Göttinger Mähhäcksler Tritucap und Forstmulcher – Nicht Brennende Flächenvorbereitung am Beispiel der Zona Bragantina, Nord-Ost-Amazonien, Brasilien.

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Agrarwissenschaften
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

Andreas Block
geboren in Bielefeld

Göttingen im April 2004

D 7

1.	Referentin/ Referent:	Prof. Dr. Wolfgang Lücke
2.	Korreferentin/ Korreferent:	Prof. Dr. Paul L.G. Vlek

Tag der mündlichen Prüfung: 27.05.2004

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS I

VERZEICHNIS DER TABELLEN V

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN VII

VERZEICHNIS DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN X

1 EINLEITUNG 1

2 LITERATURÜBERSICHT 3

2.1 LANDBEWIRTSCHAFTUNG IN NORD-OST-AMAZONIEN 4

2.1.1 Landwirtschaft und Entwaldung in Amazonien 4

2.1.2 Landwirtschaftliche Nutzung in Amazonas-Regenwaldregionen 6

2.1.3 Gegenüberstellung der Brandrodung und der Mulchwirtschaft 6

2.1.3.1 Brandrodung/ Slash-and-Burn 6
2.1.3.2 Mulchwirtschaft/ Slash-and-Mulch 7
2.1.3.3 Brandrodung und Mulchwirtschaft im Vergleich 7
2.1.3.4 Vermeidung der Degradation landwirtschaftlich genutzter Flächen 10
2.1.3.5 Nährstoffproblematik bei der Mulchwirtschaft 11
2.1.3.6 Dynamik der Pflanzengesellschaften 11
2.1.3.7 Flexibilisierung des Anbaus 12
2.1.3.8 Veränderung der Arbeitsbedingungen 15

2.2 BISHERIGE MULCHVERFAHREN 16

2.3 GRUNDLAGEN DER MASCHINENENTWICKLUNG 18

2.3.1 Theorie des Schnittes 19

2.3.2 Theorie der Holzaufbereitung 23

2.3.3 Grundsätzliche Überlegungen zum Maschinendesign 25

3 ENTWICKLUNG DES MECHANISIERTEN MULCHKONZEPTS 27

3.1 ARBEITSAUFWAND DES FÄLLENS UND BRENNENS 27

3.2 ÖKONOMISCHE BETRACHTUNGEN 27

3.3 HYPOTHESE 29

4 MATERIAL UND METHODEN 30

4.1 STUDIENREGION 30

4.1.1 Geografische Lage 31

4.1.2 Klima 31

4.1.3 Boden 32

4.1.4 Vegetation 32

4.1.5 Landwirtschaft in der Zona Bragantina 33

4.1.6 Versuchsflächen 34
4.1.6.1 Auswahlkriterien 35
4.1.6.2 Beschreibung der Versuchsflächen 36
4.1.6.2.1 Vegetation 36
4.1.6.2.2 Phytomasseerhebung vor der Bearbeitung 37
4.1.6.2.3 Holzdichte 38
4.1.6.2.4 Flächengröße 39
4.1.6.2.5 Phytomasseerhebung nach der Bearbeitung 40
4.1.6.3 Begriffe der Flächenbeschreibung 40
4.2 MASCHINEN 41
4.2.1 Doppelrotorhacker 41
4.2.1.1 Fäll- oder Trennvorrichtung 41
4.2.1.2 Antriebskonzept 42
4.2.1.3 Aufbereitungspfad 43
4.2.1.4 Konzeption des Doppelrotorhackers 43
4.2.1.5 Funktion 43
4.2.1.6 Entwicklung 45
4.2.1.6.1 Tritucap, Version 1.0 45
4.2.1.6.2 Tritucap, Version 1.1 46
4.2.1.6.3 Tritucap, Version 1.2 47
4.2.2 Tritucap 2 49
4.2.3 AHWI FM 600 51
4.2.4 AHWI RT 350 mit UZM 580 53
4.2.5 Zugfahrzeuge 54
4.2.5.1 Traktor John Deere 3050 54
4.2.5.2 Traktor John Deere 7710 55
4.3 VERSUCHSPARAMETER UND MESSGRÖßEN 55
4.3.1 Kraftstoffverbrauch 55
4.3.2 Drehmoment und Drehzahl 56
4.3.3 Fahrgeschwindigkeit 56
4.3.4 Ermittlung der Flächenleistung 57
4.3.5 Häckselqualität 58
4.4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND DATENSAMMLUNG 62
4.5 STATISTISCHE AUSWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE 63
4.5.1 Charakterisierung der untersuchten Flächen 64
4.5.2 Einflussfaktoren auf die Flächencharakteristika 64
4.5.3 Einflussfaktoren auf die Bearbeitung der Flächen 66
5 ERGEBNISSE 67
5.1 STRUKTUR UND PHYTOMASSE DER UNTERSUCHTEN FLÄCHEN 67
5.1.1 Merkmale zur Flächencharakterisierung 67
5.1.2 Merkmale der untersuchten Flächen 69
5.1.3 Weitere Einflussfaktoren auf die Merkmale 72
5.2 RAUMDICHTE DER UNTERSUCHTEN PFLANZENSPEZIES 75
5.3 ARBEITSERGEBNISSE DER HÄCKSELSYSTEME 75

5.3.1 Arbeitsergebnisse Tritucap 1 76
5.3.1.1 Konstruktive Änderungen 76
5.3.1.2 Leistungsdaten Tritucap 1 77
5.3.2 Arbeitsergebnisse Tritucap 2 79
5.3.3 Arbeitsergebnisse AHWI FM 600 84
5.3.3.1 Bearbeitung von Flächen mit vorangegangener Strukturdatenerfassung 84
5.3.3.2 Bearbeitung von Flächen mit und ohne vorangegangene Strukturdatenerfassung 85
5.3.3.3 Bearbeitungsleistung der AHWI FM 600 86
5.3.4 Arbeitsergebnisse AHWI RT 350 87
5.3.4.1 Einsatz in Brachevegetation 88
5.3.4.2 Einsatz in einer Ölpalmenplantage 89
5.4 HÄCKSELQUALITÄT 91
5.4.1 Tritucap 1 92
5.4.2 Tritucap 2 96
5.4.3 AHWI FM 600 98
5.5 DREHMOMENT UND DREHZAHL 102
6 DISKUSSION 107
6.1 STRUKTUR UND PHYTOMASSE DER FLÄCHEN 107
6.2 RAUMDICHTE DER UNTERSUCHTEN SPEZIES 109
6.3 ERGEBNISSE DER ARBEIT MIT DEN HÄCKSELMASCHINEN 111
6.3.1 Tritucap-Häcksler 111
6.3.1.1 Häckselorgane 111
6.3.1.2 Antrieb 114
6.3.1.3 Einzugs- und Aufbereitungspfad 115
6.3.2 Forstmulcher FM 600 117
6.3.3 Leistungsdaten der Häckselmaschinen 119
6.3.3.1 Doppelrotorhäcksler Tritucap 1 und Tritucap 2 120
6.3.3.2 Forstmulcher AHWI FM 600 124
6.3.3.3 Raupentraktor RT 350 und UZM 580 127
6.3.4 Häckselqualität 128
6.3.5 Hackschnitzel der Tritucap 1, Tritucap 2 und AHWI FM 600 im Vergleich 130
6.3.6 Drehmoment und Drehzahl 133
6.3.7 Antriebskonzeption der Häcksler 136
6.3.8 Weitere Aspekte des Maschineneinsatzes unter Bedingungen der Sekundärvegetation 137
6.3.8.1 Naturräumliche Einflussfaktoren 137
6.3.8.2 Einfluss der vorausgegangenen Flächennutzung und -bearbeitung 138
6.3.8.3 Lage der Fläche 139
6.4 VERGLEICHENDE BETRACHTUNGEN 140
6.4.1 Einflussfaktoren auf die Bearbeitungsleistung 140
6.4.2 Qualität der Flächenbearbeitung 141
6.4.3 Auswahlkriterien für eine Häckselmaschine 142
6.4.3.1 Trennverfahren der Häckslerkonzepte 142

6.4.3.2 Überschlägige Kostenkalkulation 143
6.4.3.2.1 Annahmen 144
6.4.3.2.2 Ergebnisse der Berechnung 145
6.5 FAZIT 148
7 ZUSAMMENFASSUNG 150
8 LITERATURVERZEICHNIS 152
9 ANHANG I

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Stofftransfer in die Atmosphäre mit dem Brand relativ zu den Vorräten in der verbrannten Biomasse [nach HÖLSCHER (1995)] _____ 8

Tabelle 2: Übersicht der Einsatzmöglichkeiten und Arbeitskapazitäten von verwendeten mechanisierten Flächenvorbereitungsverfahren [nach DENICH ET AL. 2004] _____ 17

Tabelle 3: Interpretation für Werte der Raumdichte von Holz (nach HARZMANN 1988) _____ 39

Tabelle 4: Begriffsdefinition der Flächenbeschreibung _____ 41

Tabelle 5: Qualitätsklassen der produzierten Hackschnitzel _____ 60

Tabelle 6: Ausgewählte Korrelationskoeffizienten von botanischen Merkmalen mit Signifikanzniveau (n= 41) _____ 72

Tabelle 7: Zusammenfassung von Altersangaben de Brachevegetation in einem auswertbaren statistischen Schlüssel _____ 73

Tabelle 8: Zusammenfassung von Flächenlagen in einem auswertbaren statistischen Schlüssel _____ 73

Tabelle 9: Bestimmtheitsmaß, F-Wert und Signifikanzniveau (Pr > F) der Varianzanalyse des Merkmals (mittlerer Durchmesser der Pflanzen) mit den Einflussfaktoren „Alter der Fläche“ und „Lage der Fläche“ (n=41) _____ 74

Tabelle 10: Bestimmtheitsmaß, F-Wert und Signifikanzniveau der Varianzanalyse der botanischen Merkmale mit den Klassen „Alter der Vegetation“ und „Lage der Fläche“ sowie der abhängigen Variablen „mittlere Masse der Einzelpflanzen“ (n=41) _____ 74

Tabelle 11: Zusammenfassung der Bearbeitungsreihenfolge im statistischen Schlüssel „Erfahrung“ _____ 76

Tabelle 12: Gegenüberstellung der Merkmale mit den Arbeitsergebnissen der mit der Tritucap 1.3 bearbeiteten Versuchsflächen _____ 77

Tabelle 13: Numerische Verteilung der Pflanzendurchmesser auf den Versuchsflächen 1 (n= 304) und 14 (n= 278) _____ 78

Tabelle 14: Ausgewählte Relationen der Bearbeitungsdaten von Fläche 1 und Fläche 14 _____ 79

Tabelle 15: Gegenüberstellung der Merkmale mit den Arbeitsergebnissen der mit der Tritucap 2.0 bearbeiteten Versuchsflächen _____ 80

Tabelle 16: Numerische Verteilung der Pflanzendurchmesser auf den

Versuchsflächen 35 (n= 180) und 36 (n= 1.149) _____ *81*

Tabelle 17: *Ausgewählte Relationen der Bearbeitungsdaten von Fläche 35 und Fläche 36*_____ *82*

Tabelle 18: *Arbeitsbreite, Fahrgeschwindigkeit und theoretische Flächenleistung der Tritucap 2 im Betrieb mit Doppel- und Monorotor*_____ *83*

Tabelle 19: *Mittelwerte, Standardabweichungen und Extrema von Arbeitsergebnissen mit der FM 600* _____ *86*

Tabelle 20: *Mittelwerte, Standardabweichungen und Extrema von Arbeitsergebnissen mit der FM 600, Flächen mit vorangegangener Strukturdatenerfassung87*

Tabelle 21: *Daten der Bearbeitung zweier Bracheflächen mit AHWI RT 350*_____ *89*

Tabelle 22: *Daten der Bearbeitung einer Ölpalmenplantage mit AHWI RT 350* __ *90*

Tabelle 23: *Bearbeitete Flächen zur vollständigen Qualitätsbestimmung der Hackschnitzel aller Größenklassen.* _____ *91*

Tabelle 24: *Massenanteile von Hackschnitzeln aller Durchmesserklassen an den definierten Qualitätsklassen, Bearbeitungsmaschine: Tritucap 1* ____ *94*

Tabelle 25: *Massenanteile von Hackschnitzeln aller Durchmesserklassen an den definierten Qualitätsklassen, Bearbeitungsmaschine: Tritucap 2* ____ *97*

Tabelle 26: *Anteile von Hackschnitzeln aller Durchmesserklassen an den definierten Qualitätsklassen, Bearbeitungsmaschine: AHWI FM 600* _____ *100*

Tabelle 27: *Gegenüberstellung der gemessenen Drehmomente, Drehzahlen, Leistungen und Energien in Abhängigkeit von der Bearbeitungsmaschine* _____ *103*

