VEDI, M.; PERSSON, S. G. B.; ERICKSON, B. und KORBUTIAK, E. (1995):** Cardiovascular, respiratory and metabolic effects of interval training at VLA4. Journal of Veterinary Medicine Series A. (42) 165–175
- GOTTLIEB, M., ESSEN-GUSTAVSSON, B. und PERSSON, S. G. B. (1991):** Draught load and speed compared by submaximal tests on a treatmill. In: PERSSON, S. G. B.; LINDHOLM, A. und JEFFCOTT, L. B. (Hrsg.): Equine Exercise Physiology 3. Davis/USA: ICEEP Publications, S. 92–96.
- GOTTLLOB, T. (1992):** Pferdeinsatz bei der Holzbringung im mittelstarken Laubholz im Staatlichen Forstamt Bad Driburg/Weserbergland. Diplomarbeit, Universität Göttingen.
- GOTTLLOB, T. und SCHERER, H.-G. (1994):** Rücken mit dem Pferd – Viel Arbeit vor der Arbeit – . Forst und Technik. 6. Jg. (4): 10–13.
- GROSSKOPF, J. F. W.; VAN RENSBURG, J. J. und BERTSCHINGER, H. J. (1983):** Haematology and blood biochemistry of horses during a 210 km endurance ride. In: SNOW, D.H.; PERSSON, S. G. B. und ROSE, R. J. (Hrsg.): Equine Exercise Physiology 1. Cambridge: Granta Editions, S. 416–424.
- GRUBE (2000):** Eberswalder Streifenpflug. GRUBE Fachkatalog, S. 159.
- HÄBERLE, S. (1998):** Das Nachhaltigkeitsprinzip als Determinante für Varianten und Leistung im Forstbetrieb. Forstarchiv. 69 Jg. (3): 104–112.

- HARKINS, J. D. und KAMERLING, S. G. (1991):** Assessment of treadmill intervall training on fitness. *Journal of Equine Veterinary Science*. (11): 237–242.
- HARRIS, R.C.; MARLIN, D.J. und SNOW, D.H. (1991):** Lactate kinetics, plasma ammonia and performance following repeated bouts of maximal exercise. In: PERSSON, S.G.B.; LINDHOLM, A. und. JEFFCOTT, L.B. (Hrsg.): *Equine Exercise Physiology 3*. Davis. S. 173–178.
- HARRIS, P. und SNOW, D. H. (1992):** Plasma potassium and lactate concentrations in thoroughbred horses during exercise of varying intensity. *Equine veterinary Journal*. (23): 220–225.
- HARTGE K. H. (1964):** Formen und Verbreitungen der im Boden vorkommenden Verdichtungen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde*. (108): 8 – 18.
- HASEL, K. (1985):** Forstgeschichte. Pareys Studentexte.
- HENGSTENBERG, O. (1996):** Analyse der Herzschlagfrequenz mit Methoden der Chaosforschung. Diplomarbeit, TU Berlin, [http://www.wifa.kf.tu-berlin.de/IFA/SA\\_DA/ZUSAMMENFASSUNGEN/743/oh\\_kap2.html](http://www.wifa.kf.tu-berlin.de/IFA/SA_DA/ZUSAMMENFASSUNGEN/743/oh_kap2.html) (Zugriffsdatum: Juni 2001)
- HESSE, S. (1990):** Bodenverdichtung verhindert Kulturerfolg. *AFZ* 45. Jg. (20): 484.
- HILDEBRAND E. E. (1983):** Der Einfluß der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktionen im forstlichen Standort. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*. 102. Jg. (2): 111–125.
- HILDEBRAND E. E. (1987):** Die Struktur der Waldböden – Ein gefährliches Fließgleichgewicht. *AFZ*. 42. Jg. (17): 424–426.
- HINTZ, H. F., COLLYER, C. und BRANT, T. (1989):** Resting heart rates in draft horses. *Equine Pract.* (11): 7–8.
- HODGSON, D. R. und ROSE, R. J. (1994):** *The athletic horse: Principles and practise of equine medicine*. Philadelphia, W. B Saunders Company.
- HOFFMANN, V. (1992):** Untersuchung physischer Beanspruchungen des Pferdes bei Rückarbeiten. Diplomarbeit. Göttingen.
- HOLLÄNDER, H. (1999):** Grundlagen und Methoden zur Planung der Waldentwicklung im Land Brandenburg. Schriftenreihe des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Bd. IV, 13–29.
- HOPFEN, H. J. (1969):** Farm implements for arid and tropical regions. Agricultural Development Paper 91, Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), Rom/Italien.
- HOß, C. (1994):** Menschengerechte Gestaltung des Harvestereinsatzes. Dissertation. Göttingen. 178 S.
- INNS, F. M. (1990):** The mechanics of animal draught cultivation implements. Part 1, chain-pulled implements. *The Agricultural Engineer* 45. (1): 13–17.
- INNS, F. M. (1991):** The mechanics of animal draught cultivation implements. Part 2, beam-pulled implements. *The Agricultural Engineer* 46. (1): 18–21.
- JACKE, H. (1980):** Zur Technik der Regressionsrechnung bei der Analyse Forstlicher Arbeitszeitstudientaten. Dissertation. Göttingen. 204 S.
- JACKE, H. (1989):** Hohe Zugkräfte von Maschinen und Bodenschonung im Forsteinsatz durch richtige Wahl der Bereifung. *Forst und Technik*. 2. Jg. (10/11): 2–9.
- JOHANN, E.; AGNOLETTI, M.; AXELSSON, A.-L.; BÜRGI, M.; ÖSTUND, L.; ROCHEL, X.; SCHMIDT, U. E.; SCHULER, A.; SKOVSGAARD, J. P. und WINIWARTER, V. (2004):** History of Secondary Norway Spruce Forests in Europe. In: SPIECKER et al. (HRSG.): *Norway Spruce Conversion – Options and Consequences*. European Forest institute Research Report 18. Brill Leiden-Boston. S. 25 – 62.

- KAMINSKY, G. (1960):** Arbeitsphysiologische Grundlagen für die Gestaltung der Forstarbeit. Mitteilung der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft. Nr. 46. Hamburg-Reinbek.
- KEENAN, D. M. (1979):** Changes of blood metabolites in horses after racing, with particular reference to uric acid. *Australian Veterinary Journal*. (55): 54–57.
- KLIMMER, F. und RUTENFRANZ, J. (1983):** Folgen mentaler und emotionaler Belastungen. In: ROHMERT, W und RUTENFRANZ, J. (Hrsg.): *Praktische Arbeitsphysiologie*. 3. neubearbeitete Auflage. Thieme Verlag Stuttgart, New York.
- KMOCH, H. G. (1961):** Die Luftdurchlässigkeit des Bodens – Ihre Bestimmung und ihre Bedeutung für einige ackerbaulichen Probleme. Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- KMOCH, H. G. und HANUS H.(1965):** Vereinfachte Methodik und Auswertung der Permeabilitätsmessung des Bodens für Luft. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde*. (111): 1-9..
- KOEBLE, R. und SEUFERT, G. (2002):** Novel Maps for Forest Tree Species in Europe. 2<sup>nd</sup> Carbon Europe Whole Cluster Meeting, 3-8 March 2002, Budapest (H).
- KOROTAEV, A. A. (1992):** Bodenverdichtung und Wurzelwachstum der Bäume. *Forstarchiv*. 63. Jg. 113–119.
- KREMER, J. (1998):** Befahrungsbedingte Strukturveränderungen von Waldböden und ihre Auswirkungen auf das Wachstum von Fichten, Kiefern und Buchen auf ausgewählten Standorten. Dissertation. TU München. 170 S.
- KRZYWANEK, H., WITTKE, G., BAYER, A., BORMAN, P. (1970):** The heart rates of thoroughbred horses during a race. *Equine Veterinary Journal*, (2): 115–117.
- KRZYWANEK, H. (1974):** Lactic acid concentrations and pH values in trotters after racing. *Journal of the South African Veterinary Association*. (45): 355–360.
- KÜHNE, Ch. und BARTSCH, N. (2003):** Zur Naturverjüngung von Fichten-Buchen-Mischbeständen in Soling. *Forst und Holz*. 58 Jg. (1/2): 3 - 7.
- KÜßNER, R. und WICKEL, A. (1998):** Entwicklung einer Buchensaat (*Fagus sylvatica* L) unter Fichte (*Picea abies* L.). *Forstarchiv*. 69. Jg. (5): 191 - 198.
- KRÜGER, F. (2002):** Zur zeitlichen Prognose, räumlichen Verteilung und Heilungsdynamik von durch Wühlmäusen verursachten Nageschäden an Forstpflanzen. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen. 182 S.
- KRZYWANEK, H., D.W. MILNE, A.A. GABEL, und L.G. SMITH (1976):** Acid-base values of standardbred horses recovering from strenuous exercise. *American Journal of veterinary research*. (37): 291–294.
- KWETON, A. UND ZUCKER, A. (1993):** Freiland – Untersuchungen zur flächenhaften Ausdehnung von Befahrungsschäden im Wald. *AFZ*. 48. Jg. (15): 778–780.
- KWF (Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik) (1990):** Holzrücken mit Pferden. Merkblatt NR.7. Groß-Umstadt.
- KWF (Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik) (1999):** Förderung der Naturverjüngung und Saat. Broschüre. Groß-Umstadt.
- LANDESFORSTVERWALTUNG NIEDERSACHSEN (1992):** Niedersächsisches Programm zur langfristigen ökologischen Waldentwicklung in den Landesforsten (LÖWE), Programm der Landesregierung, 48 S.
- LANDESFORSTVERWALTUNG NRW (1997):** Pferdeeinsatz im Wald, ökonomische und ökologische Aspekte, Tagungsführer der Fachtagung im Forstamt Hilchenbach am 05. und 06.09.1997, S. 68.
- LAURIG, W. ; LUCZAK, H. und PHILIPP, U. 1971):** Ermittlung der Pulsfrequenzarrhythmie bei körperlicher Arbeit. *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie*. 30 Jg. (1): 40–51.