Tabelle 28: *Raumdichten ausgewählter Pflanzenspezies (Quelle: eigene Messungen, Fearnside (1997), FAO (1999))* _____ *110*

Tabelle 29: *Vergleich der Leistungs- und Effizienzdaten der doppelrotorigen Häckselmaschinen Tritucap 1 und Tritucap 2* _____ *123*

Tabelle 30: *Pearson'sche Korrelationskoeffizienten ausgewählter Bearbeitungsmerkmale (n=33)* _____ *125*

Tabelle 31: *Gegenüberstellung der Kosten der Flächenbearbeitung mit Tritucap 2 und AHWI FM 600* _____ *146*

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Beispiels einer traditionellen Anbaureihenfolge eines Kleinbauern in der Brandrodungswirtschaft (nach DENICH ET AL. 1998) 13

Abbildung 2: Auswahl von spanlosen Schneidverfahren und Werkzeuganordnungen für das Schneiden pflanzlichen Materials [NACH PERSSON (1987), ERWEITERT NACH BÄRISCH ET AL. 1982]. 20

Abbildung 3: Auswahl von spanenden Schneidverfahren und Werkzeuganordnungen für das Schneiden pflanzlichen Materials [NACH PERSSON (1987), ERWEITERT NACH BÄRISCH ET AL. 1982]. 22

Abbildung 4: Bauarten von Holzhackern [BRUSCHE 1983] 24

Abbildung 5: Lage der Untersuchungsregion in Nord-Brasilien 30

Abbildung 6: Satellitenbild mit den wichtigsten Straßenverbindungen der Untersuchungsregion 31

Abbildung 7: Satellitenbild der Kleinstadt Igarapé-Açú mit dem Netz der wichtigsten Straßenverbindungen 34

Abbildung 8: Tritucap 1, Vorderansicht 44

Abbildung 9: Konzeption von Aufbereitungspfad und Auswurfbereich der Tritucap 44

Abbildung 10: Tritucap 1.0- Draufsicht - Konzeption der Antriebs- und Häckselkomponenten 46

Abbildung 11: Tritucap 1.2- Draufsicht der Konzeption der Antriebs- und Häckselkomponenten 47

Abbildung 12: Tritucap 1.2- Seitenansicht und Maße 48

Abbildung 13: Tritucap 2- Konzeption der Antriebs- und Häckselkomponenten 49

Abbildung 14: Tritucap 2- Seitenansicht der Antriebs- und Häckselkomponenten 50

Abbildung 15: Serienmodell des Forstmulchers AHWI FM 600 (b= 2.700 mm, Rotordurchmesser 600 mm, Masse= 2.800 kg, Umfangsgeschwindigkeit= 49 m/s bzw. 31,4 m/s) 51

Abbildung 16: Schematische Darstellung des ersten Arbeitsschrittes der AHWI FM 600 (Fällen und Vorzerkleinerung) 52

Abbildung 17: Schematische Darstellung des zweiten Arbeitsschrittes der AHWI FM 600 (Nachzerkleinerung) 53

Abbildung 18: Raupentraktor AHWI RT 350 mit UZM 580 54

Abbildung 19: Organigramm der Klassierung von Hackschnitzeln zur Qualitätsbestimmung 61

Abbildung 20: Muster für die einzelnen Hackschnitzelqualitätsklassen 62
Abbildung 21: Numerischer Anteil der verschiedenen Wuchsformen der untersuchten Pflanzen (n= 29.398, 2.760 nicht zuzuordnen) 68
Abbildung 22: Mittlere Pflanzendurchmesser und Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Untersuchungsfläche (n=41) 70
Abbildung 23: Mittlere Pflanzenhöhen und Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Untersuchungsfläche (n=41) 71
Abbildung 24: Oberirdisch aufgewachsene Phytomasse in Abhängigkeit von der Untersuchungsfläche (n=42) 71
Abbildung 25: Mittlere Partikelvolumina der durch Siebung ermittelten Größenklassen, Bearbeitungsmaschine: Tritucap 1 93
Abbildung 26: Verteilung der Hackschnitzelqualitäten auf die definierten Größenklassen, Bearbeitungsmaschine: Tritucap 1; Bezugsgröße: Masse der Gesamtprobe 95
Abbildung 27: Mittlere Partikelvolumina der durch Siebung ermittelten Größenklassen,, Bearbeitungsmaschine: Tritucap 2 96
Abbildung 28: Verteilung der Hackschnitzelqualitäten auf die definierten Größenklassen, Bearbeitungsmaschine: Tritucap 2; Bezugsgröße: Masse der Gesamtprobe 97
Abbildung 29: Mittlere Partikelvolumina der durch Siebung ermittelten Größenklassen, Bearbeitungsmaschine: AHWI FM 600 99
Abbildung 30: Verteilung der Hackschnitzelqualitäten auf die definierten Größenklassen, Bearbeitungsmaschine: AHWI FM 600; Bezugsgröße: Masse der Gesamtprobe 101
Abbildung 31: Hackschnitzelvolumina in den Größenklassen in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit der Häckselwerkzeuge bei Forstmulcher AHWI FM 600 102
Abbildung 32: Drehmoment-, Drehzahl- und Leistungsverläufe während eines Häckselvorganges mit der Tritucap 2 über den Zeitraum von 7 Sekunden 105
Abbildung 33: Drehmoment-, Drehzahl- und Leistungsverläufe während eines Häckselvorganges mit der AHWI FM 600 über den Zeitraum von 7 Sekunden 106
Abbildung 34: Hypothetischer Zusammenhang zwischen Motorleistung und Häckselleistung der Doppelrotormaschinen 122
Abbildung 35: Verteilung der Hackschnitzelgrößen auf die Siebfraktionen in Abhängigkeit von der Bearbeitungsmaschine 130

Abbildung 36: Verteilung der Hackschnitzelqualitäten auf die definierten Qualitätsklassen in Abhängigkeit von der Bearbeitungsmaschine ___ 131
Abbildung 37: Verteilung der Hackschnitzelqualitäten auf die definierten Größen- und Qualitätsklassen in Abhängigkeit von der Bearbeitungsmaschine ___ 132

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

a	Jahr
b	Breite (in technischen Zeichnungen)
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
°C	Grad Celsius
cm	Zentimeter
etc.	et cetera
Fam-AK	Familien-Arbeitskraft
Fremd-AK	Fremd-Arbeitskraft (direkt zu entlohnende Arbeitskraft)
ggf.	gegebenenfalls
GIS	Geographisches Informationssystem
GPS	Globales Positionierungs System (Satellitenortung)
h	Stunde/ Höhe (in technischen Zeichnungen)
ha	Hektar
km	Kilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
kW	Kilowatt
l	Liter
m	Meter
mm	Millimeter
m²	Quadratmeter
m/s	Meter pro Sekunde
Max	Maximum
Mio.	Million
Min	Minimum oder Minute
Nm	Newtonmeter
Nr.	Nummer
o.a.	oben angeführt
o.g.	oben genannt
PNV	potentielle natürliche Vegetation
Pr	*Probability*: Wahrscheinlichkeit (Statistik)

s	Sekunde
s.	siehe
S.	Seite
s.o.	siehe oben
Std.-Abw.	Standardabweichung
s.u.	siehe unten
t	Tonne
teilw.	teilweise
UPM	Umdrehungen pro Minute
u.U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
vollst.	vollständig
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Der Schutz der tropischen Regenwälder ist weltweit als eine vordringliche Aufgabe anerkannt und als solche seit der UNCED-Konferenz 1992 in Rio de Janeiro in der Agenda 21 festgeschrieben [UNO 2000]. In diesem Zusammenhang hat der Begriff der „nachhaltigen Nutzung“ in allen Wirtschaftsbereichen als Inbegriff für den Ressourcenschutz große Bedeutung erlangt. Trotzdem wird die Zurückdrängung tropischer Regenwälder unvermindert fortgesetzt, hauptsächlich durch die Umwandlung der Waldflächen zu Weideland oder Dauerkulturen sowie die zunehmende Feld-Wald-Wechselwirtschaft (shifting cultivation), die auch heute noch große Bedeutung in den meisten tropischen Ländern hat [FEARNSIDE 1986; DUBOIS 1990; FEARNSIDE 1993; FAMINOW 1998; FAO 1999; COCHRANE ET AL. 2002; CATTANEO 2002; VOSTI ET AL. 2002]. Sie wird durch eine mehrjährige Brachephase charakterisiert, an die sich eine etwa zweijährige Anbauphase anschließt. Integraler Bestandteil der Flächenvorbereitung zur Nutzung nach der Brachephase ist das Fällen und Brennen der während der Brachedauer aufgewachsenen Vegetation. Neben der Räumung der Fläche wird dadurch ein kurzfristiger bodenverbessernder Effekt erzielt [DIEKMANN 1997; KATO, M.S.A. 1998; KATO, O.R. 1998]. Die im gefällten Pflanzenmaterial gebundenen Nährstoffe werden zum Teil an den Boden in Form von Asche zurückgeführt [KATO ET AL. 1999]. Der weitaus größte Teil der Nährstoffe geht jedoch mit dem Brennen verloren [JORDAN 1987; JORDAN 1989; HÖLSCHER 1997]. In Verbindung mit der unter dem demographischen Druck stattfindenden Verkürzung der Brachephasen führt das zu einem mittelfristigen Verlust an Ertragspotential der Flächen [JORDAN 1989; DENICH ET AL. 2000]. Unter diesen Voraussetzungen ist das System der „shifting cultivation“ als nicht nachhaltig einzustufen. Da die Nährstoffverluste während des Brennens als ein Hauptfaktor der Störung des Nährstoffkreislaufes angesehen werden, scheint der Umstieg auf ein nicht brennendes Flächenvorbereitungsverfahren naheliegend [EWEL 1986; VIELHAUER ET AL. 2000]. Dieser Umstieg auf eine mulchbasiertes Bewirtschaftungssystem ist jedoch nur bei mechanisierter Zerkleinerung des Pflanzenmaterials denkbar. Dabei erfolgt das Fällen der Vegetation idealerweise in einem Arbeitsgang zusammen mit der Zerkleinerung und Verteilung des Materials auf der

Bodenoberfläche. Speziell für diese Anwendung entwickelte Maschinen gab es bislang nicht. Daher hat das Institut für Agrartechnik eine Maschine entwickelt, die ebendies leisten kann [DENICH ET AL. 1998].

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Erprobung des neu entwickelten Maschinenkonzepts sowie der Vergleich mit einem Forstmulchgerät aus der Serienproduktion.

Es werden Arbeitsergebnisse und Leistungsdaten der Maschinenkonzepte in Abhängigkeit von der zu bearbeitenden Vegetation dargestellt, wobei auch die notwendigen Anpassungsmaßnahmen an die tropischen Vegetations- und Klimaverhältnisse dokumentiert sind.

2 Literaturübersicht

Zu Brasilien gehören ungefähr 3,7 Mio. km² tropischer Feuchtwaldflächen. Am weltweiten Gesamtbestand macht das den größten Anteil mit etwa 26,6% aus [LELE ET AL. 2000]. Aus der Bedeutung der Ressource Regenwald für die globale Biodiversität, das globale und regionale Klima sowie der ökologischen und ökonomischen Bedeutung erwächst Brasilien eine ganz besondere Verantwortung für seinen Erhalt. In der Zeit von 1978 bis 1988 war Brasilien mit einer Entwaldungsrate von 42,1 Mio. ha/Jahr das Land mit dem größten Waldflächenverlust der Erde. In den Jahren 1990-2000 ist diese Rate teilweise sogar noch angestiegen auf bis zu 58,1 Mio. ha/Jahr im Erfassungszeitraum 1994/95 [FAO 1999 nach CATTANEO 2002; INPE[1] 2002 nach CATTANEO 2002], obwohl die in der UNCED-Konferenz in Rio de Janeiro 1992 formulierten Ziele, die in der Agenda 21 festgeschrieben sind, unter anderem den Schutz der tropischen Regenwald-Ökosysteme beinhalten [UNO 2000]. Die Erreichung der in der Agenda 21 verankerten Ziele gerade im Bezug auf den Schutz der Biosphäre Regenwald wird durch weltweite, vor allem aber durch staatliche und regionale wirtschaftliche Interessen Brasiliens ständig in Frage gestellt [MYERS 1983; FEARNSIDE 1993; FUJISAKA ET AL. 1996; KOIFFMANN BECKER 2001]. Der anteilige Beitrag eines Wirtschaftssektors an der Entwaldung ist dabei zahlenmäßig nur schwer zu fassen, da die statistische Grundlage veraltet oder inkonsistent ist [MERTINS 1991; FEARNSIDE 1993; BROWN & LUGO 1992; HOUGHTON ET AL. 2000; LELE ET AL. 2000]. Außerdem macht die starke Verflechtung der Ursachen der Entwaldung eine Quantifizierung des jeweiligen Anteils nahezu unmöglich. Während D. S. ALVES (2001) nach Zahlen vom Brasilianischen Weltraumforschungsinstitut INPE (2001) von einer jährlichen Verlustrate von 60 Millionen Hektar Amazonaswald im Jahr 2000 berichtet, gehen NEPSTAD ET AL. (1999) davon aus, dass durch die Kollateralschäden des Holzeinschlags zusätzlich jährlich 10-15 Millionen Hektar Regenwald nachhaltig geschädigt werden, ohne dass sie ökonomischen Nutzen bringen. Weiterhin führt nach COCHRANE ET AL. (2002) die Entwaldung von Teilen der zusammenhängenden Regenwaldfläche zur Fragmentierung der verbliebenen

[1] INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Waldflächen. Diese Fragmente werden durch die Störungen der angrenzenden entwaldeten Flächen beeinflusst. SKOLE UND TUCKER (1993) haben geschätzt, dass im Jahr 1988 durch Fragmentierung und die damit verbundenen Randeffekte (z.B. Einfluss durch Wind, erhöhte Verdunstungsrate, eindringende Fremdspezies etc.) eine Primärwaldfläche vom 1,5-fachen der Größe der tatsächlich entwaldeten Fläche beeinflusst wurde. Die so entstandenen ökonomischen und ökologischen Verlustgrößen sind jedoch in keiner Statistik erfasst.

FUJISAKA ET AL. (1996) wie auch LELE ET AL. (2000) stellen heraus, dass die Hauptursachen für den Waldverlust auf die drei Haupteinflüsse Holzeinschlag, Straßenbau und damit einhergehend die Erweiterung der agrarisch genutzten Flächen zurückzuführen sind [NEPSTAD ET AL. 2001]. Die Entwaldung wird dabei teilweise durch staatliche Entwicklungsprogramme finanziell gestützt.

2.1 Landbewirtschaftung in Nord-Ost-Amazonien

Die Landbewirtschaftung ist auch in Nord-Ost-Amazonien direkt mit der Entwaldung der nativen Regenwaldflächen verknüpft, auch wenn diese bereits im 19. Jahrhundert begonnen hat. Speziell diese Region kann damit auf eine relativ lange Tradition der Landbewirtschaftung auf Regenwaldböden zurückblicken [DENICH 1989; VIELHAUER ET AL. 2000].

2.1.1 Landwirtschaft und Entwaldung in Amazonien

MERTINS (1991) spricht im Zusammenhang mit der Entwaldung des Amazonasregenwaldes davon, dass die größte Bedrohung für den Amazonischen Regenwald nach wie vor von der Brandrodung zur Gewinnung landwirtschaftlicher Nutzflächen für Klein- und auch Mittelbetriebe ausgeht. Jedoch auch der Beitrag weidewirtschaftlich ausgerichteter Großbetriebe nimmt zu [PERRINGS 2001]. Der durchschnittliche Anteil der Rodungsflächen für Weidezwecke wird von MERTINS (1991) mit ca. 50 % angegeben. Die restlichen 50 % werden der Flächengewinnung durch Kleinbauern zugerechnet. Es muss jedoch an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass MERTINS (1991) sich ausschließlich auf die Flächennutzung nach Beseitigung der Waldflächen bezieht. NEPSTAD ET AL. (1999) weisen darauf hin, dass große Waldflächen, die nicht in

Kartierungsprogrammen der Entwaldung erfasst werden, so nachhaltig durch Holzeinschlag geschädigt werden, dass sie die Anfälligkeit für zukünftige, auch unkontrollierte Brände stark erhöht [UHL & KAUFFMANN 1990; VERÍSSIMO ET AL. 1992; UHL 1998; COCHRANE & SCHULZE 1999; COCHRANE 2001]. Durch die vorangegangene Schwächung der Flächen, z.B. durch Holzeinschlag, werden diese in den Folgejahren dann ggf. in landwirtschaftliche Nutzung genommen [UHL & BUSCHBACHER 1985; UHL ET AL. 1997].

Unter der gegebenen Unsicherheit schätzt FEARNSIDE (1993), dass etwa die Hälfte der Entwaldung der Ausweitung der landwirtschaftlichen Nutzflächen zuzurechnen ist. Hierbei spielt die Erweiterung und Neuanlage von Weideflächen zur Rinderhaltung eine mindestens so bedeutende Rolle, wie die Zurückdrängung des Regenwaldes durch den kleinbäuerlichen Ackerbau [FAMINOW 1998; VOSTI ET AL. 2002]. Die im Amazonasgebiet übliche Wald-Feld-Wechselwirtschaft, bei der sich an eine kurze Anbauphase mit den Nutzpflanzenkulturen eine wesentlich längere Brachephase anschließt, stellt historisch gesehen eine nachhaltige Bewirtschaftungsmethode dar, die durch regional stark gebundene Indianerstämme praktiziert wurde [WATTERS 1971, PICHÓN 1996]. Die Nachhaltigkeit ist hier jedoch nur bei strikter Einhaltung kurzer Bewirtschaftungs- und langer Brachephasen gegeben [UHL 1987]. Durch nicht angepasste Bewirtschaftungsmethoden und unter dem Druck der Bevölkerungszunahme, die in der Regel mit einer starken Verkürzung der Brachephasen einhergeht, ist die Nachhaltigkeit nicht mehr gewährleistet [FAMINOW 1998]. Im Gegensatz zu früher, als sich der Sekundärwald nach der Anbauphase in einer jahrzehntelangen sukzessiven Entwicklung wieder der ursprünglichen Vegetation visuell und funktionell annähern konnte, kommt er heute aufgrund der intensiven Nutzung nicht mehr über die Initialstadien hinaus [WATTERS 1971; DENICH 1989; DENICH & KANASHIRO 1993]. Die Bewirtschaftung der bestehenden kleinbäuerlichen Ackerflächen nach Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit mit ertragssteigernden und –erhaltenden Methoden könnte einen entscheidenden Beitrag zum Erhalt der Ressource Amazonasregenwald leisten. Die Entstehung übernutzter Flächen ohne wirtschaftliches Ertragspotential würde vermieden und damit könnte der Druck auf bestehende Bracheflächen oder Primärwaldflächen vermindert werden.

2.1.2 Landwirtschaftliche Nutzung in Amazonas-Regenwald-regionen

Heute nutzen Kleinbauern große Teile landwirtschaftlicher Flächen der Nord-östlichen Amazonasmündungsregion nach der traditionellen Wald-Feld-Wechselwirtschaft, die auf der Ausnutzung des regenerativen Potentials der holzigen Sekundärvegetation beruht [HÖLSCHER 1995; SOMMER 2000]. Nach einer bis zu zweijährigen Kulturphase schließt sich eine idealerweise mehr als fünfjährige Brachephase an, nach der dann der Bewirtschaftungszyklus mit dem Fällen der Sekundärvegetation von vorn beginnt. Die, auch aufgrund der demographischen Entwicklung, aktuell stattfindende Verkürzung der Brachephasen führt zu einem Verlust des Ertragspotentials. Dies hat eine Einschränkung der Regenerationsfähigkeit dieser Flächen zur Folge, nicht zuletzt wegen der zunehmend eingeschränkten Verfügbarkeit von Nährstoffen für die Bildung der Brachevegetation [GEHRING ET AL. 1999]. Letztendlich führt dies zu einem völligen Verlust der Bodenfruchtbarkeit und damit zur Aufgabe der Produktionsflächen [WATTERS 1971; UHL ET AL. 1988].

2.1.3 Gegenüberstellung der Brandrodung und der Mulch-wirtschaft

Im Folgenden werden die beiden derzeit möglichen Systeme der Flächenvorbe-reitung auf tropischen Ackerböden vorgestellt.

2.1.3.1 Brandrodung/ Slash-and-Burn

Traditionell wird die zu bewirtschaftende Fläche durch den Kleinbauern manuell während der auslaufenden Regenzeit oder beginnenden Trockenzeit (ab etwa Ende September) gerodet, die gefällte Vegetation verbleibt zur Trocknung auf dem Feld. Nach einer etwa dreiwöchigen Trockenphase der geschlagenen Brachevegetation wird diese in Brand gesetzt und die Fläche somit geräumt [PICHÓN 1996; THURSTON 1997]. Nach dem ersten Brennen schließt sich eine weitere manuelle Räumung der verbliebenen, unvollständig verbrannten holzigen Pflanzenteile an, die zu Haufen zusammengetragen werden und ein weiteres Mal in Brand gesetzt werden. Die so von der sperrigen Vegetationsdecke geräumte Fläche ist hiermit für die Bewirtschaftung vorbereitet und es schließt sich eine

etwa zweijährige Nutzungsphase an. Die erste Bepflanzung der Fläche findet mit dem Einsetzen der ersten Regenfälle (etwa ab dem letzten Dezemberdrittel) statt. Viele Literaturquellen verweisen darauf, dass in tropischen Feuchtwäldern ein Großteil der verfügbaren Nährstoffe bereits in Pflanzengeweben gebunden ist [NYE & GREENLAND 1960; WEAVER 1979; DOS SANTOS 1987]. Daraus erklärt sich die düngende Wirkung der nach dem Brennen auf der Bodenoberfläche verbliebenen Asche, insbesondere weil die Pflanzenverfügbarkeit der meisten in der Asche vorliegenden Nährstoffe als hoch eingestuft wird [HASLER & NUSSBAUMER 1996; VETTER ET AL. 1996; VETTER ET AL. 1997; OBERNBERGER 1997; KUNKEL 1998; GERICKE 2000; KATO ET AL. 2000]. Nach der Bewirtschaftungsperiode, in der in der Regel die Erträge mit zunehmender Dauer der Bewirtschaftung zurückgehen, wird in der Bracheperiode durch die Sekundärvegetation ein neues Potential für den Anbau von Feldfrüchten aufgebaut. Durch das Nachwachsen der holzigen Brachevegetation werden Gräser, Schädlinge und Schaderreger bis auf ein Maß reduziert, das eine Bewirtschaftung wieder ermöglicht. Zum Anderen wird die Bodenfruchtbarkeit durch Wiederauffüllen der Nährstoffvorräte aus tieferen Bodenschichten wiederhergestellt [EWEL 1986, PICHÓN 1996].

2.1.3.2 Mulchwirtschaft/ Slash-and-Mulch

Das augenfälligste Merkmal der Mulchwirtschaft ist der Verzicht auf jegliche Form der brennenden Flächenvorbereitung. Bei den von WATTERS (1971) und THURSTON (1994) angesprochenen Verfahren der Mulchwirtschaft von Naturvölkern in Regenwaldregionen wird ebenfalls die Vegetation zunächst gefällt. Im folgenden Schritt wird diese jedoch nicht verbrannt, sondern als Deckschicht und Nährstofflieferant auf der Fläche belassen [KATO ET AL. 1999]. Bei jeglicher weiteren Bearbeitung der Fläche ist jedoch das sperrige Pflanzenmaterial hinderlich, so dass eine Zerkleinerung dringend angeraten ist. Die vor oder nach dem Fällen gesäten oder gepflanzten Kulturpflanzen wachsen durch die Mulchdecke hindurch.

2.1.3.3 Brandrodung und Mulchwirtschaft im Vergleich

Nach Untersuchungen von HÖLSCHER (1995), die in der Zona Bragantina, nahe der Großstadt Belém durchgeführt wurden, geht im traditionellen

Brandrodungsverfahren mit dem Brennen ein wesentlicher Teil der Nährstoffe durch Volatilisation für die Kulturpflanzen verloren. Mittelfristig geht damit eine Ertragsdepression und eine verminderte Regenerationsfähigkeit der Sekundärvegetation einher. HÖLSCHER (1995) hat für die Nährstoffverluste während des Brennens die in Tabelle 1 gezeigten Daten ermittelt. Sie zeigt, dass ein großer Teil der in der Sekundärvegetation gebundenen Kohlenstoff- und Nährstoff-Vorräte während der Phase des Brennens für die nachfolgende Bewirtschaftung verloren geht.

Tabelle 1: Stofftransfer in die Atmosphäre mit dem Brand relativ zu den Vorräten in der verbrannten Biomasse [nach HÖLSCHER (1995)]

	C	N	P	S	Na	K	Ca	Mg
[%]	98	96	47	76	30	48	35	40

Des weiteren ist der Boden beim Brennen einer großen Hitzeeinwirkung ausgesetzt, die den Boden zwar teilweise hygienisiert und durch die alkalische Wirkung der Asche leicht den niedrigen pH-Wert des Bodens anhebt [POHLANDT 1995, PICHÓN 1996, OBERNBERGER 1997, GERICKE 2000], im Gegenzug jedoch das für die neuerliche Sukzession so elementare Wurzelsystem [WIESENMÜLLER 1999] sowie die vorhandene Samenbank nachhaltig schädigt [UHL ET AL. 1990; KAUFFMAN 1991]. Nach Untersuchungen von DENICH (1989) und CLAUSING (1994) wird ein großer Teil (ca. 70 %) des Sekundärwaldes aus den Wurzelsprossen der ehemaligen Brachevegetation gebildet. Nur der geringste Teil ist samenbürtig. Das verdeutlicht die essentielle Funktion des Wurzelsystems [NEPSTAD ET AL. 1990].