- LEDER, B. und WAGNER, S. (1996):** Bucheckern/Streu-Voraussaaten als Alternative beim Umbau von Nadelholzreinbeständen in Mischbestände. Forstarchiv. 67. Jg. (1): 7–13.
- LEDER, B. (1998):** Pflanzenprozentage nach Bucheckern-Voraussaaten unter Fichten-Schirm. Forst und Holz. 53. Jg. (15): 477–481.
- LEDER, B. (2000):** Bodenvorbereitung plätze- und streifenweise; Bucheckern-Voraussaat. In: Tagungsführer zur 13. KWF – Tagung in Celle, KWF und AFZ/Der Wald, Groß-Umstadt, S. 46–51.
- LEDER, B. (2002):** Ektotropher Mykorrhizabesatz an Buchen-Sämlingen unter Fichten-Schirm. Forstarchiv. 73. Jg. (3): 92–97.
- LEDER, B.; WAGNER, S; WOLLMERSTÄDT, J. und AMMER, C. (2003):** Bucheckern-Voraussaat unter Fichtenschirm – Ergebnisse eines Versuchs des Deutschen Verbandes Forstlicher Forschungsanstalten/Sektion Waldbau –. Forstwissenschaftliches Centralblatt. 122. Jg. (3): 160–174.
- LEDER, B. (2004):** Waldumbau im Nationalpark Eifel. In: LÖBF-Mitteilungen 2004, (2): 21–25.
- LEPPER, P., DEBUS, R., HEYDER, J. und SCHMITT, H. P. (1996):** Keimfähigkeit und Stoffwechsel von Bucheckern während Langzeitlagerung. AFZ/ Der Wald 51. Jg. (18): 989–992.
- LEWING, C. (2001):** Ausdauertraining von Sportpferden bei unterschiedlicher Belastungsintensität und -dauer. Dissertation. Hannover.
- LINDHOLM, A. und SALTIN, B. (1974):** The physiological and biochemical response of standardbred horses to exercise of varying speed and duration. Acta Veterinaria Scandinavia. (15): 310–324.
- LINDNER, A.; VON WITTKER, P.; SCHMALD, M.; KUSSEROW, J. und SOMMER, H. (1992):** Maximal lactate concentrations in horses after exercise of different duration and intensity. Journal of Equine Veterinary Science. (12) 36–39.
- LINDNER, A. (1997):** Laktat und Leistung. Verlag Dr. A. Lindner, Bonn.
- LFE (2002):** Dauerleistungsgrenze bei dynamischer Arbeit. Lehrstuhl für Ergonomie der TU München, <http://www.lfe.mw.tu-muenchen.de> (Zugriffsdatum: 14.01.02)
- LÖFFLER, H. (1988):** Waldarbeit im Wandel. Forstwissenschaftliches Centralblatt Jg. 107 95–103.
- LOYCKE, H. J. (1963):** Die Technik der Forstkultur. BLV-Verlag München. 484 S.
- LUDWIG, A. (2004):** Stratifikation von Rotbuchensaatgut – nur etwas für Spezialisten. LWF aktuell Nr. 46 (4): 7.
- LÜPKE, B. v. (2004a):** Risikominderung durch Mischwälder und naturnaher Waldbau: ein Spannungsfeld. Forstarchiv. 75 Jg. (2): 43 – 50.
- LÜPKE, B. v. (2004b):** Steigerung von Stabilität und Diversität durch Waldumbau. Forst und Holz. 59. Jg. (11): 518 – 530.
- MACMILLAN, R. H. (1992):** Which angle of pull? The mechanics of pulling and carrying with draught animals. The Agricultural Engineer 47. (3): 91–92.
- MARLIN, D. J., HARRIS, P. A., SCHROTER, R. C., HARRIS, R. C., ROBERTS, C. A., SCOTT, C. M., ORME, C. E., DUNNETT, M., DYSON, S. J., WILLIAMS, B. MARR, C. M. und CASA, I. (1995):** Physiological, metabolic and biochemical responses of horses competing in the speed and endurance phase of a CCI\*\*\*\* 3-day-event. Equine veterinary Journal. (20): 37–46.
- MATTHIES, D. (2000):** Eine Qualitätsanalyse der bundesländerspezifischen Bundesschutz-Konzepte zum bodenschonenden Forstmaschineneinsatz. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung. 171. Jg. (3): 41 – 46.
- MENG, W. (1978):** Baumverletzungen durch Transportvorgänge bei der Holzernte: Ausmaß und Verteilung, Folgeschäden am Holz und Versuch ihrer Bewertung. Dissertation. Universität Freiburg im Breisgau. Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, Band 53, Stuttgart. 159 S.

- MILLER, P. A. und LAWRENCE, L. M. (1987):** The effect of submaximal treadmill training on heart rate, lactate and ammonia in Quarter Horses. In: GILLESPIE, J.R. u. ROBINSON, N.E. (Hrsg.): Equine Exercise Physiology 2. Davis/USA: ICEEP Publications, Davis, S. 476 – 484.
- MILNE, D.W. (1982):** Biochemical parameters for assessment of conditioning in the horse. Proc. Am. Ass. Equine Pract (28): 49–54.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (1991):** Wald 2000. Gesamtkonzept für eine ökologische Waldbewirtschaftung
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (1994):** Waldnutzung und Walderneuerung im Staatswald des Landes Nordrhein-Westfalen. Ministerialblatt für das Land Nordrhein-Westfalen Nr. 73 vom 28.11.1994.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, RAUMORDNUNG UND LANDWIRTSCHAFT DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (1998):** Merkblatt zur Bucheckern-Voraussaat unter Nadelholzschirm. 25 S.
- MÖHRING, B. (2004):** Betriebswirtschaftliche Analyse des Waldumbaus. Forst und Holz. 59. Jg. (11): 523 – 530.
- MOSANDL, R. und FELBERMEIER, B. (1999):** Auf dem Weg zum naturnahen Wald. AFZ/DerWald. 54. Jg. (17): 910–914.
- MÜLLER, W. (1999):** Anforderungen und Bewertung eines auslegergestützten Pflanzverfahrens für Laubholzgroßpflanzen im Unter- und Voranbau. Dissertation Dresden.
- NACHREINER, F. (2002):** Über einige aktuelle Probleme der Erfassung, Messung und Beurteilung der psychischen Belastung und Beanspruchung. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft. 56. Jg. (1 – 2): 10 – 21.
- NATURLAND (1998):** Richtlinien zur ökologischen Waldnutzung, Naturland e. V. 5. Fassung, Gräfeling.
- NEUBERGER, J. (1993):** Erhebung über die Ausrüstung und die Haltungskosten von Rückepferden im Regierungsbezirk Gießen. Diplomarbeit Hildesheim/Holzminden.
- NICKEL, P.; EILERS, K.; SEEHASE, L. und NACHREINER, F. (2002):** Zur Reliabilität, Validität, Sensitivität und Diagnostizität von Herzfrequenz – und Herzfrequenzvariabilitätsmassen als Indikatoren psychischer Beanspruchung. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft. 56. Jg. (1 – 2): 22 – 36.
- NÖRR, R. (2003):** Pflanzung – ein Risiko für Bestandesstabilität? Entstehung, Entwicklung und Auswirkungen von Wurzeldeformationen. Forstlicher Forschungsbericht Nr. 195. 199 S.
- NÖRR, R. (2004a):** Winkelpflanzung – Rationalisierung auf Kosten der (Wurzel-) Qualität. AFZ/Der Wald. 59. Jg. (5): 220–222.
- NÖRR, R. (2004b):** Buchensaat – ein Thema mit Zukunft. LWF aktuell Nr. 46 (04): 1–3.
- OTT, B. (2002):** Analyse der erfolgsbestimmenden Faktoren buchendominierter Freiflächenkulturen nach Sturmwurf im hessischen Vogelsberg. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Band 182. 180 S.
- OTTO, H.-J. (1993):** Der dynamische Wald. Ökologische Grundlagen der naturnahen Waldbaus. Forst und Holz. 48 Jg. (12): 331 – 335.
- OTTO, H.-J. (1994):** Die Auswirkung waldbaulich-ökologischer Zielsetzung auf den Pflanzenbedarf. Der-Wald. Berlin 44.Jg. (9):294–299.
- OWL: (2001):** Klimadaten Ostwestfalen-Lippe, Wetteranalyse Egge ([http://www.klima-owl.de/presse/110601\\_2.htm](http://www.klima-owl.de/presse/110601_2.htm) ), Paderborn. (Zugriffsdatum: 15.03.02)
- PALMER, S. (1985):** Der Buchen-Vorbau – seine Bedeutung, Planung und Technik. AFZ. 40. Jg. (45): 1217–1220.

- PAMPE, A. (2000):** Zur Konkurrenz von Buche und Fichte in der montanen Stufe des Harzes. Tagungsbericht der Sektion Waldbau in Dessau/Klieken. 95–109.
- PEARSON, R. A.; LAWRENCE P. R. und GHIMIRE, G. (1989):** Factors influencing the work done by draught oxen: a study in the eastern hills of Nepal. Centre for Tropical Veterinary Medicine, Edinburgh, UK.
- PECK, H. (1980):** Intensivierung des Vorbaus in baden-württembergischen Wäldern. AFZ. 35. Jg. (49): 1380 - 1382.
- PEFC (2001):** Das Zertifizierungssystem PEFC-Leitlinien, <http://www.pefc.de/deutschland/betrieblich.htm> (Zugriffsdatum: 16.02.02)
- PÈREZ, R.; RECABARREN, S. E.; MORA, G.; JARA, C.; QUIJADA, G. und HEZ, E. (1992):** Cardiorespiratory parameters in draught horses before and after short term draught work pulling loads. Journal of Veterinary Medicine Series A. (39): 215–222.
- PÈREZ, R.; VALENZUELA, S.; MERINO, V.; CABEZAS, I.; GARCIA, M.; BOU, R. UND ORTIZ, P (1996):** Energetic requirements and physiological adaption of draught horses to ploughing work. Anim. Sci. (63): 343 – 351.
- PERSSON, S. G. B. (1967):** On blood volume and working capacity in horses. Acta Veterinaria Scandinavica. (19): 1 – 189.
- PERSSON, S. G. B. und ULLBERG, L. E. (1974):** Blood volume in relation to exercise tolerance in trotters. Journal of the South African Veterinary Association. (45): 293 – 299.
- PERSSON, S.G.B. (1983):** Analysis of fitness and state of training. Evaluation of exercise tolerance and fitness in the performance horse. In: SNOW, D.H.; PERSSON, S. G. B. und ROSE, R. J. (Hrsg.): Equine Exercise Physiology 1 Granta Editions, Cambridge, S. 441 – 457
- PIEPER, S. (2002):** Durch öffentliche Förderung gesteuerte waldbauliche Entwicklung des Privatwaldes im Bereich der Landwirtschaftskammer Hannover. Forst und Holz. 57. Jg. (10):309 – 312.
- PHYSICK-SHEARD, P. W. (1985):** Cardiovascular response to exercise and training in the horse. Veterinary Clinics of North America-Equine Practice. (1):S. 383 – 417.
- PHYSICK-SHEARD, P. W.; HARMAN, J. C.; SNOW, D. H. und WOAKES, A. J. (1982):** Evaluation of factors influencing the performance of four equine heart rate meters. In: GILLESPIE, J. R. und ROBINSON, N. E. (Hrsg.): Equine exercise physiology Proceeding of the 2nd International Conference, San Diego, S. 102–116.
- POLLMANN, U. (2005):** Klimastation Bad Driburg – Daten. Bad Driburg<http://www.klima-bad-driburg.de> (Zugriffsdatum: 22.01.05).
- POTSCH, M. (1996):** Messung der Luftpermeabilität zur flächenhaften Erfassung von Verdichtungserscheinungen – Eignung und Fallbeispiel. Diplomarbeit. Bayreuth. 98 S.
- RATHE, I. (1995):** Die Anzucht der Eiche in der Baumschule. In: Pflanzenbedarf – Pflanzenanzucht – Pflanztechnik. Tagungsbericht zur KWF-Arbeitstagung 1994 in Friedrichroda. S. 78–82.
- REDDE, N. (2002):** Risiko von Sturm- und Folgeschäden in Abhängigkeit vom Standort und von waldbaulichen Eingriffen bei der Umwandlung von Fichtenreinbeständen. Dissertation. Göttingen. Berichte des Forschungszentrums Waldökosystem. Reihe A, Bd. 179. 171 S..
- REFA, (2004):** Organisation in der Forstwirtschaft – mit REFA-Methoden zu effizienten Arbeitsprozessen. REFA – Fachbuchreihe Arbeitsgestaltung. REFA – Fachausschuss Forstwirtschaft (Hrsg.), 2. überarbeitete Auflage. 270 S.
- REICHERT, A. (1909):** Klinische Untersuchung über die Herzfrequenz unserer Haustiere. Dissertation. Gießen.