Für die Bewirtschaftungsphase nach dem Brennen stellt die Asche eine gute Initialdüngung dar. Der Düngungseffekt der Asche ist jedoch nur von kurzer Dauer [EWEL 1986]. Aufgrund der bei Gräsern im Vergleich zu holzigen Arten kurzen Generationsintervalle dominieren bei gebrannten Flächen verschiedene Gräser so stark, dass diese während einer Bewirtschaftungsphase mehrfach beseitigt werden müssen [NYE & GREENLAND 1960; DE ROUW 1995; OLIVEIRA ET AL. 2000].

Nach den Forschungsergebnissen des in dieser Region arbeitenden Projektes SHIFT-Capoeira ist durch einen Verzicht auf die brennende Flächenvorbereitung

der o.g. Fruchtbarkeitsverlust vermeidbar [HÖLSCHER ET AL. 1997; VIEIRA 1996UHL ET AL. 1981; UHL 1987; UHL ET AL. 1988]. Beim Umstieg auf die sogenannte „slash-and-mulch"-Methode und dem damit verbundenen Verzicht auf das Brennen kann durch die Bewirtschaftung der organischen Substanz im Boden sogar eine Steigerung der Fruchtbarkeit und Ertragsfähigkeit erreicht werden [SCHÖNINGH 1985; THURSTON 1997; DENICH 1989; KORMAWA ET AL. 1999; CATTANIO ET AL. 2000, CATTANIO 2002]. Obwohl die Vorteile der Anwendung der Mulchwirtschaft in tropischen Agrarsystemen bereits lange bekannt sind, ist ihre Umsetzung bisher nur sporadisch in extensiven tropischen Ackerbausystemen zu finden [THURSTON 1994]. Gefällte Vegetation, die unzerkleinert auf den Kulturflächen verbleibt, erschwert den Zugang zu ihnen und ihre Bearbeitung. Dadurch bedingt hat die Mulchtechnik nur eine geringe Verbreitung erfahren. An der Vorteilhaftigkeit des Systems besteht jedoch kaum Zweifel [HÖLSCHER 1995; VIELHAUER ET AL. 2000], da eine Nachhaltigkeit der Bewirtschaftung bei intensivierter Nutzung unter Brandrodungsbewirtschaftung kaum erreichbar ist [WATTERS 1971; UHL ET AL. 1982; THURSTON 1994; DENICH ET AL. 2000]. Es muss also eine Zerkleinerung der gefällten Vegetation vorgenommen werden [THURSTON 1994; DENICH ET AL. 1998]. Die gemulchte Sekundärvegetation unterliegt dem natürlichen Zersetzungsprozess, der gerade für ligninhaltige Pflanzenteile über die Bewirtschaftungsperiode hinaus dauern kann [DENICH 1989]. Die natürliche mikrobielle Zersetzung des Materials findet schneller statt, wenn dieses vorher zerkleinert wurde, da die Oberfläche der Pflanzenteile und damit die Angriffsfläche für die Mikroorganismen entsprechend dem Aufbereitungsgrad der Pflanzen größer wird. Durch seine gleichmäßige Verteilung über der Fläche wird eine Bedeckung des Oberbodens erreicht, die gerade den Wiederaustrieb und das Keimen von Ungräsern wirkungsvoll verhindert [SCHÖNINGH 1985; THURSTON 1994]. Der Aufwand für das Hacken zur Beikrautbeseitigung der Flächen verringert sich auf etwa die Hälfte [OLIVEIRA ET AL. 2000]. Die im Oberboden gebundene Feuchtigkeit wird durch die geschlossene Mulchdecke vor Verdunstung geschützt und steht somit den Pflanzen zur Verfügung [WILSON & APAKA 1983 nach THURSTON 1994; DOS SANTOS 1987; SÁ ET AL. 1998a; JALOTA & PRIHAR 1998 nach ROSEMEYER 2000]. Starkregenereignisse führen auf den ungeschützten, gebrannten Flächen häufig zu Verschlammungen und Erosionserscheinungen. Dem wirkt die Mulchdecke

ebenfalls entgegen, da sie die Aufschlagsenergie der Regentropfen dämpft [DOS SANTOS 1987; EWEL 1986; THURSTON 1994]. Nach der Flächenräumung findet in der Regel mit dem Einsetzen der Regenfälle die Pflanzung der Kulturpflanzen statt [DENICH 1989]. Auch während der Regenperiode ist die Sonneneinstrahlung sehr intensiv und auf gebrannten Flächen erhöht sich die Temperatur im Saathorizont des Bodens auf Werte, die Keimlinge und Sämlinge schädigen können. Unter einer Mulchdecke werden die Temperaturen in den oberen Bodenschichten auf einem relativ niedrigeren Niveau konstanter gehalten und verhindern eine Schädigung oder negative Beeinträchtigung des Saat- und Pflanzgutes [EWEL 1986; LAVELLE 1987; UHL 1987; THURSTON 1994].

2.1.3.4 Vermeidung der Degradation landwirtschaftlich genutzter Flächen

Das Wurzelsystem der *Capoeira* genannten Bracheflächen stellt ein wichtiges Element der Sukzession der Sekundärvegetation dar. Nach Untersuchungen von DENICH (1989) werden alle Holzpflanzen und Großstauden einer rezenten Sekundärvegetation aus Stockausschlägen, Wurzelsprossen und Rhizomen gebildet. Das Zurückdrängen der krautartigen und baumartigen Pflanzenspezies durch verkürzte Bracheperioden, wiederholtes Brennen und mehrfache Jätung der holzigen Spezies führt zu einer Zerstörung des Wurzelsystems und Überwachsung der Flächen mit flachwurzelnden Grasarten [DENICH & KANASHIRO 1998; LEAL 2002], die zum Einen nicht in der Lage sind, ähnlich hohe Biomassen, wie holzige Arten zu akkumulieren, zum Anderen kein tiefreichendes Wurzelsystem besitzen. Damit können sie ausgewaschene Nährstoffe aus tieferen Bodenschichten nicht mehr zurückgewinnen [EWEL 1986; VIEIRA 1996; SOMMER 2000; SOMMER ET AL. 2000; LU ET AL. 2002]. Außerdem wird gerade die starke Zunahme von Ungräsern als primärer Faktor für die Aufgabe von landwirtschaftlichen Flächen angesehen [NYE & GREENLAND 1960; DUBOIS 1990; STAVER 1991; DE ROUW 1995; PICHÓN 1996]. Die zunehmende Dominanz der Gräser ist ebenfalls Indikator für eine Abnahme der Artenvielfalt [BAAR 1997], mit der wichtige regenerative Funktionen der Brachevegetation verloren gehen können [DENSLOW 1980; EWEL 1986]. Nach EWEL (1986) ist das Erhalten der Artenvielfalt allein kein Garant für nachhaltige Landbewirtschaftung, sollte aber bei der Konzipierung eines nachhaltigen Bewirtschaftungssystems unbedingt beachtet werden, da sie in der

Regel der exzessiven Ausbreitung von Schaderregern entgegenwirken kann.

2.1.3.5 Nährstoffproblematik bei der Mulchwirtschaft

Das Mulchverfahren liefert der Fläche über die reguläre Dauer der Bewirtschaftungsperiode die in der Mulchdecke gebundenen Nährstoffe zurück, die bei der Brandrodung verloren gehen würden. Die vorher aus den tieferen Bodenschichten durch die tiefreichenden Wurzelsysteme der Sekundärvegetation angesammelten Nährstoffe werden so den Kulturpflanzen zur Verfügung gestellt [SOMMER ET AL. 2000]. Der Zersetzungsprozess der Mulchdecke findet jedoch über einen längeren Zeitraum hinweg statt. Bei der Pflanzung der Kulturpflanze hat praktisch noch kein Zersetzungsprozess stattgefunden und dementsprechend gering ist die Nährstofffreisetzung aus der Mulchdecke. Daher muss die bei der Brandrodung durch die Asche erfolgte Initialdüngung nun durch Mineraldünger substituiert werden, um vergleichbare Erträge, vor allem in der Anfangsphase der Nutzung, zu erreichen [KATO, O.R. 1998; KATO, M.S.A. 1998; KATO ET AL. 1999]. Zusätzlich werden unter Umständen bei der Zersetzung von ligninhaltigem Pflanzenmaterial Nährstoffe vorübergehend immobilisiert, vor allem, wenn ein weites C:N-Verhältnis vorliegt. Die verstärkte Bildung von ligninzersetzenden Mikroorganismen erfordert zur Bildung der Mikrobenproteine Stickstoff, der damit der Kulturpflanze nicht zur Verfügung steht. Nach längerer Zeit der Zersetzung der Mulchdecke werden jedoch auch die immobilisierten Nährstoffe durch das Absterben der Mikroorganismen wieder freigesetzt und die Vorteile der Nährstoffnachlieferung aus der Mulchdecke offensichtlich [DA SILVA JR. ET AL. 1998, KATO, M.S.A. 1998, KATO ET AL. 1999].

2.1.3.6 Dynamik der Pflanzengesellschaften

Die Literatur berichtet über die Änderung der Pflanzengesellschaften unter verschiedenen Eingriffsregimes. Das bezieht sich sowohl auf die Eingriffe in die Pflanzengesellschaften im Primärwald, wie auch unter landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsbedingungen [DENSLOW 1980; EWEL 1980; UHL ET AL. 1982; UHL & JORDAN 1984; UHL 1987; EWEL 1986; KAUFFMAN 1991; STEININGER 2000 SCHOLZ 1991].

Nach UHL ET AL. (1982) geht die Umstellung von Waldflächen zu bewirtschafteten Ackerflächen mit einer drastischen Änderung der

Vegetationsstruktur einher. Diese beruht nicht nur auf den negativen Effekten des Brennens, sondern auch auf der ständigen Beikrautbeseitigung, die eine Verschiebung der Pflanzenkomposition weg von holzigen Pioniergehölzen zu grasigen Spezies bewirkt. Dieses wird hauptsächlich durch kurze Generationswechsel der grasigen Spezies begünstigt. Damit ist, gerade bei der oben angesprochenen möglichen Reduzierung der Beikrautbeseitigung, nach VOCKEL ET AL. (2000) mit der Umstellung der Bewirtschaftungsweise von Brandrodung hin zur Nicht-Brennenden Flächenvorbereitung auch eine Änderung der Pflanzenkomposition der bearbeiteten Flächen zu erwarten [UHL 1987]. Welche Effekte dieses langfristig auf die Ökologie und Ökonomie des Anbausystems haben wird, ist bislang nicht abzuschätzen. Es lässt sich aber eine Favorisierung holziger Spezies vermuten, die das Regenerationspotential der Flächen stärken könnten [UHL 1987]. Nach UHL (1987) bewirkt Beschattung eine erhebliche Verbesserung der Entwicklung von Bäumen auf Bracheflächen, vor allem aus Sämlingen, wobei grasige Spezies durch Beschattung eingedämmt werden. Hierbei ist als Beschattung auch durchaus eine kleinräumige Bodenbedeckung durch angehäuftes Astwerk und Blattwurf zu verstehen [UHL 1987]. Weiterhin kann eine Mulchdecke die Dominanz von konkurrierenden Gräsern wirksam zurückdrängen [LEAL 2002] und damit die Etablierung holziger Spezies ebenfalls stützen.

2.1.3.7 Flexibilisierung des Anbaus

Die traditionelle Abhängigkeit der Kleinbauern von einer Trockenperiode zur Flächenvorbereitung in der Brandrodungswirtschaft hat die Anbausequenz der Nutzpflanzen determiniert. Als Pflanze mit hohem Nährstoffanspruch wird in den frisch geräumten Boden Mais (*Zea mays*) gepflanzt. Als erste Kulturpflanze des Anbauzyklus profitiert dieser von den in der Asche gebundenen Nährstoffen. Der nach dem traditionellen Verfahren im letzten Dezemberdrittel gepflanzte Mais (vgl. Kapitel 2.1.3.1) räumt die Fläche in der Regel gegen Mitte Mai. Nach der Ernte des Maises werden traditionell Bohnen (*Vigna unguiculata*) gepflanzt, zeitgleich wird bereits der langsamwachsende Maniok gepflanzt. Maniok ist als relativ anspruchslose Kulturpflanze am ehesten in der Lage, mit den verbliebenen knappen Nährstoffen Ertrag aufzubauen. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für eine traditionelle Anbausequenz eines kleinbäuerlichen Anbausystems bei

Brandrodungswirtschaft.

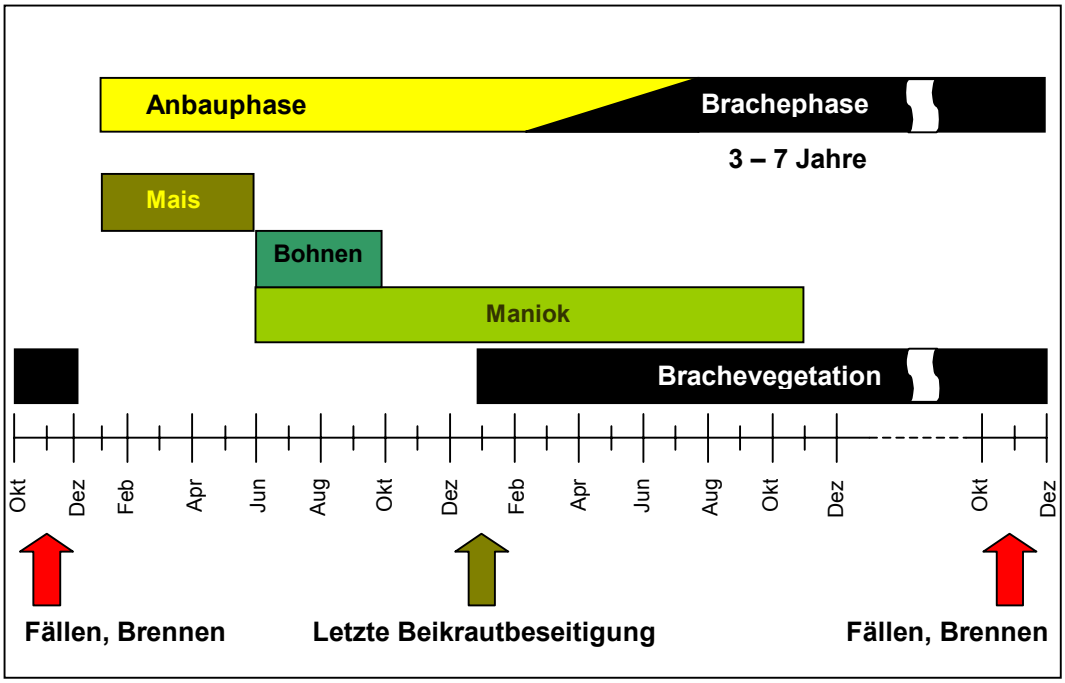


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Beispiels einer traditionellen Anbaureihenfolge eines Kleinbauern in der Brandrodungswirtschaft (nach DENICH ET AL. 1998)

Die starke Abhängigkeit von der Trockenzeit und fehlende Flexibilität der Anbaureihenfolge bedingt für den Kleinbauern ein mangelhaftes Reaktionsvermögen auf die Geschehnisse am Markt. Das resultiert in potentiell schlechteren Produktpreisen, sofern es sich um vermarktungsfähige Produkte handelt. Jedoch auch eine strategische Anbauplanung, die je nach den Erfordernissen den Anbau von Feldfrüchten zur Sicherung der eigenen Ernährung vorsieht, wie auch den Anbau von „Cash-Crops“ (z.B. Maracujá (Passionsfrucht), Pfeffer etc.) zur Erlangung von monetären Ressourcen [PICHÓN 1996] ist durch die mangelnde Flexibilität des Anbaus erschwert [VIELHAUER ET AL. 2000].

Die Abhängigkeit von der dem Brennen zwingend vorangehenden Trocknungsphase legt die Flächenvorbereitung für das brennende Verfahren auf den Zeitraum in der Trockenperiode des Jahres fest. Bei Anwendung des Mulchverfahrens besteht diese Abhängigkeit nicht und damit kann die nicht brennende Flächenvorbereitung bei Beibehaltung der traditionellen Anbausequenz bereits eine Verbesserung der Erzeugerpreise mit sich bringen, da das Angebot der jeweiligen Marktfrucht azyklisch erfolgen kann [VIELHAUER ET AL. 1998; DENICH ET AL. 2000; KATO ET AL. 2002]. Weiterhin können pflanzenspezifische

Wachstumsfaktoren stärker zur Berücksichtigung kommen. Einzelne Experimente des Projekts SHIFT-Capoeira haben ergeben, dass im Juli gepflanzter Mais vergleichsweise höhere Erträge bringen kann als traditionell im Januar gepflanzter Mais, da die Bewölkung geringer und damit die Solarstrahlung höher ist, als am Beginn der Regenzeit [KATO ET AL. 2002]. Als C4-Pflanze kann der Mais dies in Massenertrag umsetzen. Die Nachhaltigkeit dieser Methode muss jedoch aus phytosanitären Gründen zunächst noch angezweifelt werden [DENICH ET AL. 2004]. Aufgrund des Nährstoffbedarfs des Maises muss eine entsprechende Düngergabe einkalkuliert werden [KATO, M.S.A. 1998; KATO, O.R. 1998]. Die Nährstoffnachlieferung der Mulchdecke ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausreichend, um den vollständigen Bedarf des Maises abzudecken. Erst zum Ende der Bewirtschaftungsperiode ist die größte Nachlieferung an Nährstoffen aus der Mulchdecke zu erwarten (vgl. Kapitel 2.1.3.5). Dieses hat zu Überlegungen geführt, die traditionelle Anbaureihenfolge umzukehren, das sogenannte *reverse cropping* anzuwenden [VIELHAUER ET AL. 2000; DENICH ET AL. 2000]. Der anspruchslose Maniok wird traditionell am Ende der Bewirtschaftungsphase angebaut, wenn die Nährstoffe aus der Asche bereits aufgebraucht sind. Er könnte jedoch gleich zu Beginn angebaut werden, die Bohnen schließen sich an und der anspruchsvolle Mais würde zum Schluss angebaut, wenn die Nährstofflieferung aus der Mulchdecke am größten ist [KATO ET AL. 1999].

Um den sogenannten „Land-Use-Factor“ [JOOSTEN 1962 UND RUTHENBERG 1980, beide nach LANLY 1985] und damit das wirtschaftliche Potential einer Fläche zu erhöhen, wäre es denkbar, die Brachedauer zu verringern, bzw. die Dauer der Bewirtschaftung zu erhöhen und damit die Nutzung einer einzelnen Fläche zu intensivieren. Dieses wird bereits intuitiv von den Landwirten gemacht. Die genannten Probleme der abnehmenden Bodenfruchtbarkeit bei dieser Vorgehensweise könnten hierbei umgangen werden, wenn man mit der Anreicherung von Bracheflächen arbeitet, bei der schnellwachsende, tiefwurzelnde Baumarten in die bestehende Bracheфläche eingebracht werden. Diese bilden innerhalb sehr kurzer Zeit hohe Biomasseerträge mit einem entsprechenden Nährstoffgehalt. Aus der relativ höheren Biomassenachbildung können daher bei Verkürzung der Brachedauer zur herkömmlichen Brachedauer ohne Anreicherung vergleichbare Nährstoffmengen nachgeliefert werden [SÁ 1998b; BRIENZA JÚNIOR 1999; BRIENZA JÚNIOR ET AL. 2000; VIELHAUER ET AL.

2000; DENICH ET AL. 2000; MERTZ 2002].

Die mögliche Verlängerung der Nutzungsdauer beruht auf zwei Effekten. Die Dekomposition der Mulchdecke findet praktisch über den gesamten Zeitraum der normalen Bewirtschaftungsdauer von etwa zwei Jahren hin statt. Stark ligninhaltige Pflanzenteile sind jedoch teilweise noch unzersetzt vorhanden, die gebundenen Nährstoffe noch nicht an den Boden abgegeben worden. Bei Verlängerung der Nutzungsdauer werden auch diese genutzt. Die Nutzungsdauer ist jedoch nur begrenzt erweiterbar, da sonst letztlich auch in diesem System die Bodenfruchtbarkeit leiden könnte [WIESENMÜLLER 1999; KAYA & NAIR 2001]. Als zweiter Effekt wird der von NYE & GREENLAND (1960), STAVER (1991) und DE ROUW (1995) angesprochene, mit der Dauer der Bewirtschaftung zunehmende Ungrasdruck von vornherein durch die Bedeckung mit der Mulchdecke entschärft [VIELHAUER ET AL. 2000; OLIVEIRA ET AL. 2000]. Als weiterer positiver Effekt wird der Artenreichtum der Brachevegetation nicht negativ beeinflusst, wenn bestimmte Pflanzabstände der Anreicherungsbäume eingehalten werden.[WETZEL 1997].

2.1.3.8 Veränderung der Arbeitsbedingungen

Der Verzicht auf das Brennen der Sekundärvegetation stellt die einschneidenste Veränderung der Arbeitsbedingungen für den Kleinbauern dar. Das gefährliche und schwere Schlagen der Vegetation [PICHÓN 1996] entfällt genauso wie das riskante Brennen [SÁ ET AL. 1998b]. Bei Verzicht auf die Brandrodung bedeutet das zunächst einmal eine körperliche Erleichterung für den Kleinbauern, der im Gegenzug für diese Arbeit nun eine entsprechende finanzielle Leistung zu erbringen hat. Die kleinbäuerliche Landbewirtschaftung impliziert eine hohe Beteiligung von Familien-Arbeitskräften (Fam-AK). Jedoch auch in diesem System ist der Einsatz von Fremd-Arbeitskräften (Fremd-AK) durchaus üblich um Arbeitsspitzen zu brechen. Vor allem in der Rodungs- und Brandphase wird von vielen Kleinbauern entlohnte Fremd-AK eingesetzt.

Der Arbeitsaufwand für die Flächenräumung wird im Vergleich zur restlichen Pflege und Bewirtschaftung als der größte angesehen [PICHÓN 1996]. Die Rodung stellt jedoch nur den ersten Schritt in der Bewirtschaftung der Flächen dar und die Kleinbauern müssen ein ausgewogenes Verhältnis zwischen neu zu schaffenden und bereits bestehenden Ackerflächen erhalten, die sie auch durch die zur

Verfügung stehende Arbeitskraft bewirtschaften können [PICHÓN 1996]. Dabei ist es zunächst einmal unerheblich, ob es sich um Fam-AK oder Fremd-AK handelt. Der Kleinbauer muss seine Ressourcen so einschätzen, dass er zur Pflege und Beerntung seiner angebauten Feldfrüchte notwendige Arbeitskraft entweder durch Kapital (Fremd-AK) oder vorhandene Fam-AK abdecken kann. Dieses Gleichgewicht ist nicht immer gegeben, gerade dann, wenn die Flächenräumung einfacher ist, als die spätere Pflege und Bewirtschaftung [FEARNSIDE 1986 UND FEARNSIDE 1992 nach PICHÓN 1996]. Es besteht die Gefahr, dass für die Flächenräumung eingesetztes Kapital nicht sinnvoll angelegt ist, da die folgende Bewirtschaftung aufgrund fehleingeschätzter Ressourcen nicht in nötigem Umfange erfolgen kann.

2.2 Bisherige Mulchverfahren

Die Umsetzung der Mulchwirtschaft zur Nutzung ihrer positiven Effekte setzt das Vorhandensein eines praktikablen Verfahrens zur Mulchgewinnung voraus, das der relativen Knappheit des Faktors Arbeit der Kleinbauern Rechnung trägt. Die Flächen sollten von Hindernissen geräumt sein, die die nachfolgende Bearbeitung erschweren können. Dazu ist die Zerkleinerung der gefällten Sekundärvegetation unabdingbar.

Die rein manuelle Zerkleinerung der Vegetation mit Hilfe von Messern und Sicheln ist sehr arbeitsaufwändig. Sie bietet insoweit Vorteile, als der Investitionsbedarf für den Anwender praktisch gleich Null ist. Für die Bearbeitung größerer Flächeneinheiten, wie sie in der Region üblich sind, müssten jedoch zur Arbeitserledigung Fremdarbeitskräfte beschäftigt werden. Dieses stellt bei kurzfristiger Betrachtung einen komparativen Kostennachteil gegenüber der Brandrodung dar. Damit wird sich der Kleinbauer sehr wahrscheinlich für die weniger arbeitsintensive Brandrodung entscheiden.

Ein erster Schritt zur Mechanisierung der Materialzerkleinerung ist, ausgehend von der bereits gefällten Sekundärvegetation, der Einsatz einer traktorbetriebenen, stationären Häckselmaschine, wie sie zur Aufbereitung von Mais und Gras zu Viehfutter eingesetzt wird. Als Beispiel sei hier der Häcksler der Marke „Nogueira“ genannt.