- RICHARDS, J. L. und LAWRENCE, P. R. (1984):** The estimation of energy expenditure from heart rate measurements in working oxen and buffalo. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*. (102): 711–717.
- RIPKEN, H. (2003):** Niedersachsens öffentlichen Forstverwaltungen stehen erneut vor gravierenden Einschnitten. *Forst und Holz*. 58. Jg. (18): 554 – 555.
- RIPKEN, H. (2004):** Kritische Betrachtungen zur Multifunktionalität in der Waldbewirtschaftung in Deutschland. *Forst und Holz*. 59. Jg. (3): 99 – 104.
- ROGALL, K. (1968):** Die Bringungsmöglichkeiten von Langholz durch den Ackerschlepper. *Forsttechnische Informationen*. (9): 68–76.
- ROMETSCH, M. und BECKER, K. (1993):** Determination of the Reaction of Heart Rate of Oxen to Draught Work with a Portable Data-Acquisition System. *Journal of Agricultural Engineering research*. (54): 29–36.
- ROPOHL, G. (1999):** Allgemeine Technologie – Eine Systemtheorie der Technik. 2. Auflage. München, Wien; Hansen-Verlag. 335 S.
- ROSE, R. (1983):** Changes in plasma biochemistry in horses competing in a 160 km endurance ride. *Australian Veterinary Journal* (60):101–105.
- ROSE, R. J.; HENDRICKSON, D.K. und KNIGHT, P.K. (1990):** Clinical exercise testing in the normal thoroughbred racehorse. *Australian Veterinary Journal*. (67): 345–348.
- ROSE, R.J. (1991):** Exercise and performance testing in the racehorse: problems, limitations, and potential. *Proc. Am. Ass. Equine Pract.* (36): 491–504
- ROSENAUER, M. (1994):** Edellaubholz aus Voraussaat unter reiner Fichte. *AFZ* (10): 515–516.
- SACHS, L. (2002):** Angewandte Statistik – Anwendung statistischer Methoden. 10. überarb. und akt. Auflage. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York. 890 S.
- SEXTON, W. L.; ERICKSON, H. H. und COFFMAN, J. R. (1987):** Cardiopulmonary and metabolic responses to exercise in the Quarter Horse: effects of training. In: GILLESPIE, J. R. und ROBINSON, N. E. (Hrsg.): *Equine Exercise Physiology 2*. Davis/USA: ICEEP Publications, S. 77–91.
- SCHACK-KIRCHNER, H. UND HILDEBRAND, E. E. (1994):** Wie läßt sich das Vorsorgeprinzip bei Holzern-tekzepten berücksichtigen? *AFZ/Der Wald*. 49. Jg. (13): 720–722.
- SCHÄFER, B. (2000):** Reaktionen physiologischer Leistungskriterien auf zusätzliches Ausdauertraining während der reiterlichen Ausbildung von Sportpferden. Dissertation. Göttingen.
- SCHARNHÖLZ, R. (2002):** Kaltblutpferde Made in Germany – Handbuch der Deutschen Kaltblutzucht. Lemgo. 260 S.
- SCHEFFER, F. (1992):** Lehrbuch der Bodenkunde / Scheffer und Schachtschabel. – 13. durchgesehene Auflage. Enke-Verlag, Stuttgart.
- SCHERER, H.-G. (1995):** Normierte Arbeitsablaufabschnitte als Orientierungshilfen für die Leistungsgradbeurteilung. Dissertation. Universität Göttingen. 134 S.
- SCHEUNERT, A. und TRAUTMANN, A. (1976):** Lehrbuch der Veterinärphysiologie. Parey Verlag, Hamburg-Berlin.
- SCHLEGEL, R. (1997):** Krise bei den Forstbaumschulen. *AFZ* 52. Jg. (18): 985–987.
- SCHMID-VIELGUT, B. (1985):** Psycho-physische Beanspruchung der Arbeitskräfte in Holzertesystemen unterschiedlicher Mechanisierungsgrade. Dissertation. Universität Freiburg im Breisgau. Hochschul Verlag, Freiburg.
- SCHMITZ, F. (2004):** Der Wald im Spiegel der zweiten Bundeswaldinventur und forstpolitische Konsequenzen. Vortrag im Seminar zur Vorstellung der Ergebnisse der Bundeswaldinventur und der Holzaufkom-

mensmodellierung vom 16.–17.11.2004 in Göttingen. Online:  
[http://www.bundeswaldinventur.de/ergebnisse/Vortrag\\_Schmitz.pdf](http://www.bundeswaldinventur.de/ergebnisse/Vortrag_Schmitz.pdf) (Zugriff: 09.02.2005).

- SCHÖNHAR, S. (2001):** Infektionswege der Rotfäule bei Fichte – Wundinfektion von untergeordneter Bedeutung. *AFZ/Der Wald*. 56. Jg. (25): 1323–1324.
- SCHOPPA, F. N. (1999):** Konsequenzen wald- und forstgeschichtlicher Entwicklungen für die aktuelle genetische Zusammensetzung von Waldbaumpopulationen in Mitteleuropa. Dissertation Göttingen. 100 S.
- SCHRÖDER, G. (1999):** Untersuchung zum Pferdeeinsatz im Wald am Beispiel des Bundeslandes Baden-Württemberg. Diplomarbeit. Universität Freiburg im Breisgau. 94 S.
- SCHROLL, E. (2002):** Mündliche Mitteilung. Lemgo.
- SCHUBERT, J. (1999):** Lagerung und Vorbehandlung von Saatgut wichtiger Baum- und Straucharten. Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten / Landesanstalt für Agrarordnung Nordrhein-Westfalen. 183 S.
- SCHRADER, J. (1996):** Das Herz. In: KLINKE, R. und SILBERNAGL, S (Hrsg.): Lehrbuch der Physiologie. 2. neugestaltete und überarbeitete Auflage. Thieme Verlag, Stuttgart. 748 S.
- SCHÜTE, G. (1994):** Betriebswirtschaftliche Aspekte der Pflanzenanzucht und Pflanzung für Forstbetriebe. *Forst und Holz*. 49. Jg. (20): 601 – 604.
- SNOW, D. H. (1990):** Haematological, biochemical and physiological changes in horses and ponies during the cross country stage of driving trial competitions *Veterinary Record*. (126) 233–239
- SNOW, D. H.; MASON, D. K.; RICKETTS, S. W. und DOUGLAS, T. A. (1983):** Post-race blood biochemistry in Thoroughbreds. In: SNOW, D.H.; PERSSON, S. G. B. und ROSE, R. J. (Hrsg.): *Equine Exercise Physiology 1* Granta Editions, Cambridge, 389–399.
- SPELLMANN, H.; HILLEBRAND, K. und CORNELIUS, P. (2001):** Konzept zur Erfassung und Sicherung der Nachhaltigkeit in multifunktional genutzten Wäldern. *Forst und Holz*. 56. Jg. (15): 469 – 473.
- STÄDTLER, H. und MELLES, H. (1999):** Bucheckern-Voraussaat – eine kostengünstige Alternative. *AFZ/DerWald*. 54. Jg. (18): 945–946.
- STAMPFER, K. (1996):** Belastungs- und Beanspruchungsermittlung bei verschiedenen mechanisierten forstlichen Arbeitssystemen. Bd. 3 der Schriftenreihe des Instituts für Forsttechnik. Dissertation. Wien.
- STARKEY, P. (1989):** Harnessing and Implements for Animal Traction. Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - GATE in: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn. 180 S.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (1978–2004):** Pflanzenbestände an Forstpflanzen. Fachserie Reihe 3.1.7. Bonn.
- STEWART, G. A. (1972):** Drugs, performance and responses to exercise in the racehorse. 1. Physiological observations on the cardiac and respiratory responses. *Australian Veterinary Journal*. (48): 537–543.
- SÜß, D. (2001):** Untersuchung zur Flächeninanspruchnahme beim Vorrücken von Holz (Schleifrücken) mit Pferden. Diplomarbeit. TU Dresden. 65 S.
- SUWALA, M. (1997):** Einfluß verschiedener Erntevarianten auf Baum- und Bodenschäden bei der Durchforstung von Kiefernbeständen. *Forsttechnische Informationen* 49. Jg. (9): 114–117.
- SUWALA, M., JODLOWSKI, K. und RZADKOWSKI, S. (2000):** Tree damage and soil disturbance at wood harvesting. Tagungsband der Internationalen Forstwissenschaftlichen Konferenz vom 20.–22. November 2000 in Brno. 357–365.
- TEUFFEL, K. v.; HEINRICH, B. und BAUMGARTEN, M. (2004):** Present Distribution of Secondary Norway Spruce in Europe. In: SPIECKER et al. (Hrsg.): *Norway Spruce Conversion – Options and Consequences*. European Forest Institute Research Report 18. Brill Leiden-Boston. 63 – 96.

- THOMASIU, H. (1991):** Mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Wälder in Mitteleuropa. Forstwissenschaftliches Centralblatt. (110): 305–330.
- THOMASIU, H. (1996):** Geschichte, Anliegen und Wege des Waldumbaus in Sachsen. Waldumbau – Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten. Graupa. 11 – 52.
- THORNTON, J. R. (1985):** Exercise testing. Veterinary Clinics (of) North America Equine Practice (3): 573–595.
- TRIEBIG, G.; KENTNER, M. und SCHIELE, R. (2003):** Arbeitsmedizin – Handbuch für Theorie und Praxis. 1. Auflage. Genter Verlag. Stuttgart.
- VALL, E. (1996):** Capacités de travail, comportement à l'effort et réponses physiologiques du zébu, de l'âne et du cheval au Nord-Cameroun. ENSAM, Montpellier/Frankreich.
- VALBERG, S.; ESSEN-GUSTAVSSON, B.; LINDHOLM, A. und PERSSON, S. G. B (1989):** Blood chemistry and skeletal muscle metabolic responses during and after different speeds and durations of trotting. Equine Veterinary Journal. (21): 91–95.
- VARO, M. und VAINIKAINEN, V. (1958):** Der für Pferde verschiedenen Gewichts und Alters anzusetzende Zugwiderstand. Maataloustieteellinen aikakauskirja (30): 105–113.
- VOLZ, K.-R. (1991):** Zur ökonomischen Dimension des Waldumbaus. AFZ. 46. Jg. (24): 1228 - 1234.
- VONHOFF, W. (1997):** Buchen-Vorbau auf der Ostalb. AFZ/DerWald. 51. Jg. (24): 1298 - 1299.
- WAGNER, S. (2004):** Möglichkeiten und Beschränkungen eines funktionsorientierten Waldbaus. Forst und Holz. 59. Jg. (3): 105 – 111.
- WALKER, A. (1994):** Auswirkung des Holzrückens mit Pferdezug auf den Bodengashaushalt im Vergleich zum Harvester/Forwarder – Verfahren. Diplomarbeit. Hohenheim.
- WATSON, P. R. (1981):** Farming with draft animals. Washington D.C./USA: Transcentury Press, Washington D.C., USA. 250 p.
- WEBER, N. (2003):** Überlegungen zur Gemeinwohldiskussion in der Forstwirtschaft. In: Facetten der Forstpolitikwissenschaft. Verlag Dr. Kessel, Remagen. ?? S.
- WILPERT, K. V. (1998):** Möglichkeiten und Grenzen für die Definition einer ökologisch verträglichen Befahrbarkeit. Forsttechnische Informationen (3): 29–34.
- WINKEL, G. und VOLZ, K.-R. (2003):** Naturschutzfachliche Kriterien zur Bewertung der Guten fachlichen Praxis in der Forstwirtschaft. Abschlussbericht.Freiburg. 187 S.
- WILSON, R. G.; ISLER, R. B. und THORNTON, J. R. (1983):** Heart rate, lactic acid production and speed during a Standardized exercise test in standardbred horses. In: SNOW, D.H.; PERSSON, S. G. B. und ROSE, R. J. (Hrsg.): Equine Exercise Physiology 1 Granta Editions, Cambridge, 487–496.
- ZIESAK, M. (2004):** Entwicklung eines Informationssystems zum bodenschonenden Forstmaschineneinsatz. Dissertation. München. 100 S.
- ZULAUF, F. (2002):** Bedeutung von Verjüngungsmaßnahmen in ausgewählten Landesforstverwaltungen. Bachelorarbeit. Göttingen. unveröffentlicht 16 S.

## 10 Anhang

Anhang I:	Temperaturverlauf im Eggegebirge.....	169
Anhang II:	Ablaufarten des Pferdeführers.....	170
Anhang III:	Zeitverbrauchs-Cluster zwischen Arbeitsverfahren und störenden Teilergebnissen.....	171
Anhang IV:	Regressionsanalytische Ergebnisse bei der Identifizierung von Störfaktoren im Arbeitsablauf der Arbeitsverfahren .....	173
Anhang V:	Regressionsanalytische Ergebnisse zur Erklärung des Zeitverbrauchs .....	183
Anhang VI:	Kalkulation einer Pferdeeinsatzstunde .....	193
Anhang VII:	Deskriptive Statistik von Parametern der Arbeitsqualität .....	197
Anhang VIII:	Deskriptive Statistik der Herzschlagfrequenz des Probanden.....	200
Anhang IX:	Deskriptive Statistik der Zugkraft, Geschwindigkeit und Leistung .....	201
Anhang X:	Deskriptive Statistik der Herzschlagfrequenz der Pferde.....	202

# Anhang I: Temperaturverlauf im Eggegebirge

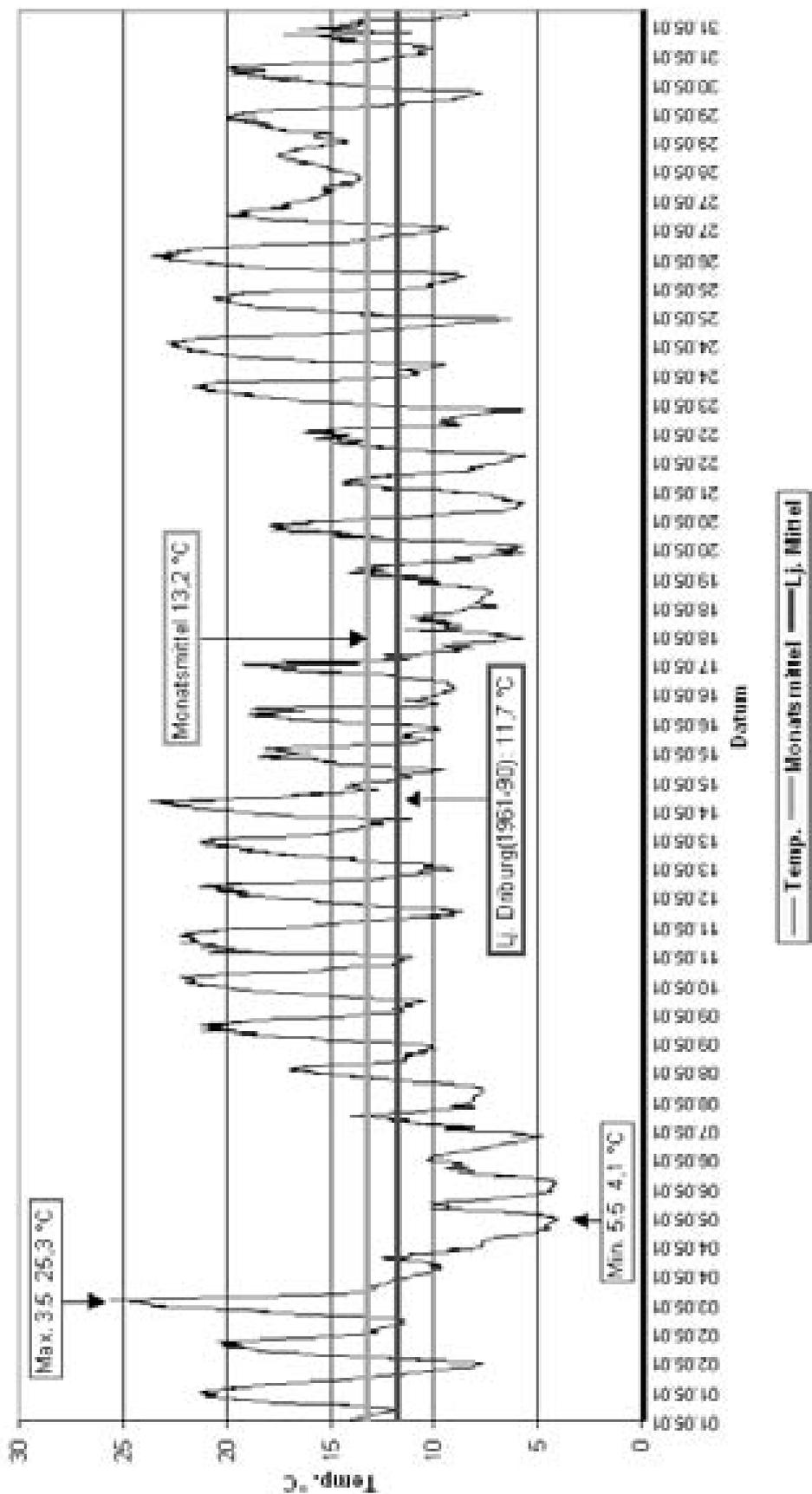


Abbildung I\_1: Temperaturverlauf im Eggegebirge für den Monat Mai des Jahres 2001 (OWL, 2001)

Anhang II: Ablaufarten des Pferdeführers

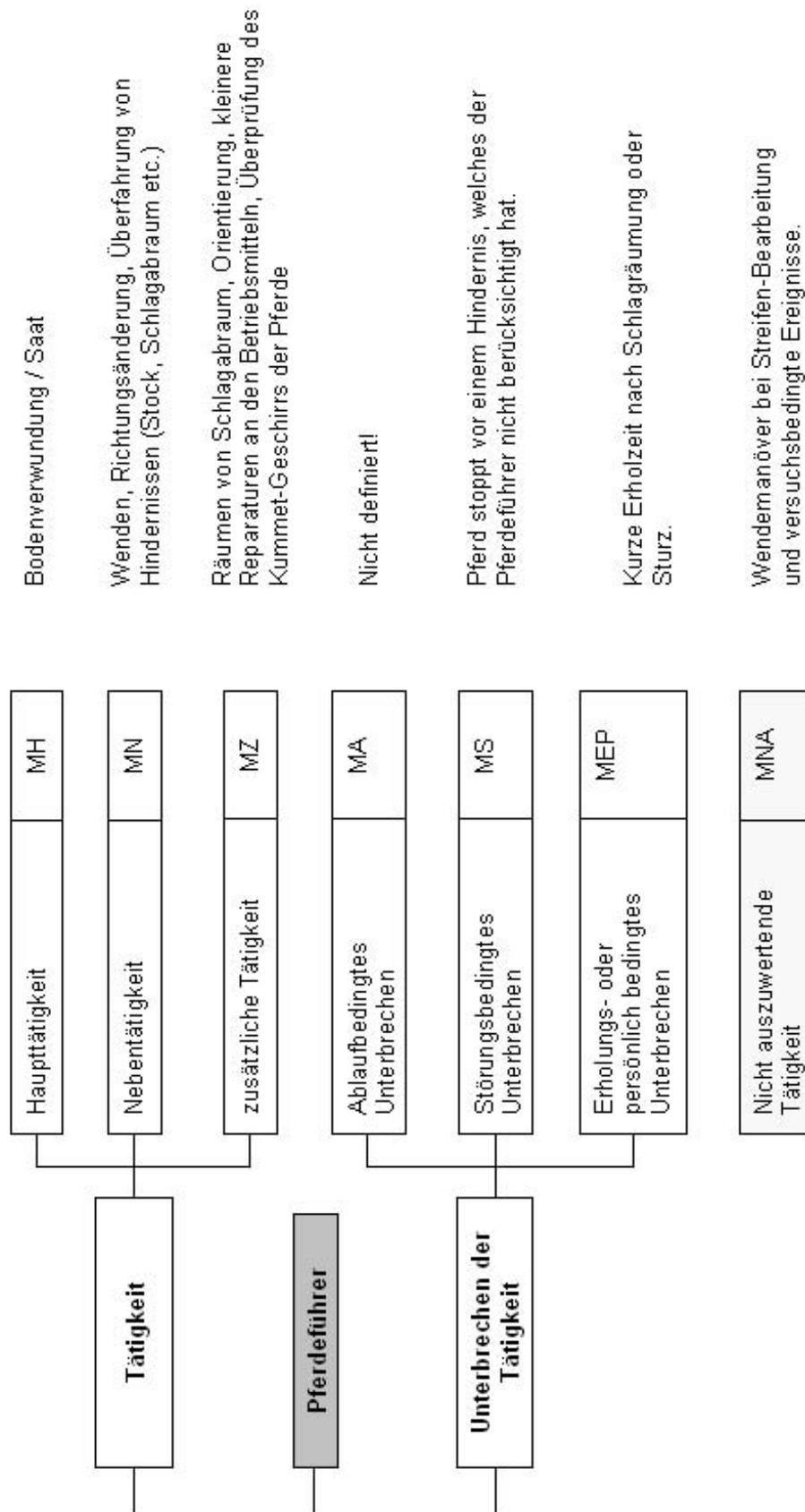


Abbildung II\_1: Ablaufarten des Pferdeführers bei der Bodenverwendung, bzw. kombinierten Buchensaat mit pferdegezogenen Betriebsmitteln (verändert nach REFA, 2004)



ANHANG III

Tabelle III\_2: Absolute Häufigkeiten der geclusterten Zeitverbrauchswerte (Intervallbreite: 5 s) zwischen den Arbeitsverfahren zur kombinierten Rillensaat und den den Arbeitsablauf störenden Teilereignissen (Arbeitsablaufabschnitten)

Verfahren / Arbeitsablaufabschnitt	Zeitverbrauch-Cluster									
	k. A.	≤5 s	6 – 10 s	11 – 15 s	16 – 20 s	21 – 25 s	26 – 30 s	31 – 35 s	36 – 40 s	> 40 s
„EggeSaat“	AAA 13	25	12	2	1	0	0	0	0	0
	AAA 14	20	6	5	8	0	1	0	0	0
	AAA 21	8	9	6	4	4	6	2	1	0
	AAA 22	27	0	0	0	2	3	1	2	1
	AAA 23	33	0	0	1	0	0	0	2	0
	AAA 26	22	12	6	0	0	0	0	0	0
	AAA 27	27	6	6	0	0	0	1	0	0
„Öko Saat“	AAA 13	22	14	3	0	1	0	0	0	0
	AAA 14	21	12	3	4	0	0	0	0	0
	AAA 21	9	12	9	5	1	2	0	1	1
	AAA 22	31	0	1	0	0	1	0	0	1
	AAA 23	36	0	0	0	2	0	0	0	2
	AAA 26	36	4	0	0	0	0	0	0	0
	AAA 27	35	3	2	0	0	0	0	0	0
„Wellmunster Waldgrubber“	AAA 13	23	16	2	0	0	0	0	0	0
	AAA 14	20	6	8	2	4	0	0	0	0
	AAA 21	11	7	7	4	4	3	2	1	1
	AAA 22	26	0	0	1	0	3	0	3	0
	AAA 23	4	1	6	3	7	2	5	2	10
	AAA 26	11	20	7	2	0	0	0	0	0
	AAA 27	22	13	4	1	0	0	0	0	0

## Anhang IV: Regressionsanalytische Ergebnisse bei der Identifizierung von Störfaktoren im Arbeitsablauf der Arbeitsverfahren

### Bodenverwundungsverfahren Eberswalder Streifenflug

Tabelle IV\_1: Zusammenfassung der Regressionsergebnisse

Modellzusammenfassung (d)

Modell	$r$	$R^2$	Änderungsstatistik		
			Änderung in $R^2$	Änderung in $F$	Änderung in Signifikanz von $F$
1	0,565 (a)	0,320	0,320	17,856	0,000
2	0,734 (b)	0,538	0,218	17,490	0,000
3	0,768 (c)	0,590	0,052	4,552	0,040

a Einflussvariablen: (Konstante), *Räumen*

b Einflussvariablen: (Konstante), *Räumen*, *Orientierung*

c Einflussvariablen: (Konstante), *Räumen*, *Orientierung*, *Betriebsbereitschaft Aggregat*

d Abhängige Variable: *Zeit je Reihe [s]*

Tabelle IV\_2: Ursprüngliche und partielle Korrelationskoeffizienten der Modellgrößen

Koeffizienten (a)

Modell		Korrelationen	
		Nullter Ordnung	Partiell
1	<i>Räumen</i>	0,565	0,565
2	<i>Räumen</i>	0,565	0,611
	<i>Orientierung</i>	0,513	0,567
3	<i>Räumen</i>	0,565	0,583
	<i>Orientierung</i>	0,513	0,525
	<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>	0,462	0,335

a Abhängige Variable: *Zeit je Reihe [s]*

**ANHANG IV**

**Tabelle IV\_3: Partielle Korrelationskoeffizienten der angebotenen Prädiktoren in den Regressionsschritten**

Ausgeschlossenen Variablen (a)