Sowohl bei dem manuellen als auch bei dem stationären, mechanisierten

Verfahren muss die Vegetation manuell mit Messern und Sicheln oder motormanuell mit Kettensägen gefällt werden. Bei beiden Verfahren wird das Material in der Regel zu einem zentralen Häckselplatz transportiert, da dort meist Unterstände zum Schutz vor Sonne und Regen gebaut wurden. Das manuell oder maschinell zerkleinerte Material muss im Anschluss wieder möglichst homogen über der Fläche verteilt werden. Das sperrige, teilweise dornige Material wird also mehrfach transportiert, nachdem es bereits manuell gefällt wurde.

Einen Ansatz zur Mechanisierung des Fällens der Vegetation stellt der Einsatz eines Kreiselmulchers dar. Diese an einen Traktor angebaute Maschine, z.B. der Firma „Super Tatu“, arbeitet nach dem Prinzip eines Sichelmähers, bei dem auf einer vertikalen Achse ein starres Messer rotiert. Der Traktor überfährt zunächst die Vegetation, wodurch ein Teil der Pflanzen an den Boden gedrückt wird. Der nachgezogene Mulcher mäht die noch stehende Vegetation ab, bereitet sie jedoch nicht weiter auf. Dieses Verfahren ist jedoch nur in relativ schwachen Beständen mit sehr kurzer Brachedauer anwendbar, wo noch keine dickeren Stämme die Überfahrt des Traktors behindern und diese die relativ leicht gebaute Maschine beschädigen könnten. Die nachfolgende Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Zeitdauer und den Arbeitsaufwand der nicht brennenden Flächenräumung mit den herkömmlichen Verfahren.

Tabelle 2: Übersicht der Einsatzmöglichkeiten und Arbeitskapazitäten von verwendeten mechanisierten Flächenvorbereitungsverfahren [nach DENICH ET AL. 2004]

	Einheit	verwendeter Häckslertyp	
		stationärer Maishäcksler Nogueira	Kreiselmulcher Super Tatu
notwendige Motorleistung	[kW]	~ 30	50
Arbeitsbreite	[m]	-	1,20
mittlere Häckselleistung	[t Phytomasse/h]	0,25	4,50
Arbeitskraftbedarf	Akh/t	10	0,22
mittlerer spezifischer Kraftstoffverbrauch	[l/t Phytomasse]	6	1,30
maximaler Stammdurchmesser	[cm]	3-4	2
maximale Brachedauer der Fläche	[Jahre]	1-4	1-2
maximale Phytomasse der Fläche	[t/ha]	50	20

Akh= Arbeitskraftstunden

Da der Einsatz des Kreiselmulchers auf Flächen mit kurzer Brachedauer

beschränkt ist, kann dieses Verfahren, abgesehen von den weiteren Nachteilen, nicht als vollwertige Mechanisierungsoption der nicht brennenden Flächenvorbereitung angesehen werden. Der Arbeits- und Zeitaufwand des manuellen Verfahrens ist ein Vielfaches des Zeitaufwandes für die Brandrodung.
Außerdem ist beim teilmechanisierten Mulchverfahren mit dem stationären Häcksler bereits ein Investitionsbedarf vorhanden, der dem einzelnen Kleinbauern nur wenig oder gar keine Arbeitszeitersparnis im Vergleich zur Brandrodung bringt. Selbst wenn der Traktor und die Maschine auf Mietbasis zur Verfügung gestellt würden, wird die Vorzüglichkeit des Mulchsystems durch den hohen Arbeitsaufwand zusammen mit den Mietkosten für die Maschine für den Kleinbauern in Frage gestellt. Damit ist nicht sichergestellt, dass die Kleinbauern eine solche Technologie von sich aus langfristig anwenden würden.

2.3 Grundlagen der Maschinenentwicklung

Die Konzeption von speziell auf die Bedürfnisse brasilianischer Kleinbauern zugeschnittenen Maschinen erfordert zunächst Kenntnisse der Umwelt-bedingungen, unter denen sie zu arbeiten haben. Neben den klimatischen Bedingungen sind die Komposition und Struktur des zu bearbeitenden Materials von Bedeutung. Die von DENICH (1989), BAAR (1997) und weiteren Wissenschaftlern des Projektes SHIFT-Capoeira durchgeführten Analysen der Vegetationsstruktur genügen nicht allein den Ansprüchen, um auf deren Grundlage geeignete Maschinen zur Zerkleinerung von Sekundärvegetation entwickeln zu können. Gerade die Unterschiedlichkeit der Pflanzen-zusammensetzung und die Artenvielfalt in Kombination mit verschiedenen Wuchsformen und –größen stellen hohe Herausforderungen an die Konzeption einer geeigneten Maschine. Die in westeuropäischen Ländern gebräuchliche Agrartechnik arbeitet in der Regel unter homogeneren Bedingungen. Dieses gilt sowohl für die Bodenbearbeitungstechnik, die Pflegemaßnahmen wie auch die Erntetechnik. Diese Technologien sind daher nur bedingt auf die brasilianischen Verhältnisse übertragbar, da beispielsweise neben krautartigen Gewächsen und Gräsern gleichzeitig Baumstämme mit mehreren Zentimetern Durchmesser verarbeitet werden müssen. Die von WIESENMÜLLER (1999) beschriebenen aktuell verwendeten Verfahren der Flächenräumung bei Verzicht auf die Brandrodung

haben nach seinen Untersuchungen negative Effekte auf das Wurzelsystem der Capoeira.

2.3.1 Theorie des Schnittes

Der erste Schritt bei der mechanisierten Mulchtechnologie ist das Abtrennen der aufgewachsenen Vegetation von ihren Wurzelstümpfen oder Trieben, möglichst ohne das Wurzelsystem zu schädigen [DENICH ET AL. 1998; WIESENMÜLLER 1999].

PERSSON (1987) erklärt, dass die für den Schnitt des Materials bestimmenden Eigenschaften durch seine Widerstandsfähigkeit gegen Stauchung, Spannung, Biegung, Scherung sowie Dichte, Bruch und Adhäsion determiniert werden. Dies wird hauptsächlich durch den Pflanzentyp, das Alter, den Feuchtegehalt wie auch die zelluläre Struktur beeinflusst. Dieses muss insofern Berücksichtigung finden, als das Alter der zu fällenden Sekundärvegetation insgesamt wie auch in Einzelpflanzen variieren kann. Es stehen nach PERSSON (1987) ganz allgemein verschiedene Schneidwerkzeuge in unterschiedlicher Anordnung zur Auswahl, die für verschiedene Materialien optimal ausgewählt werden können. Dabei ist das Material des Schneidwerkzeuges ebenso zu berücksichtigen, wie auch die Ausführung und Anordnung der Schneide und Gegenschneide [DOBLER 1972]. Da sich die Brachevegetation aus verschiedensten Pflanzenarten mit verschiedensten Widerstandsfähigkeiten gegen die genannten mechanischen Beanspruchungen zusammensetzt, kann die Auswahl eines geeigneten Schneidwerkzeuges nicht in jeder Hinsicht optimal ausgestaltet sein. Die Optimierung kann jedoch zunächst nur experimentell erfolgen, da die Unterschiedlichkeit der Vegetation keine eindeutige Aussage über die voraussichtlich optimale Schneidwerkzeugform zulässt. Einige grundlegende Bedingungen können jedoch definiert werden.

Die Anwendung modernster Schneidverfahren wie z.B. Plasmaschneiden, Wasserstrahlschneiden oder Laserschneiden lässt sich zur Abtrennung von Sekundärvegetation, sofern überhaupt geeignet, nicht realisieren. Zum Einen ist davon auszugehen, dass die Brandgefahr bei Anwendung thermischer Schneidverfahren zu hohe Feuergefahr bei der Bearbeitung von Bracheflächen in sich bergen würde, zum Anderen ist die Anwendung von Hochtechnologie in technisch wenig entwickelten Regionen grundsätzlich problematisch, da die

fachgerechte Wartung eines solchen Schneidaggregats durch die lokalen Anwender praktisch unmöglich sein wird. Zur Auswahl eines geeigneten Schneidverfahrens verbleiben also nur die konventionellen Verfahren, die mit entsprechenden Schneidwerkzeugen arbeiten. Abbildung 2 zeigt eine Auswahl spanlos arbeitender Schneidverfahren und Werkzeuganordnungen für das Schneiden pflanzlichen Materials.

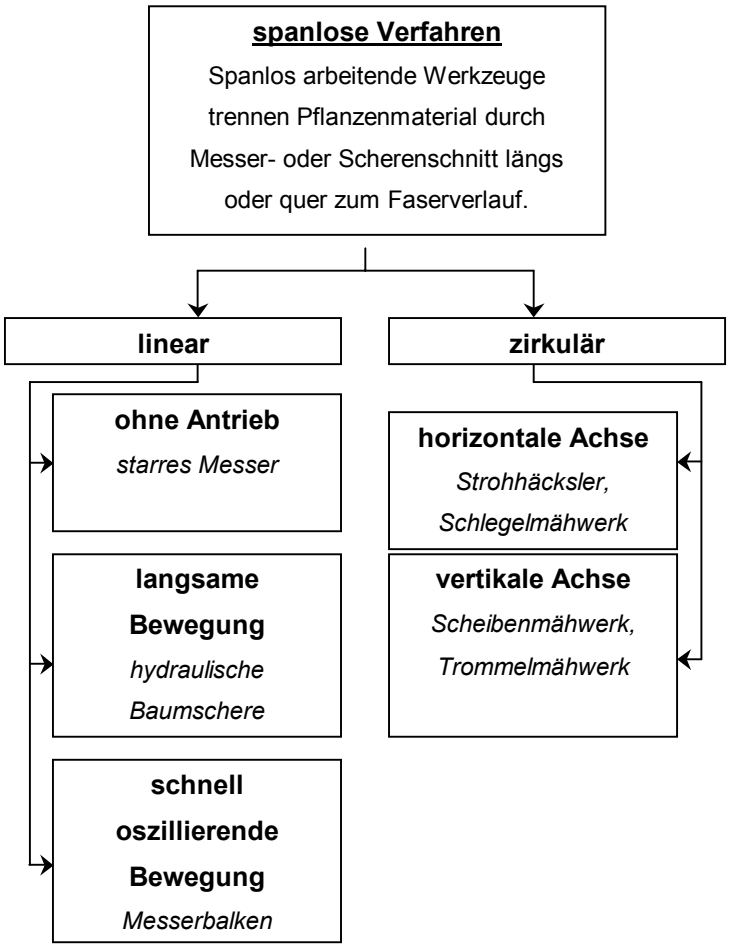


Abbildung 2: Auswahl von spanlosen Schneidverfahren und Werkzeuganordnungen für das Schneiden pflanzlichen Materials [NACH PERSSON (1987), ERWEITERT NACH BÄRISCH ET AL. 1982].

Bei einer Mechanisierung der Fällung der Vegetation kommen linear arbeitende Verfahren nicht in Frage. Starre Messer ohne Antrieb sind aufgrund der notwendigen Schnittgeschwindigkeiten in krautigem oder grasigem Material nicht einsetzbar [PERSSON 1987]. In einer kontinuierlich vorwärtsfahrenden Maschine können die spanlos arbeitenden, nicht-kontinuierlichen Verfahren, wie Scherenschnitte mit langsam arbeitenden Scheren, ebenfalls nicht eingesetzt werden, da das zu schneidende Material der Maschine schneller zugeführt würde,

als diese es trennen könnte. Weiterhin erläutern BÄRISCH ET AL. (1982), dass die erforderliche maximale Schnittkraft bei Scherenschnitten in Holz linear mit dem Durchmesser der Stämme ansteigt. Es nimmt mit einem Anstieg der Rohdichte von 1 % die maximale Schnittkraft um ca. 0,6 % zu. Der wesentliche Nachteil bei scherenden Schnitten in Holz sind nach BÄRISCH ET AL. (1982) der hohe Schnittkraftbedarf und die geringe Schnittqualität bei schlecht instandgesetzten Werkzeugen. Dabei kommt es zu Faserstauchungen, Rissbildungen und Splitterung des Holzes. Daher können auch kontinuierlich arbeitende scherenartige Schneidverfahren wie zum Beispiel Messerbalken mit schnell oszillierender Bewegung ausgeschlossen werden, da das Vorhandensein stärkerer, harter Baumarten von bis zu 10 cm Durchmesser den Einsatz eines solchen Schneidverfahrens nicht geeignet erscheinen lässt.