<b>Modell</b>		<b>t</b>	<b>Signifikanz</b>	<b>Partielle Korrelation</b>
1	<i>Wenden</i>	0,009	0,993	0,001
	<i>Stöcke</i>	-0,290	0,773	-0,048
	<i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i>	2,782	0,008	0,416
	<i>Überfahung Stammteile</i>	-0,182	0,857	-0,030
	<i>Orientierung</i>	4,182	0,000	0,567
	<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>	2,726	0,010	0,409
	<i>Betriebsbereitschaft Pferd</i>	0,329	0,744	0,054
	<i>Verweigerung Pferd</i>	1,980	0,055	0,310
	<i>Hangneigung</i>	-0,228	0,821	-0,037
2	<i>Wenden</i>	0,883	0,383	-0,146
	<i>Stöcke</i>	-0,512	0,612	-0,085
	<i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i>	1,727	0,093	0,277
	<i>Überfahung Stammteile</i>	-0,279	0,782	-0,046
	<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>	2,133	0,040	0,335
	<i>Betriebsaggregat Pferd</i>	0,333	0,741	0,055
	<i>Verweigerung Pferd</i>	1,239	0,223	0,202
	<i>Hangneigung</i>	-0,533	0,598	-0,088
	3	<i>Wenden</i>	-0,562	0,578
<i>Stöcke</i>		-0,792	0,434	-0,133
<i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i>		0,889	0,380	0,149
<i>Überfahung Stammteile</i>		-0,174	0,863	-0,029
<i>Betriebsbereitschaft Pferd</i>		0,469	0,642	0,079
<i>Verweigerung Pferd</i>		0,569	0,573	0,096
<i>Hangneigung</i>		-0,959	0,344	-0,160

a Abhängige Variable: *Zeit je Reihe [s]*

## Bodenverwundungsverfahren *Meinberg Wundstreifenpflug*

Tabelle IV\_4: Zusammenfassung der Regressionsergebnisse

### Modellzusammenfassung (d)

Modell	$r$	$R^2$	Änderungsstatistik		
			Änderung in $R^2$	Änderung in $F$	Änderung in Signifikanz von $F$
1	0,833 (a)	0,694	0,694	86,097	0,000
2	0,941 (b)	0,886	0,192	62,093	0,000
3	0,948 (c)	0,899	0,013	4,754	0,036

a Einflussvariablen: (Konstante), *Räumen*

b Einflussvariablen: (Konstante), *Räumen*, *Orientierung*

c Einflussvariablen: (Konstante), *Räumen*, *Orientierung*, *Stöcke*

d Abhängige Variable: *Zeit je Reihe [s]*

Tabelle IV\_5: Ursprüngliche und partielle Korrelationskoeffizienten der Modellgrößen

### Koeffizienten(a)

Modell		Korrelationen	
		Nullter Ordnung	Partiell
1	<i>Räumen</i>	0,833	0,833
2	<i>Räumen</i>	0,833	0,923
	<i>Orientierung</i>	0,482	0,792
3	<i>Räumen</i>	0,833	0,930
	<i>Orientierung</i>	0,482	0,817
	<i>Stöcke</i>	-0,070	-0,342

a Abhängige Variable: *Zeit je Reihe [s]*

**ANHANG IV**

**Tabelle IV\_6: Partielle Korrelationskoeffizienten der angebotenen Prädiktoren in den Regressionsschritten**

Ausgeschlossenen Variablen (a)

<b>Modell</b>		<b>t</b>	<b>Signifikanz</b>	<b>Partielle Korrelation</b>
1	<i>Wenden</i>	0,898	0,375	0,146
	<i>Stöcke</i>	-0,521	0,605	-0,085
	<i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i>	1,459	0,153	0,233
	<i>Überfahung Stammteile</i>	-0,745	0,461	-0,122
	<i>Orientierung</i>	7,880	0,000	0,792
	<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>	0,384	0,703	0,063
	<i>Erholung</i>	4,034	0,000	0,553
	<i>Verweigerung Pferd</i>	-0,758	0,453	-0,124
	<i>Pferd vor Hindernis</i>	1,396	0,171	0,224
	<i>Hangneigung</i>	1,067	0,293	0,173
2	<i>Wenden</i>	0,646	0,522	0,107
	<i>Stöcke</i>	-2,180	0,036	-0,342
	<i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i>	1,771	0,085	0,283
	<i>Überfahung Stammteile</i>	0,048	0,962	0,008
	<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>	1,858	0,071	0,296
	<i>Erholung</i>	1,279	0,209	0,208
	<i>Verweigerung Pferd</i>	1,514	0,139	0,245
	<i>Pferd vor Hindernis</i>	0,593	0,557	0,098
	<i>Hangneigung</i>	-0,795	0,432	-0,131
	3	<i>Wenden</i>	0,134	0,894
<i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i>		1,056	0,298	0,176
<i>Überfahung Stammteile</i>		0,242	0,810	0,041
<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>		1,600	0,119	0,261
<i>Erholung</i>		1,305	0,200	0,215
<i>Verweigerung Pferd</i>		0,825	0,415	0,138
<i>Pferd vor Hindernis</i>		1,224	0,229	0,203
<i>Hangneigung</i>		-1,043	0,304	-0,174

a Abhängige Variable: Zeit je Reihe [s]

## Saatverfahren *EggeSaar*

Tabelle IV\_7: Zusammenfassung der Regressionsergebnisse

Modellzusammenfassung (d)

Modell	<i>r</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	Änderungsstatistik		
			Änderung in <i>R</i> <sup>2</sup>	Änderung in <i>F</i>	Änderung in Signifikanz von <i>F</i>
1	0,827 (a)	0,684	0,684	82,211	0,000
2	0,882 (b)	0,778	0,094	15,703	0,000

a Einflussvariablen: (Konstante), *Betriebsbereitschaft Aggregat*

b Einflussvariablen: (Konstante), *Betriebsbereitschaft Aggregat*, *Räumen*

d Abhängige Variable: *Zeit je Reihe [s]*

Tabelle IV\_8: Ursprüngliche und partielle Korrelationskoeffizienten der Modellgrößen

Koeffizienten (a)

Modell		Korrelationen	
		Nullter Ordnung	Partiell
1	<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>	0,827	0,827
2	<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>	0,827	0,866
	<i>Räumen</i>	0,333	0,546

a Abhängige Variable: *Zeit je Reihe [s]*

**ANHANG IV**

**Tabelle IV\_9: Partielle Korrelationskoeffizienten der angebotenen Prädiktoren in den Regressionsschritten**

Ausgeschlossenen Variablen (a)

<b>Modell</b>		<b>t</b>	<b>Signifikanz</b>	<b>Partielle Korrelation</b>
1	<i>Wenden</i>	-0,106	0,916	-0,017
	<i>Stöcke</i>	0,272	0,787	0,045
	<i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i>	-0,365	0,717	-0,060
	<i>Überfahung Stammteile</i>	-0,012	0,991	-0,002
	<i>Orientierung</i>	-0,494	0,624	-0,081
	<i>Räumen</i>	3,963	0,000	0,546
	<i>Erholung</i>	-0,471	0,640	-0,077
	<i>Verweigerung Pferd</i>	1,348	0,186	0,216
	<i>Pferd vor Hindernis</i>	0,614	0,543	0,100
	<i>Hangneigung</i>	-0,711	0,482	-0,116
2	<i>Wenden</i>	0,550	0,586	0,091
	<i>Stöcke</i>	0,804	0,427	0,133
	<i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i>	-1,065	0,294	-0,175
	<i>Überfahung Stammteile</i>	0,518	0,607	0,086
	<i>Orientierung</i>	-0,516	,0609	-0,086
	<i>Erholung</i>	-0,156	0,877	-0,026
	<i>Verweigerung Pferd</i>	0,547	0,588	0,091
	<i>Pferd vor Hindernis</i>	0,308	0,760	0,051
	<i>Hangneigung</i>	-0,962	0,343	-0,158

a Abhängige Variable: *Zeit je Reihe [s]*

## Saatverfahren *ÖkoSat/U*

Tabelle IV\_10: Zusammenfassung der Regressionsergebnisse

Modellzusammenfassung (d)

Modell	r	R <sup>2</sup>	Änderungsstatistik		
			Änderung in R <sup>2</sup>	Änderung in F	Änderung in Signifikanz von F
1	0,736 (a)	0,541	0,541	44,810	0,000
2	0,866 (b)	0,750	0,209	31,021	0,000
3	0,929 (c)	0,864	0,113	29,980	0,000

a Einflussvariablen: (Konstante), *Räumen*

b Einflussvariablen: (Konstante), *Räumen*, *Betriebsbereitschaft Aggregat*

c Einflussvariablen: (Konstante), *Räumen*, *Betriebsbereitschaft Aggregat*, *Orientierung*

d Abhängige Variable: *Zeit je Reihe [s]*

Tabelle IV\_11: Ursprüngliche und partielle Korrelationskoeffizienten der Modellgrößen

Koeffizienten(a)

Modell		Korrelationen	
		Nullter Ordnung	Partiell
1	<i>Räumen</i>	0,736	0,736
2	<i>Räumen</i>	0,736	0,833
	<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>	0,431	0,675
3	<i>Räumen</i>	0,736	0,890
	<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>	0,431	0,737
	<i>Orientierung</i>	0,460	0,674

a Abhängige Variable: *Zeit je Reihe [s]*

**ANHANG IV**

**Tabelle IV\_12: Partielle Korrelationskoeffizienten der angebotenen Prädiktoren in den Regressionsschritten**

**Ausgeschlossenen Variablen (a)**

<b>Modell</b>		<b>t</b>	<b>Signifikanz</b>	<b>Partielle Korrelation</b>
1	<i>Wenden</i>	0,685	0,497	0,112
	<i>Stöcke</i>	-0,643	0,524	-0,105
	<i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i>	2,407	0,021	0,368
	<i>Orientierung</i>	4,458	0,000	0,591
	<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>	5,570	0,000	0,675
	<i>Verweigerung Pferd</i>	-1,046	0,302	-0,169
	<i>Pferd vor Hindernis</i>	0,365	0,717	0,060
	<i>Hangneigung</i>	-0,461	0,647	-0,076
2	<i>Wenden</i>	0,951	0,366	0,151
	<i>Stöcke</i>	-0,325	0,747	-0,054
	<i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i>	2,674	0,011	0,407
	<i>Orientierung</i>	5,475	0,000	0,674
	<i>Verweigerung Pferd</i>	-0,837	0,408	-0,138
	<i>Pferd vor Hindernis</i>	1,151	0,257	0,188
	<i>Hangneigung</i>	-2,448	0,019	-0,378
	3	<i>Wenden</i>	1,483	0,147
<i>Stöcke</i>		1,095	0,218	0,182
<i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i>		0,639	0,527	0,107
<i>Verweigerung Pferd</i>		-1,062	0,295	-0,177
<i>Pferd vor Hindernis</i>		1,265	0,214	0,209
<i>Hangneigung</i>		-1,742	0,090	-0,282

a Abhängige Variable: *Zeit je Reihe [s]*

## Saatverfahren Weilmünster Waldgrubber

Tabelle IV\_13: Zusammenfassung der Regressionsergebnisse

### Modellzusammenfassung (d)

Modell	<i>r</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	Änderungsstatistik		
			Änderung in <i>R</i> <sup>2</sup>	Änderung in <i>F</i>	Änderung in Signifikanz von <i>F</i>
1	0,710 (a)	0,504	0,504	36,583	0,000
2	0,885 (b)	0,784	0,280	45,341	0,000
3	0,907 (c)	0,822	0,038	7,370	0,010

a Einflussvariablen: (Konstante), *Räumen*

b Einflussvariablen: (Konstante), *Räumen*, *Betriebsbereitschaft Aggregat*

c Einflussvariablen: (Konstante), *Räumen*, *Betriebsbereitschaft Aggregat*, *Orientierung*

d Abhängige Variable: *Zeit je Reihe [s]*

Tabelle IV\_14: Ursprüngliche und partielle Korrelationskoeffizienten der Modellgrößen

### Koeffizienten (a)

Modell		Korrelationen	
		Nullter Ordnung	Partiell
1	<i>Räumen</i>	0,710	0,710
2	<i>Räumen</i>	0,710	0,804
	<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>	0,623	0,751
3	<i>Räumen</i>	0,710	0,808
	<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>	0,623	0,769
	<i>Orientierung</i>	0,389	0,422

a Abhängige Variable: *Zeit je Reihe [s]*

**ANHANG IV**

**Tabelle IV\_15: Partielle Korrelationskoeffizienten der angebotenen Prädiktoren in den Regressionsschritten**

Ausgeschlossenen Variablen (a)

<b>Modell</b>		<b>t</b>	<b>Signifikanz</b>	<b>Partielle Korrelation</b>
1	<i>Wenden</i>	1,636	0,111	0,267
	<i>Stöcke</i>	1,515	0,139	0,248
	<i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i>	1,781	0,084	0,288
	<i>Orientierung</i>	2,212	0,034	0,350
	<i>Betriebsbereitschaft Aggregat</i>	6,734	0,000	0,751
	<i>Verweigerung Pferd</i>	-0,144	0,886	-0,024
	<i>Pferd vor Hindernis</i>	1,967	0,057	0,315
	<i>Hangneigung</i>	0,086	0,932	0,014
2	<i>Wenden</i>	0,285	0,777	0,049
	<i>Stöcke</i>	0,372	0,713	0,064
	<i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i>	1,194	0,241	0,201
	<i>Orientierung</i>	2,715	0,010	0,422
	<i>Verweigerung Pferd</i>	1,139	0,262	0,192
	<i>Pferd vor Hindernis</i>	0,898	0,375	0,152
	<i>Hangneigung</i>	0,008	0,993	0,001
	3	<i>Wenden</i>	-0,341	0,735
<i>Stöcke</i>		-0,313	0,757	-0,054
<i>Gesamtdeckung Schlagabraum</i>		0,755	0,456	0,130
<i>Verweigerung Pferd</i>		1,041	0,305	0,178
<i>Pferd vor Hindernis</i>		0,927	0,361	0,159
<i>Hangneigung</i>		0,126	0,901	0,022

a Abhängige Variable: *Zeit je Reihe [s]*

## Anhang V: Regressionsanalytische Ergebnisse zur Erklärung des Zeitverbrauchs

### Bodenverwundungsverfahren *Eberswalder Streifenflug*

Tabelle V\_1: Matrix der Pearsonschen Korrelationskoeffizienten der Modellvariablen

Korrelation nach Pearson	RAZ/m [s/m]	Gesamtdeckung Schlagabraum [m <sup>2</sup> ]	Hangneigung [%]	Stammzahl [N]	Dummy-Bestand	Dummy-Bearbeitung
RAZ/m [s/m]	1,000	0,857*	0,697*	-0,239	0,745*	-0,266
Gesamtdeckung Schlagabraum [m <sup>2</sup> ]	0,857*	1,000	0,773*	-0,294	0,678*	-0,366
Hangneigung [%]	0,697*	0,773*	1,000	-0,634*	0,783*	-0,183
Stammzahl [N]	-0,239	-0,294	-0,634	1,000	-0,564*	-0,063
Dummy-Bestand	0,745*	0,678*	0,783	-0,564*	1,000	0,000
Dummy-Bearbeitung	-0,266	-0,366	-0,183	-0,063	0,000	1,000

\* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$ .

Tabelle V\_2: Zusammenfassung der Regressionsergebnisse

Modell	$r$	$R^2$	Korrigiertes $R^2$	Standardfehler des Schätzers
1	0,857 (a)	0,734	0,715	0,38996

a Einflussvariablen: (Konstante), Gesamtdeckung Schlagabraum [m<sup>2</sup>]

b Abhängige Variable: RAZ/m [s]

**ANHANG V**

**Tabelle V\_3: Parameter des Regressionsmodells mit den ursprünglichen und partiellen Korrelationskoeffizienten der Modellgröße**

**Koeffizienten (a)**

<b>Modell</b>		<b>Nicht standardisierte Koeffizienten</b>		<b>t</b>	<b>Signifikanz</b>	<b>Korrelationen</b>	
		<b>B</b>	<b>Standardfehler</b>			<b>Nullter Ordnung</b>	<b>Partiell</b>
1	(Konstante)	0,737	0,177	4,157	0,001		
	Gesamtdeckung Schlagabraum	0,008	0,001	6,216	,0,000	0,857	0,857

a Abhängige Variable: RAZ/m [s]

**Tabelle V\_4: Partielle Korrelationskoeffizienten der ausgeschlossenen Variablen**

**Ausgeschlossene Variablen (a)**

<b>Modell</b>		<b>t</b>	<b>Signifikanz</b>	<b>Partielle Korrelationen</b>
1	Hangneigung [%]	0,376	0,713	0,104
	Stammzahl	0,092	0,928	0,26
	Dummy-Bestand	1,732	0,107	0,433
	Dummy-Bearbeitung	0,360	0,725	0,099

a Abhängige Variable: RAZ/m [s]

## Bodenverwundungsverfahren *Meinberg Wundstreifenpflug*

Tabelle V\_5: Matrix der Pearsonschen Korrelationskoeffizienten der Modellvariablen

Korrelation nach Pearson	<i>RAZ/m</i> [s/m]	Gesamtdeckung Schlagabraum [m <sup>2</sup> ]	Hangneigung [%]	Stammzahl [N]	Dummy-Bestand	Dummy-Bearbeitung
<i>RAZ/m</i> [s/m]	1,000	0,305	0,461*	-0,329	0,635*	0,002
Gesamtdeckung Schlagabraum [m <sup>2</sup> ]	0,305*	1,000	0,837*	-0,642*	0,827*	-0,340
Hangneigung [%]	0,461*	0,837*	1,000	-0,738*	0,838*	-0,031
Stammzahl [N]	-0,329	-0,642*	-0,738*	1,000	-0,773*	-0,070
Dummy-Bestand	0,635*	0,827*	0,838*	-0,773*	1,000	-0,071
Dummy-Bearbeitung	0,002	-0,340	-0,031	-0,070	-0,071	1,000

\* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$ .

Tabelle V\_6: Zusammenfassung der Regressionsergebnisse

Modell	<i>r</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	Korrigiertes <i>R</i> <sup>2</sup>	Standardfehler des Schätzers
1	0,635 (a)	0,404	0,358	0,23549

a Einflussvariablen: (Konstante), *Dummy-Bestand*

b Abhängige Variable: *RAZ/m* [s]

**ANHANG V**

**Tabelle V\_7: Parameter des Regressionsmodells mit den ursprünglichen und partiellen Korrelationskoeffizienten der Modellgröße**

**Koeffizienten (a)**

<b>Modell</b>		<b>Nicht standardisierte Koeffizienten</b>		<b>t</b>	<b>Signifikanz</b>	<b>Korrelationen</b>	
		<b>B</b>	<b>Standardfehler</b>			<b>Nullter Ordnung</b>	<b>Partiell</b>
1	<i>(Konstante)</i>	1,189	0,089	13,362	0,000		
	<i>Dummy-Bestand</i>	0,362	0,122	2,966	0,011	0,635	0,635

a Abhängige Variable: RAZ/m [s]

**Tabelle V\_8: Partielle Korrelationskoeffizienten der ausgeschlossenen Variablen**

**Ausgeschlossene Variablen (a)**

<b>Modell</b>		<b>t</b>	<b>Signifikanz</b>	<b>Partielle Korrelationen</b>
1	<i>Gesamtdeckung Schlagabraum [m<sup>2</sup>]</i>	-2,035	0,065	-0,506
	<i>Hangneigung [%]</i>	-0,594	0,563	-0,169
	<i>Stammzahl</i>	1,213	0,249	0,330
	<i>Dummy-Bearbeitung</i>	0,212	0,836	0,061

a Abhängige Variable: RAZ/m [s]

## Saatverfahren *EggeSaar*

Tabelle V\_9: Matrix der Pearsonschen Korrelationskoeffizienten der Modellvariablen

Korrelation nach Pearson	<i>RAZ/m</i> [s/m]	Gesamtdeckung Schlagabraum [m <sup>2</sup> ]	Hangneigung [%]	Stammzahl [N]	Dummy-Bestand	Dummy-Bearbeitung
<i>RAZ/m</i> [s/m]	1,000	0,390	0,248	-0,465*	0,552*	0,078
Gesamtdeckung Schlagabraum [m <sup>2</sup> ]	0,39	1,000	0,571*	-0,677*	0,796*	-0,176
Hangneigung [%]	0,284	0,571*	1,000	-0,381	0,548*	0,280
Stammzahl [N]	-0,456*	-0,677*	-0,381	1,000	-0,718*	0,355
Dummy-Bestand	0,552*	0,796*	0,548*	-0,718*	1,000	0,000
Dummy-Bearbeitung	-0,078	-0,176	0,280	0,355	0,000	1,000

\* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$

Tabelle V\_10: Zusammenfassung der Regressionsergebnisse

Modell	<i>r</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	Korrigiertes <i>R</i> <sup>2</sup>	Standardfehler des Schätzers
1	0,552 (a)	0,305	0,256	0,46320

a Einflussvariablen: (Konstante), *Dummy-Bestand*

b Abhängige Variable: *RAZ/m* [s]

**ANHANG V**

**Tabelle V\_11: Parameter des Regressionsmodells mit den ursprünglichen und partiellen Korrelationskoeffizienten der Modellgröße**

**Koeffizienten (a)**

<b>Modell</b>		<b>Nicht standardisierte Koeffizienten</b>		<b>t</b>	<b>Signifikanz</b>	<b>Korrelationen</b>	
		<b>B</b>	<b>Standardfehler</b>			<b>Nullter Ordnung</b>	<b>Partiell</b>
1	<i>(Konstante)</i>	1,551	0,164	9,471	0,000		
	<i>Dummy-Bestand</i>	0,574	0,232	2,480	0,026	0,552	0,552

a Abhängige Variable: RAZ/m [s]

**Tabelle V\_12: Partielle Korrelationskoeffizienten der ausgeschlossenen Variablen**

**Ausgeschlossene Variablen (a)**

<b>Modell</b>		<b>t</b>	<b>Signifikanz</b>	<b>Partielle Korrelationen</b>
1	<i>Gesamtdeckung Schlagabraum [m<sup>2</sup>]</i>	-0,360	0,725	-0,099
	<i>Hangneigung [%]</i>	0,098	0,923	-0,027
	<i>Stammzahl</i>	-0,425	0,678	-0,117
	<i>Dummy-Bearbeitung</i>	-0,340	0,739	-0,094

a Abhängige Variable: RAZ/m [s]

## Saatverfahren *ÖkoSat/U*

Tabelle V\_13: Matrix der Pearsonschen Korrelationskoeffizienten der Modellvariablen

Korrelation nach Pearson	<i>RAZ/m</i> [s/m]	Gesamtdeckung Schlagabraum [m <sup>2</sup> ]	Hangneigung [%]	Stammzahl [N]	Dummy-Bestand	Dummy-Bearbeitung
<i>RAZ/m</i> [s/m]	1,000	0,604*	0,453*	-0,613*	0,717*	-0,324
Gesamtdeckung Schlagabraum [m <sup>2</sup> ]	0,604*	1,000	0,724*	-0,864*	0,886*	-0,085
Hangneigung [%]	0,453*	0,724*	1,000	-0,668*	0,709*	0,014
Stammzahl [N]	-0,613*	-0,864*	-0,668*	1,000	-0,902*	0,019
Dummy-Bestand	0,171*	0,886*	0,709*	-0,902*	1,000	0,000
Dummy-Bearbeitung	-0,324	-0,085	0,014	0,019	0,000	1,000

\* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$ .

Tabelle V\_14: Zusammenfassung der Regressionsergebnisse

Modell	<i>r</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	Korrigiertes <i>R</i> <sup>2</sup>	Standardfehler des Schätzers
1	0,717 (a)	0,515	0,496	0,43706

a Einflussvariablen: (Konstante), *Dummy-Bestand*

b Abhängige Variable: *RAZ/m* [s]

**ANHANG V**

**Tabelle V\_15: Parameter des Regressionsmodells mit den ursprünglichen und partiellen Korrelationskoeffizienten der Modellgröße**

**Koeffizienten (a)**

<b>Modell</b>		<b>Nicht standardisierte Koeffizienten</b>		<b>t</b>	<b>Signifikanz</b>	<b>Korrelationen</b>	
		<b>B</b>	<b>Standardfehler</b>			<b>Nullter Ordnung</b>	<b>Partiell</b>
1	<i>(Konstante)</i>	1,215	0,149	8,158	0,000		
	<i>Dummy-Bestand</i>	0,811	0,211	3,852	0,002	0,717	0,717

a Abhängige Variable: RAZ/m [s]

**Tabelle V\_16: Partielle Korrelationskoeffizienten der ausgeschlossenen Variablen**

**Ausgeschlossene Variablen (a)**

<b>Modell</b>		<b>t</b>	<b>Signifikanz</b>	<b>Partielle Korrelationen</b>
1	<i>Gesamtdeckung Schlagabraum [m<sup>2</sup>]</i>	-0,363	0,723	-0,100
	<i>Hangneigung [%]</i>	-0,414	0,685	-0,114
	<i>Stammzahl</i>	0,408	0,690	0,113
	<i>Dummy-Bearbeitung</i>	-1,891	0,081	-0,464

a Abhängige Variable: RAZ/m [s]

## Saatverfahren Weilmünster Waldgrubber

Tabelle V\_17: Matrix der Pearsonschen Korrelationskoeffizienten der Modellvariablen

Korrelation nach Pearson	RAZ/m [s/m]	Gesamtdeckung Schlagabraum [m <sup>2</sup> ]	Hangneigung [%]	Stammzahl [N]	Dummy-Bestand	Dummy-Bearbeitung
RAZ/m [s/m]	1,000	0,592*	0,511*	-0,301	0,759*	-0,068
Gesamtdeckung Schlagabraum [m <sup>2</sup> ]	0,592*	1,000	0,652*	-0,119	0,819*	-0,296
Hangneigung [%]	0,511*	0,652*	1,000	-0,309	0,812*	0,012
Stammzahl [N]	-0,301	-0,119	-0,309	1,000	-0,332	0,121
Dummy-Bestand	0,759*	0,819*	0,812*	-0,332	1,000	0,000
Dummy-Bearbeitung	-0,068	-0,296	0,012	0,121	0,000	1,000

\* = signifikant bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$ .