Die verbleibenden spanlosen Schneidverfahren mit zirkulär umlaufenden Werkzeugen können in Verfahren mit horizontaler und vertikaler Achse der Schneidwerkzeuge eingeteilt werden. PERSSON (1987) beschreibt Schneidwerke, die mit auf horizontaler oder vertikaler Achse angeordneten Werkzeugen arbeiten. Die Werkzeuge können je nach Umfangsgeschwindigkeit beweglich oder starr angeordnet sein. Es kann jedoch aufgrund der zu erwartenden Materialstärken in der Vegetation davon ausgegangen werden, dass gerade holzige Pflanzenteile mit den genannten Schneidverfahren nicht optimal abgetrennt werden können. Die Daten der o.a. Tabelle 2 für den Kreiselmulcher „Super Tatu“, der nach diesem Verfahren arbeitet, belegen dies.

Die folgende Abbildung 3 zeigt eine Auswahl spanender Schneidverfahren.

Die spanenden linearen Verfahren wie Gattersägen und Bandsägen werden überwiegend im stationären Einsatz verwendet. Zum Trennen holzigen Materials in mobilen Maschinen ist die Verwendung von Sägeblättern und Sägeketten ein Standardverfahren. Der Einsatz von Sägeketten verlangt jedoch den Einsatz in relativ erdstaubarmer Umgebung, wenn man hohe Standzeiten einer Sägekette erreichen will. Gerade in der brasilianischen Trockenperiode herrschen staubige Arbeitsbedingungen vor, die den Einsatz von Sägeketten nicht sinnvoll erscheinen lassen. Des weiteren ist bei dem bodennahen Abtrennen der Vegetation davon auszugehen, dass sich durch den Regen hochgespritzter Sand und Erde gerade an den unteren Teilen der Bäume abgelagert hat. Daher soll im folgenden nur auf die Verwendung von Sägeblättern eingegangen werden.

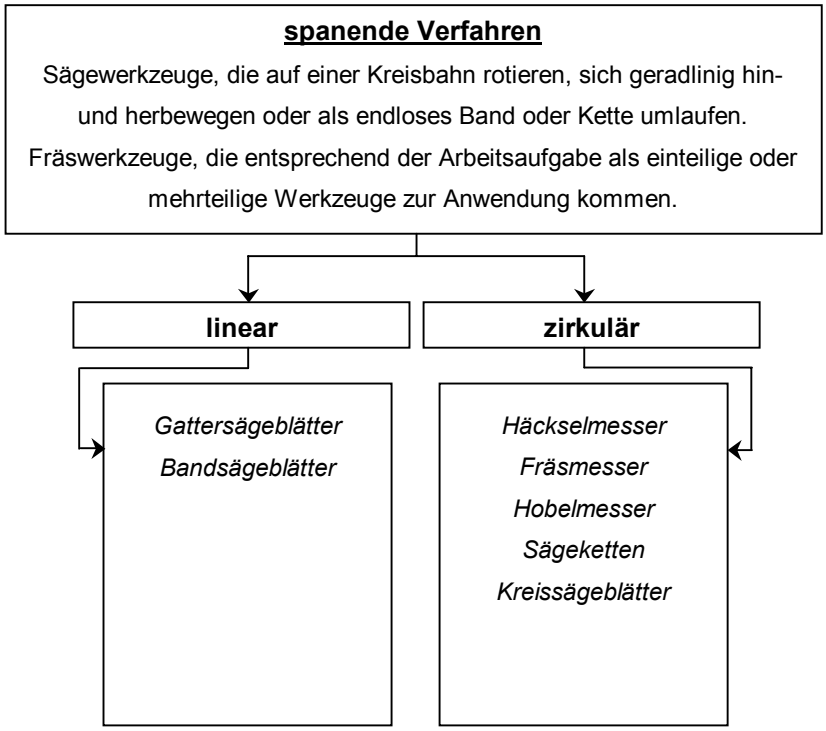


Abbildung 3: Auswahl von spanenden Schneidverfahren und Werkzeuganordnungen für das Schneiden pflanzlichen Materials [NACH PERSSON (1987), ERWEITERT NACH BÄRISCH ET AL. 1982].

HARZMANN (1988) verweist auf verschiedene Optima der Schnittgeschwindigkeit bei der Bearbeitung tropischer Hölzer in Abhängigkeit von der bearbeiteten Pflanzenspezies. Diese Optima sind jedoch im Einsatz in gemischt strukturierter Vegetation verschiedenster Spezies nicht realisierbar. Es muss daher eine Schnittgeschwindigkeit angestrebt werden, die einen Kompromiss darstellt und allen Anforderungen bestmöglich gerecht wird. Man kann aufgrund der bei Sägeblättern üblichen Schnittgeschwindigkeiten von 55 bis 75 m/s [BÄRISCH ET AL. 1982] davon ausgehen, dass auch grasiges und krautiges Material im freien Schnitt abgetrennt wird. Auch wenn TUCK (1976) [nach PERSSON 1987] die minimale Schnittgeschwindigkeit für den Schnitt von Gras mit Rotationsmähwerken mit etwa 70 m/s angibt, berichtet CHANCELLOR (1987) [nach PERSSON 1987] von mindestens 10 m/s, in Einzelfällen von 20 bis 25 m/s. Niedrigere Schnittgeschwindigkeiten können in Kauf genommen werden, wenn die Schnitthöhe reduziert wird. Selbst wenn die Schnittgeschwindigkeit für Sägeblätter konstruktiv an der von BÄRISCH ET AL. (1982) genannten unteren

Grenze von 55 m/s angesetzt sein sollte, kann nach diesen Daten immer noch von einem hinreichend sauberen Schnitt für grasiges und krautiges Material ausgegangen werden. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass die Zahl der Zähne auf dem Sägeblatt so gering sein sollte, dass auch bei höherer Schnittgeschwindigkeit das grasige Material noch zwischen die Zahnzwischenräume gelangen und geschnitten werden kann. Eine hohe Zahnzahl in Verbindung mit einer hohen Umfangsgeschwindigkeit des Sägeblattes kann dazu führen, dass das Zeitfenster zu klein wird, in dem der Grashalm von den Sägezähnen erfasst werden kann [BEHN 1998]. Die Drehzahl der Sägeblätter kann nicht frei gewählt werden, da besonders in hohen Drehzahlbereichen, abhängig von der Stärke der Blätter, Resonanzschwingungen auftreten können, die sich negativ auf die Stabilität der Sägeblätter auswirken [FELDE 1980, CHABRIER & MARTIN 1999, IORAS ET AL. 2002].

2.3.2 Theorie der Holzaufbereitung

GUSTAFSSON (1999) stellt heraus, dass Holz als anisotropes Material aufgrund seines natürlichen Ursprungs grundsätzlich hohe Variabilitäten innerhalb von Stichproben aufweist. Ein Prüfkörper kann deutlich verschieden sein von Proben, die aus demselben Material entnommen wurden. Des weiteren werden in der Regel die Proben bei der Bestimmung mechanischer Eigenschaften zerstört. Dieses muss grundsätzlich beachtet werden, wenn Messergebnisse der mechanischen Bearbeitung von Holz diskutiert werden.

Grundsätzlich stehen zur maschinellen Zerkleinerung oder Aufbereitung des Holzes mehrere Verfahren zur Verfügung. So nennt BRUSCHE (1983) die wesentlichen Hackertypen, die in Abbildung 4 dargestellt sind.

HAKKILA (1989) führt noch weitere, speziellere Häckslertypen auf, die hier jedoch nicht genannt werden sollen. Sowohl BRUSCHE (1983) als auch HAKKILA (1989) gehen auf den spezifischen Leistungsbedarf der verschiedenen Hackertypen ein, in dem der Schneckenhacker den relativ geringsten Leistungsbedarf bei der Verarbeitung von frischem holzigen Material hat. HAKKILA (1989) stellt darüber hinaus die Drehmomentverläufe an der Antriebswelle beim Hacken dar, die für den Schneckenhacker hohe Spitzen aufweisen. Durch die Anbringung einer Schwungscheibe konnten diese auf ein normales Maß reduziert werden. Er hebt

jedoch auch hervor, dass aufgrund der grundsätzlichen Unterschiedlichkeit des holzigen Materials keine genauen Aussagen zum Leistungsbedarf getroffen werden können. Trotzdem wird ein Zusammenhang zwischen der Höhe des Drehmoments am Antrieb, der Rohdichte des Holzes, des Feuchtegehaltes und des Durchmessers beschrieben. Innerhalb gewisser Grenzen kann der Steigerung des Drehmoments mit einer Steigerung der Rotationsenergie (Drehzahl) entgegengewirkt werden, was nach HAKKILA (1989) in der Reduktion der notwendigen Antriebsleistung resultiert.

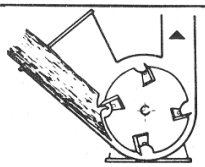
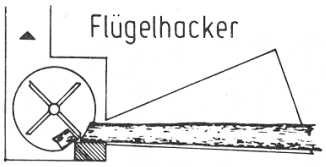
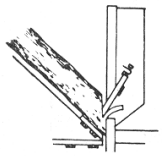
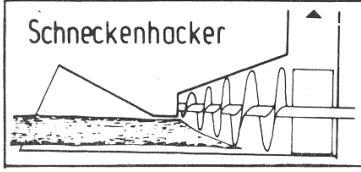
Hackerbauart	Messerzahl	Einzugart	max. Holzstärke [mm]	Hackschnitzel-größe [mm]
 Trommel-hacker	2 - 4	mit und ohne Zwangs-einzug	150 - 350	0,5 - 35
 Flügelhacker	4	mit und ohne Zwangs-einzug	100	90 - 150
 Scheibenhacker	2 - 4	mit und ohne Zwangs-einzug	150 - 350	0,5 - 35
 Schneckenhacker	Schnecke	selbst-einziehend	160	70 - 85

Abbildung 4: Bauarten von Holzhackern [BRUSCHE 1983]

Ein weiterer wesentlicher Faktor, der den Leistungsbedarf determiniert, ist die Größe der zu produzierenden Hackschnitzel. Je kleiner die Hackschnitzel sind, umso größer ist der Energieaufwand [BRUSCHE 1983, HAKKILA 1989]. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren kommen sowohl BRUSCHE (1983) als auch HAKKILA (1989) zu dem Ergebnis, dass ein Schneckenhacker bei der Bearbeitung frischen holzigen Materials bis zu einem Durchmesser von 10 cm der energetisch am wenigsten aufwändige Hackertyp ist. Die Konzeption des Schneckenhackers erlaubt außerdem eine relativ leichte Bauweise [HAKKILA 1989].

Je nach Verwendungszweck der Hackschnitzel werden verschiedene Größenfraktionen aus der Aufbereitung angestrebt. Um für die Mulchwirtschaft

möglichst schnell die in dem Pflanzengewebe gebundenen Nährstoffe verfügbar zu machen (vgl. Kapitel 2.1.3.3 und 2.1.3.5) wird eine schnelle Zersetzung angestrebt, was durch kleine Hackschnitzelgrößenfraktionen begünstigt wird. Nach BRUSCHE (1983) liefert ein Trommelhacker generell die feinsten und homogensten Hackschnitzelgrößen, ist jedoch energetisch sehr aufwändig. Die Verarbeitung von frischem Pflanzenmaterial bzw. Pflanzenmaterial hoher Feuchtegehalte erfolgt im Schneckenhacker am Besten.

2.3.3 Grundsätzliche Überlegungen zum Maschinendesign

Die in den Kapiteln 2.3.1 und 2.3.2 dargelegten Fakten müssen in die Konzeption einer leichtgewichtigen, robusten, wartungsarmen und kostengünstigen Maschine, die mit geringem Energieaufwand das Material zerkleinert, einbezogen werden. So ist ein Höchstmaß an Anpassung an die lokalen Verhältnisse Grundvoraussetzung für den nachhaltigen Einsatz der Maschine. Die klimatischen, bodengeologischen und botanischen Gegebenheiten müssen dabei ebenso Berücksichtigung finden, wie auch die soziokulturellen Aspekte. Durch den relativ geringen technischen Entwicklungsgrad der lokalen bäuerlichen Bevölkerung muss die Maschine zwangsläufig auf komplizierte hochtechnisierte Komponenten verzichten, die eine Durchschaubarkeit des Systems für den brasilianischen Kleinbauern nicht zuließen.

Aus diesen Notwendigkeiten lassen sich generelle Anforderungen an vollmechanisierte Mulchverfahren formulieren, die im Folgenden dargestellt werden.