Tabelle V\_18: Zusammenfassung der Regressionsergebnisse.

Modell	r	R <sup>2</sup>	Korrigiertes R <sup>2</sup>	Standardfehler des Schätzers
1	0,759 (a)	0,577	0,547	0,65031

a Einflussvariablen: (Konstante), Dummy-Bestand

b Abhängige Variable: RAZ/m [s]

Tabelle V\_19: Parameter des Regressionsmodells mit den ursprünglichen und partiellen Korrelationskoeffizienten der Modellgröße

Koeffizienten (a)

Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		t	Signifikanz	Korrelationen	
		B	Standardfehler			Nullter Ordnung	Partiell
1	(Konstante)	1,909	0,230	8,301	0,000		
	Dummy-Bestand	1,420	0,325	4,368	0,001	0,759	0,759

a Abhängige Variable: RAZ/m [s]

**ANHANG V**

**Tabelle V\_20: Partielle Korrelationskoeffizienten der ausgeschlossenen Variablen**

Ausgeschlossene Variablen (a)

<i>Modell</i>		<i>t</i>	<i>Signifikanz</i>	<i>Partielle Korrelationen</i>
1	<i>Gesamtdeckung Schlagab- raum [m<sup>2</sup>]</i>	-0,297	0,771	-0,082
	<i>Hangneigung [%]</i>	-1,039	0,318	-0,277
	<i>Stammzahl</i>	-0,289	0,777	-0,080
	<i>Dummy-Bearbeitung</i>	-0,380	0,710	-0,105

a Abhängige Variable: RAZ/m [s]

## Anhang VI: Kalkulation einer Pferdeeinsatzstunde

### 1 Sachkosten

#### 1.1 Stallmiete

Stadtferne Lage, Wasserversorgung (Selbsttränke) mit Lagermöglichkeit für Heu und Stroh.

<b>Stallkosten/Monat</b>	<b>200,00 €</b>
--------------------------	-----------------

#### 1.2 Weidepacht

Pachtpreis pro Hektar und Jahr 190,00 €, bei einem Pferd: ½ ha/Jahr für 95,00 €

<b>Weidekosten/Monat</b>	<b>7,92 €</b>
--------------------------	---------------

#### 1.3 Einstreubedarf

½ Bund/Tag (10 kg/Bund) entspricht ca. 150 kg/Monat bei einem Preis von 10,00 €/100kg.

<b>Streukosten/Monat</b>	<b>15,00 €</b>
--------------------------	----------------

#### 1.4 Futter

Ration: 12,5 kg Hafer/Tag (375 kg/Monat), 12 kg Heu/Tag (360 kg/Monat), 100 g Mineralfutter/Tag (3 kg/Monat)

Hafer: 20,00 €/100 kg (gesackt), Heu: 10,00 €/100 kg, Mineralfutter: 12,00–€/10 kg

<i>Kosten Hafer/Monat</i>	75,00 €
<i>Kosten Heu/Monat</i>	36,00 €
<i>Kosten Mineralfutter/Monat</i>	3,60 €
<b>Futterkosten/Monat</b>	<b>114,60 €</b>

#### 1.5 Versicherung (Haftpflicht)

<b>Versicherungskosten/Monat</b> ( <i>sehr variabel</i> )	<b>6,00 €</b>
---	---------------

#### 1.6 Schmied

Umlegen der Eisen alle 2 Monate erforderlich, einmal im Jahr muss ein Satz neue Eisen inklusive Stollen gekauft werden. Umlegen: 50,00 €, Satz Hufeisen: 60,00 €

<i>Kosten Umlegen/Monat</i>	25,00 €
<i>Kosten Hufeisen/Monat</i>	5,00 €
<b>Beschlagungskosten/Monat</b>	<b>30,00 €</b>

#### 1.7 Tierarzt

Eine Tollwut-Impfung/Jahr: 23,00 €, eine Tetanus-Husten-Impfung/Jahr: 30,00 €, vier Wurmkuren/Jahr á 20,00 €

<b>Tierarztkosten/Monat</b>	<b>11,00 €</b>
-----------------------------	----------------

## ANHANG VI

### 1.8 Lineare Abschreibung

#### 1.8.1 Anschaffungskosten

- Die Anschaffungspreise für ein Kaltblut liegen je nach Rasse, Alter und Ausbildung zwischen 1.000 und 3.500 €, es wurde im Folgenden ein Preis von 2.000 € unterstellt.
- Das Geschirr (bestehend aus Halfter, Stangengebiss, Kummet, Rückenleder und Schweifriemen) wird mit einem Preis von 1.100 € angenommen.
- Die Zugstränge haben einen Preis von 100 €
- Der Schwengel mit Haken hat einen Preis von 100 €
- Eine Decke für die Rückenpartie (während der Arbeitspausen) für 150 €
- Der Anschaffungspreis eines Zweipferdeanhängers mit Platz für Futter und Arbeitsgerät etc. kostet ca. 3.500 €

<b>Gesamte Anschaffungskosten</b>	<b>6.950,00 €</b>
-----------------------------------	-------------------

#### 1.8.2 Abschreibung

<i>Nutzungsdauer</i>	<i>Abschreibung/Jahr</i>
Pferd (10 Jahre)	200,00 €
Geschirr (10 Jahre)	110,00 €
Zugstränge ( 2 Jahre)	50,00 €
Schwengel ( 5 Jahre)	20,00 €
Decke ( 5 Jahre)	30,00 €
Anhänger ( 5 Jahre)	700,00 €
<i>Gesamte Abschreibung</i>	<i>1.110,00 €</i>
<b>Abschreibung/Monat</b>	<b>92,50 €</b>

### 1.9 Verzinsung

Effektiver Jahreszins von 8 % [ $6.950 \text{ €} \times 0,5 \times 8/100 = 278,00 \text{ €/Jahr}$ ]

<b>Verzinsung/Monat</b>	<b>23,17 €</b>
-------------------------	----------------

### 1.10 Reparaturen

Bei einer Kostenquote von 20 % der Abschreibungen ergeben sich Reparaturkosten im Jahr von 222,00 €

<b>Reparaturkosten/Monat</b>	<b>18,50 €</b>
------------------------------	----------------

### 1.11 Gesamt-Sachkosten

<b>Gesamtkosten / Monat (Summe 1.1–1.10)</b>	<b>518,69 €</b>
--	-----------------

Bei einer durchschnittlichen Auslastung des Pferdes von 1.200 Pferdearbeitsstunden je Jahr bzw. 100 PAS/Monat entspricht dies Sachkosten von ca. **5,19 €** je Pferdearbeitsstunde.

## 2 Personalkosten

### 2.1 Pferdepflegekosten

Bei 1.200 PAS/Jahr und einem durchschnittlichen Pferdearbeitstag von sechs Stunden ergeben sich 200 Tage/Jahr der Pferdepflege von je 1,3 Stunden/Pferdearbeitstag, dies entspricht 260 Stunden/Jahr. Der unterstellte Stundensatz von 13,00 € zuzüglich 100 % Personalnebenkosten ergibt eine Belastung von 26,00 €/Stunde.

Bei 260 Stunden/Jahr sind dies Kosten von insgesamt 6.760 €/Jahr für die Pferdepflege.

Je Pferdeeinsatzstunde sind dies (6.760 € / 1.200 PAS) = **5,63 €/PAS**

### 2.2 Personalkosten pro Arbeitsstunde

Die Personalstunde kostet inkl. 100 % PNK 26,00 €

Die Auslastungsquote (Quotient aus Pferde-Arbeitszeit zu Personal-Arbeitszeit) ist bei gesonderter Bewertung der Pferdepflege hoch, sie wird aber auch durch den täglichen Transport beeinflusst. Sie wird im Folgenden mit 0,9 veranschlagt. Damit ergeben sich für die Personalkosten, die auf die Arbeit im engeren Sinne kalkuliert werden:

**26,00 €/h / 0,9 = 28,89 €/PAS**

## 3 Transportkosten

Für den Transport der Pferde und Betriebsmittel zum Arbeitsplatz wird neben dem bereits berücksichtigten Pferdeanhänger ein entsprechendes Zugfahrzeug (Geländewagen mit Allrad) benötigt. Die Kalkulation der Kosten je MAS des Gelände-PKW kann der folgenden Tabelle entnommen werden.

## ANHANG VI

Maschine:	Gelände-PKW
Beschaffungspreis o. MwSt. (€)	35.000
Veralterungszeit (Jahre)	5
Normale Nutzungsdauer (MAS, gesamt)	5.000
Geschätzte jährliche Einsatzdauer (MAS)	1.000
Reparaturkostenquote (echter Anteil)	0,5
Zinsfuß (%)	8
Treibstoffverbrauch (l/MAS)	4
Treibstoffkosten (€/l)	0,87
Schmiermittelfaktor (echter Anteil)	0,08
Restwert (€)	0
Sonstiges (€/jährlich)	1.500
<i>Personal</i>	
Auslastungsquote der Maschine (echter Anteil)	0,8
Personal (€/h)	0,0
Personalnebenkosten (%)	100
<i>Kosten in € je Maschinenarbeitsstunde</i>	
Abschreibung	7,00
Reparaturen	3,50
Zinsen (kalkulatorisch)	0,28
Betriebsstoffe	3,76
Sonstiges	1,50
Personal	0,00
<b>Kosten €/MAS</b>	<b>16,04</b>

Bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 40 km/MAS ergibt sich eine Streckenbelastung von **16,04 €/ 40 km = 0,40 €/km**.

Für die Arbeitseinsätze wird eine tägliche Kilometerleistung von durchschnittlich 100 km unterstellt, die restliche Fahrleistung nutzt der Unternehmer für private Zwecke.

Für den Transport entstehen somit Kosten je Pferdearbeitstag von:

**100 km x 0,40 €/km = 40 € bzw. 6,66 €/PAS.**

### 4 Gesamtkosten je Pferdeeinsatzstunde

Sachkosten	<b>5,19 €/PAS</b>
Pflegekosten	<b>5,63 €/PAS</b>
Personalkosten	<b>28,89 €/PAS</b>
Transportkosten	<b>6,66 €/PAS</b>
<b><u>Gesamtkosten</u></b>	<b><u>46,37 €/PAS</u></b>

**Anhang VII: Deskriptive Statistik von Parametern der Arbeitsqualität**

Tabelle VII\_1: Deskriptive Statistik zu den registrierten Strecken und deren Bearbeitung über alle Teilflächen

Verfahren / Bestand	Befahrene Strecke [m]				Unbearbeitete Strecke [m]				Doppelbearbeitete Strecke [m]				
	SUM	MW	SD	MIN - MAX	SUM	MW	SD	MIN - MAX	SUM	MW	SD	MIN - MAX	
„Eberswalder Strettenpflug“	I	1.473,4	368,4	21,93	346,0 - 391,2	303,0	2,3	2,04	0,3 - 14,1	41,15	2,6	1,45	0,5 - 5,6
	II	1.411,5	352,9	58,46	269,5 - 401,0	406,3	2,7	2,45	0,4 - 16,2	35,66	1,6	1,16	0,4 - 4,0
„Meinberg Wundstrettenpflug“	I	1.283,8	321,0	43,25	281,2 - 379,1	109,9	1,8	1,89	0,1 - 9,8	36,90	7,8	11,41	0,5 - 27,9
	II	1.380,4	349,6	26,91	310,8 - 371,1	467,6	2,0	2,19	0,3 - 14,8	68,58	2,7	3,29	0,5 - 14,9
„EggeSaar“	I	1.567,7	391,9	36,61	350,5 - 443,7	172,3	1,8	1,12	0,4 - 5,6	65,4	6,9	5,86	0,9 - 15,5
	II	1.820,5	455,1	19,73	435,4 - 475,3	344,6	1,9	2,04	0,2 - 9,9	106,9	3,0	4,45	0,5 - 22,7
„ÖkoSaarU“	I	1.504,3	376,1	46,86	318,1 - 417,7	96,9	1,1	1,06	0,4 - 6,9	39,1	1,4	1,57	0,3 - 6,9
	II	1.542,0	385,5	25,86	362,8 - 418,2	233,8	1,8	1,84	0,3 - 11,9	29,3	1,2	1,18	0,3 - 4,4
„Weilminster Waldrubber“	I	1.976,9	494,2	82,40	410,5 - 570,7	301,4	2,1	1,62	0,4 - 9,2	64,8	2,1	2,66	0,3 - 9,8
	II	1.648,3	412,1	26,73	391,6 - 447,8	409,2	2,5	1,86	0,5 - 11,4	55,1	1,6	2,14	0,2 - 12,0

ANHANG VII

Tabelle VII\_2: Relative Häufigkeiten [%] der erfassten Ursachen (Ereignisse), die für eine ausbleibende Bearbeitung der registrierten Teilstrecke als verantwortlich eingestuft wurden

Verfahren / Bestand	Ursache der unbearbeiteten Teilstrecken [%]									
	k. A.	Stock	Schlagabraum	Sonstige <sup>1)</sup>	Stock & Schlagabraum	Stock & Sonstige	Schlagabraum & Sonstige			
„Eberswalder Streifenpflug“	f	4,9	6,2	41,5	4,0	4,6	3,1	0,8		
	M	2,6	17,0	36,6	23,5	13,1	2,6	4,6		
„Meinberg Wundstreifenpflug“	f	6,1	25,8	38,7	22,6	3,2	1,6	0		
	M	1,7	8,8	57,1	23,9	5,5	0,8	2,1		
„EggeSaar“	f	2,0	20,4	40,8	31,6	4,1	1,0	0		
	M	0	17,8	46,1	26,3	4,4	0,6	2,8		
„ÖkoSaar U“	f	0	35,6	26,4	32,2	3,4	2,3	0		
	M	0	21,5	55,4	18,5	3,1	0,8	0,8		
„Wellmünster Waldgrubber“	f	2,8	19,7	26,1	31,0	7,7	3,5	9,2		
	M	3,0	14,4	35,3	31,7	10,2	1,2	4,2		

<sup>1)</sup> Sonstige Ursachen; sind Ergebnisse die sich aus dem Arbeitsablauf ergeben und i. d. R. durch das jeweilige Betriebsmittel beeinflusst werden.

Tabelle VII\_3: Deskriptive Statistik zu den erfassten Arbeitsbreiten und -tiefen

Verfahren / Bestand	Arbeitsbreite [cm]				Arbeitstiefe [cm]				Abstand der Eichen [cm]				
	SUM	MW	SD	MIN - MAX	SUM	MW	SD	MIN - MAX	SUM	MW	SD	MIN - MAX	
„Ebenswälder Streifenpflanz“	f	7 425	49,2	9,22	17 - 73	1944	12,9	3,53	3 - 22	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	ff	6 007	40,1	12,99	13 - 84	1732	11,9	4,50	2 - 23	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
„Meinberg Wundstreifenpflanz“	f	6 449	44,2	9,12	20 - 63	760	5,2	1,37	2 - 10	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	ff	6 851	45,3	9,20	20 - 64	1259	8,5	3,09	2 - 18	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
„EggeSaar“	f	6 250	51,9	10,88	30 - 90	900	5,7	1,72	2 - 10	6 365	45,3	15,99	20 - 95
	ff	6 644	43,1	11,24	11 - 65	1125	7,4	2,37	3 - 16	4 090	30,8	8,29	15 - 55
„OkoSaarU“	f	2 385	14,1	6,62	5 - 38	1162	7,3	1,84	4 - 16	2 312	14,9	4,12	10 - 20
	ff	2 205	14,4	7,62	4 - 37	1132	7,4	2,09	3 - 14	3 105	20,2	7,40	15 - 55
„Weinmiste Waldgrubber“	f	2 507	17,4	9,96	7 - 60	614	5,7	2,76	2 - 20	3 942	29,6	8,40	12 - 55
	ff	2 250	16,3	7,61	5 - 45	670	4,9	2,09	2 - 11	4 970	38,2	12,67	15 - 70

Anhang VIII: Deskriptive Statistik der Herzschlagfrequenz des Probanden

Tabelle VIII\_1: Deskriptive Statistik der Herzschlagfrequenz des Probanden

Verfahren / Bestand	Anzahl Daten			Mittelwert [min <sup>-1</sup> ]			Maximum [min <sup>-1</sup> ]			Minimum [min <sup>-1</sup> ]			Standardabweichung [min <sup>-1</sup> ]			
	f	n	N	PT	ST	GT	PT	ST	GT	PT	ST	GT	PT	ST	GT	
„Eberswalder Streifenpflug“	f	2581	735	3326	108,0	108,4	108,1	190	192	198	62	66	62	21,4	21,2	21,2
	n	2684	2801	5495	120,2	122,3	121,3	175	169	175	63	66	63	17,5	17,3	17,4
	N	2193	887	3080	123,8	123,5	123,7	163	159	163	84	87	84	12,4	10,6	11,9
„Meinberg Wundstreifenpflug“	f	2683	1635	4318	118,1	121,8	119,5	174	172	174	75	81	75	16,6	16,5	16,6
	n	1376	904	2280	110,4	105,8	108,6	141	143	143	78	70	70	8,8	15,0	11,8
	N	3067	3296	6363	124,9	124,0	124,4	174	175	175	70	71	70	16,6	16,9	16,8
„EggeSoat“	f	2761	892	3653	109,0	109,3	109,0	173	157	173	67	73	67	13,6	11,9	13,2
	n	2098	3050	5148	129,7	132,0	130,9	175	171	175	69	71	69	15,1	17,2	16,3
	N	2681	2755	5436	114,9	114,2	114,5	197	197	197	73	69	69	16,6	17,1	16,8
„Weilmünster Walddrähher“	f	3544	5937	9481	118,4	119,2	118,9	195	197	197	65	63	63	15,7	16,7	16,3

## Anhang IX: Deskriptive Statistik der Zugkraft, Geschwindigkeit und Leistung

Tabelle IX\_1: Deskriptive Statistik zu den Parametern Zugkraft, Geschwindigkeit und Leistung innerhalb der streifenweisen Bearbeitungsvariante in Abhängigkeit der Arbeitsverfahren und Bestandsvarianten

Verfahren / Bestand	Geschwindigkeit [m·s <sup>-1</sup> ]						Effektive Zugkraft [N]						Leistung [W]						
	SP	MW	SD	MIN	MAX	Z	SP	MW	SD	MIN	MAX	Z	SP	MW	SD	MIN	MAX	Z	
„Eberswalder Streifenflug“	I	18	0,96	0,27	0,20	1,32	1,01	18	323,57	180,21	74,67	750,89	298,08	18	327,59	230,41	41,52	950,16	289,46
	II	14	0,63	0,27	0,26	1,36	0,58	14	138,11	88,16	38,06	298,55	93,83	14	91,23	78,90	18,14	280,03	68,57
„Melnberg Wundstreifenflug“	I	19	0,98	0,20	0,64	1,26	1,01	19	316,16	174,53	68,96	714,19	269,77	19	320,89	204,24	60,93	743,82	279,59
	II	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.					
„Egge Saat“	I	20	0,78	0,37	0,16	1,37	0,75	20	597,99	344,47	146,66	1596,67	541,28	20	638,11	516,28	23,96	2011,67	367,38
	II	14	0,60	0,22	0,21	0,96	0,57	14	291,22	192,22	60,46	636,34	236,61	14	207,01	163,74	17,12	579,48	136,47
„ÖkoSat U“	I	10	0,92	0,24	0,07	1,26	0,97	10	441,40	437,80	52,60	1480,28	284,09	10	431,28	473,37	49,58	1575,88	257,74
	II	17	0,76	0,09	0,04	1,49	0,79	17	256,34	241,68	54,34	1020,38	199,54	17	203,89	234,92	17,58	809,82	101,89
„Weilmünster Waldgrubber“	I	14	0,55	0,19	0,28	0,85	0,57	14	299,72	100,11	105,72	410,43	240,49	14	136,61	94,66	29,23	341,80	102,96
	II	15	0,35	0,17	0,04	0,68	0,38	15	162,19	119,93	43,81	486,17	127,33	15	66,95	64,34	7,06	300,08	39,95

Anhang X: Deskriptive Statistik der Herzschlagfrequenz der Pferde

Tabelle X\_1: Deskriptive Statistik der Herzschlagfrequenz der Pferde (P1 und P2) getrennt nach ausgewiesenen Tätigkeitsklassen in Abhängigkeit der Arbeitsverfahren und Bestandsvariante

Verfahren / Pferd / Bestand	Primartätigkeit (PT)				Sekundartätigkeit (ST)				Gesamttätigkeit (GT)			
	[min <sup>-1</sup> ]				[min <sup>-1</sup> ]				[min <sup>-1</sup> ]			
	MW	SD	MIN	MAX	MW	SD	MIN	MAX	MW	SD	MIN	MAX
„Eberswalder Streckpflug“	/	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	̄	73,5	12,5	46	119	70,3	13,4	45	118	72,0	13,1	45
	/	91,2	17,2	36	122	91,7	17,3	37	117	91,3	17,2	36
	̄	82,8	18,0	40	148	79,4	18,7	47	146	81,3	18,4	47
„Melsberg Wendstreifpflug“	/	93,2	22,8	40	147	93,6	23,1	42	137	93,3	22,9	40
	̄	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	/	111,4	18,4	49	163	89,9	25,0	45	154	103,4	23,5	45
	̄	100,7	22,3	52	161	90,6	26,4	43	161	96,6	26,0	43
„EggeSaar“	/	75,6	15,7	31	99	72,4	16,2	31	96	74,9	15,9	31
	̄	87,3	21,2	47	146	76,8	19,8	46	149	81,8	21,1	46
	/	100,2	18,7	58	146	106,4	19,3	60	140	101,5	19,0	58
	̄	99,5	20,7	54	167	88,3	22,7	51	164	93,7	22,5	51
„ÖkoSaarU“	/	85,8	21,4	40	151	83,1	21,5	40	147	84,4	21,5	40
	̄	48,5	7,5	40	67	48,1	6,5	40	67	48,2	6,9	40
	/	85,8	21,4	40	151	83,1	21,5	40	147	84,4	21,5	40
	̄	48,5	7,5	40	67	48,1	6,5	40	67	48,2	6,9	40
„Weilmünster Waldrubber“	/	85,8	21,4	40	151	83,1	21,5	40	147	84,4	21,5	40
	̄	48,5	7,5	40	67	48,1	6,5	40	67	48,2	6,9	40
	/	85,8	21,4	40	151	83,1	21,5	40	147	84,4	21,5	40
	̄	48,5	7,5	40	67	48,1	6,5	40	67	48,2	6,9	40



## Lebenslauf

Name: Dirk Drewes  
Geburtsdatum: 14. Juni 1975

Geburtsort: Bremen-Vegesack

Familienstand: ledig

Schulbildung: 1981–1991 Grund- und Realschule in Schwanewede (Niedersachsen)  
1991–1995 Gymnasiale Oberstufe am SZ Bördestrasse in Bremen-Lesum; Abitur

Grundwehrdienst: 1995–1996 Standorte Augustdorf und Bremen-Grohn

Studium: 1996–2000 Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie an der Georg-August-Universität Göttingen  
Studienabschlüsse: Bachelor und Master (Diplom-Forstwirt)

04/1999 – 06/2000 Studentische Hilfskraft am Institut für Forstliche Biometrie und Informatik der Georg-August-Universität Göttingen

seit 07/2000 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie der Georg-August-Universität Göttingen