Ein vollmechanisiertes Mulchverfahren muss die Sekundärvegetation fällen und zu Hackschnitzeln aufbereiten, welche dann auf der Fläche gleichmäßig verteilt werden. Das Abschneiden der aufgewachsenen Brachevegetation sollte möglichst bodennah geschehen, damit bei der späteren Bewirtschaftung der Fläche keine hohen Baumstümpfe die Pflege- und Erntearbeiten behindern. Sie sollte mit einem möglichst sauberen Schnitt abgetrennt werden, um Beschädigungen der im Boden verbleibenden Wurzelstöcke durch eindringende Schaderreger zu vermeiden und damit einen vitalen Wiederaustrieb der Brachevegetation in der nächsten Brachephase gewährleisten. Das so geschnittene Pflanzenmaterial sollte im selben Arbeitsgang durch die Maschine gehäckselt werden, um Transportwege auf der

Fläche zu einer separaten Häckselmaschine zu vermeiden. Das Häckseln selbst muss den schnellen mikrobiellen Aufschluss des gehäckselten Materials ermöglichen. Dieses muss danach möglichst gleichmäßig über die Arbeitsbreite der Maschine auf der Oberfläche verteilt werden, damit eine möglichst vollständige Bodenbedeckung erreicht wird.

Über die verfahrenstechnischen Anforderungen an ein vollmechanisiertes Mulchverfahren hinaus müssen die infrastrukturellen Bedingungen des jeweiligen Einsatzortes berücksichtigt werden. Kleinbauern mit potentiell schlechter oder völlig fehlender Schulbildung müssen die Funktionsweise der Maschine erfassen können. Es dürfen keine komplizierten Wartungsarbeiten beim Betrieb des Aggregates anfallen, die das technische Verständnis der Anwender übersteigen könnten. Aus Gründen des Bodenschutzes ist eine leichte Maschine vorteilhaft.

Zusammenfassend ist also eine leichte, robuste und technisch einfach aufgebaute Maschine anzustreben, die an die örtlichen Bedingungen der Versuchsregion angepasst ist und dort sowohl betrieben als auch gewartet werden kann. Sie soll die Vegetation bodennah in schonender Weise absägen und das Material für den schnellen mikrobiellen Aufschluss vorbereiten und gleichmäßig auf der Fläche verteilen.

3 Entwicklung des mechanisierten Mulchkonzepts

Die zur Verfügung stehende Arbeitskraft stellt für den Kleinbauern in der Regel den hauptsächlich limitierenden Faktor dar.

3.1 Arbeitsaufwand des Fällens und Brennens

Nach JÖNSSON (2000) beträgt der Arbeitsaufwand des manuellen Fällens von Sekundärvegetation zwischen 70 und 146 Stunden je Hektar, wobei der Aufwand mit zunehmender Phytotrockenmasse je Hektar ansteigt. Die Arbeit wird gewöhnlich in den frühen Morgenstunden begonnen und nachmittags aufgrund der hohen Temperaturen meist nicht mehr fortgesetzt. Dies bestätigt die üblichen Aussagen der lokal ansässigen Kleinbauern, dass ein Hektar etwa 12 bis 15 Manntage zur Fällung beansprucht. Zusätzlich wird der Arbeitszeitaufwand für das Brennen durch JÖNSSON (2000) mit etwa 4 Mannstunden „je Fläche" angesetzt. Die Größe der Fläche scheint eine untergeordnete Bedeutung zu haben, da in der Beobachtungsregion selten mehr als ein Hektar auf einmal gebrannt wird. Die sogenannte „*coivara*", das nachfolgende Brennen der übriggebliebenen Stämme und Stümpfe, wurde durch JÖNSSON nicht beobachtet und fand keine Berücksichtigung. Erfahrungen mit größeren Flächeneinheiten zeigen jedoch, dass mit zunehmender Flächengröße mehr Personal zur Überwachung und Eindämmung des Feuers bereitgehalten werden muss und mit zunehmender Stärke der Vegetation auch der Aufwand für die *coivara* steigt.

Zur Produktion von Mulch muss der Einsatz von Maschinen in Erwägung gezogen werden, der die Flächenvorbereitung beschleunigt und eine bereits zur Aussaat vorbereitete Fläche hinterlässt [DENICH ET AL. 1998; BLOCK 1999; DENICH ET AL. 2000]. Beim Einsatz eines ersten Häckslerprototypen im Herbst 1997 sind hier als Arbeitszeitbedarf zwischen 0,8 und 8 Stunden je Hektar, ebenfalls teilweise abhängig von der aufgewachsenen Phytotrockenmasse je Hektar, ermittelt worden [BLOCK ET AL. 1998].

3.2 Ökonomische Betrachtungen

Kleinbauern werden eine neue Technologie nur dann anwenden, wenn sie ökonomischen Nutzen gegenüber der traditionellen Methode verspricht. Erste Schätzungen des Kosten-Nutzen-Verhältnisses des Verzichts auf das Brennen

wurden bereits durch DA SILVA JR. ET AL. (1998) angestellt, in dem als Ergebnis die Mulchmethode nicht zwingend die finanziell ungünstigere Methode darstellen muss. Eine umfassendere Kosten-Nutzen-Analyse wurden durch DENICH ET AL. (2004) aufgestellt. Hier wird die Flächen- und Arbeitsproduktivität ausgewählter Szenarios der Mulchtechnologie dem traditionellen Brandrodungssystem gegenübergestellt. Es wurden nur die tatsächlich fließenden Geldströme erfasst. Nicht berücksichtigt wurde z.B. der Wert des Erhalts der Artenvielfalt, die Vermeidung der Emission von Treibhausgasen oder der Wert der in der Mulchdecke gebundenen Nährstoffe. Die Entlohnung der Familienarbeitskräfte wurde ebenfalls außer acht gelassen, da sich deren Entlohnung in der Regel aus dem Nettoerlös der Produktion eines jeden Systems ergibt.

Die durch Einsatz von Dünger und Verzicht auf Brandrodung gestiegenen Erträge führen zu einem höheren Umsatzerlös, dem die Kosten für den Einsatz von Kapital, Dünger, Fremdarbeitskräften, Anreicherungspflanzungen und Maschinenmiete gegenüberstehen. Der traditionellen Bewirtschaftungsweise („Slash-and-Burn"), die am wenigsten kapitalintensiv ist und nach dem Ansatz keinerlei Fremdarbeitskräfte benötigt, steht als ökonomisch bessere Variante die Mulchmethode mit verlängerter Nutzungsdauer gegenüber, wobei der Nettonutzen dem mehr als zwanzigfachen des gesetzlichen Mindestlohns je Hektar im Vergleich zum traditionellen Brandrodungssystem beträgt [DENICH ET AL. 2004].

Selbst der Vorwurf, der Einsatz der Maschine mache die landwirtschaftliche Lohnarbeitskraft überflüssig und führe zu Arbeitslosigkeit geringqualifizierter Landarbeiter, kann entkräftet werden. Die Rodung der Flächen, die traditionell den arbeitsintensivsten Schritt darstellt, wird zwar nun durch Maschinen substituiert. Der Maniok als integraler Bestandteil der Fruchtfolge wird allgemein sehr arbeitsaufwändig weiterverarbeitet. Die durch die Ertragssteigerung gestiegenen Maniokmengen binden nach ersten Schätzungen von DENICH ET AL. (2004) mehr Arbeitskräfte, als durch die Mechanisierung der Rodung freigesetzt werden. Im Gegensatz zur Rodung erfolgt die Maniokverarbeitung kontinuierlich über einen längeren Zeitraum, während die Rodung sich auf den o.g. Zeitraum von September bis November beschränkt. Damit werden Arbeitsspitzen vermieden [DENICH ET AL. 2004].

3.3 Hypothese

Die Vorteile des Mulchverfahrens gegenüber dem Brandrodungsverfahren sind hinreichend bekannt. Zu seiner nachhaltigen Umsetzung sind mechanisierte Verfahren notwendig, die den Kleinbauern ein Werkzeug für die arbeitssparende Mulchgewinnung bereitstellen.

In der vorliegenden Arbeit wurden mehrere Häckselkonzepte vergleichend getestet, wobei ein Hauptaugenmerk auch auf der Weiterentwicklung des im Institut für Agrartechnik in Göttingen entwickelten Gehölzmähhäckslers lag, der nach den oben formulierten Maßgaben konstruiert wurde. Die bereits kommerziell verfügbaren Häckselkonzepte wurden auf ihre Tauglichkeit und Einsatzfähigkeit unter den lokalen Bedingungen erprobt.

Die Zweckmäßigkeit des Einsatzes der vollmechanisierten Mulchverfahren unter den Bedingungen der Sekundärvegetation in Nord-Ost-Amazonien hängt direkt vom Funktionieren und der Leistung der Häckslerkonzepte ab.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, Aussagen zu Betriebscharakteristika und Arbeitsleistungen der Häckselmaschinen in Abhängigkeit von der zu häckselnden Vegetation zu treffen.

4 Material und Methoden

4.1 Studienregion

Die Untersuchungen wurden in der sogenannten *Zona Bragantina* im Nordosten des brasilianischen Bundesstaates Pará durchgeführt. Dort ist der ursprüngliche Regenwald bereits praktisch vollständig durch kleinbäuerliche Agrarsysteme ersetzt worden [DENICH & KANASHIRO 1993].

Abbildung 5: Lage der Untersuchungsregion in Nord-Brasilien

Die seit mehr als 120 Jahren besiedelte Region östlich der Hauptstadt Belém gilt als Musterbeispiel für die Vorgänge der Kolonisierung in Nord-Brasilien, die in der Bragantina durch den Bau der Eisenbahnlinie Belém-Bragança noch beschleunigt wurde. Zunächst ausgehend von den größeren Städten, dann auch entlang der Eisenbahnlinie und später im Binnenland, dem sogenannten *Interior*, wurde die Entwaldung der Regenwaldflächen und ihre Umwandlung zu agrarisch genutzten Flächen vorgenommen [EGLER 1961 nach DENICH & KANASHIRO 1993]. Das Bild der Landschaft ist geprägt durch die *Capoeira* genannte Sekundärvegetation. Der Primärwald ist nur noch in wenigen kleinräumigen Schutzgebieten vorhanden.

4.1.1 Geografische Lage

Die im Kartenausschnitt in Abbildung 6 gezeigte Untersuchungsregion liegt im von den Punkten Süd 0° 58'43,0", W 47°26'00" und Süd 01°38'52", W 48° 42'28" begrenzten Rechteck. Es umfasst den Großraum Belém bis zum Munizip Barcarena westlich von Belém, das Munizip Santa Isabel, Castanhal, Igarapé-Açú, das östlich von Castanhal liegt, sowie das Munizip Marapanim nördlich von Igarapé-Açú. Der Schwerpunkt der Tätigkeiten liegt im Großraum um die Kleinstadt Igarapé-Açú.

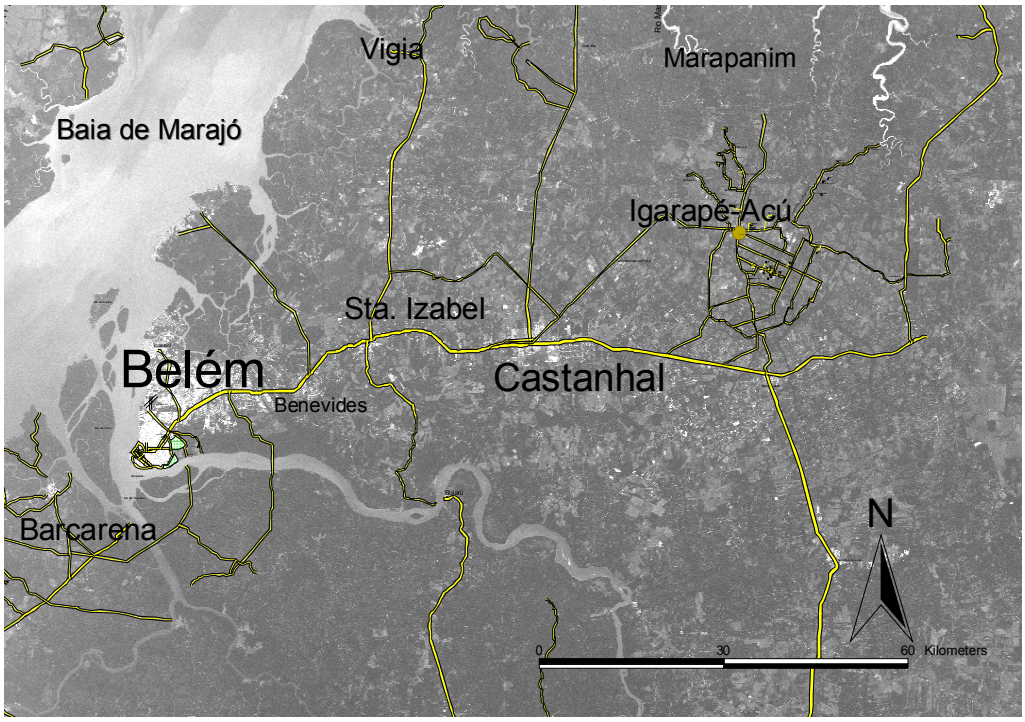


Abbildung 6: Satellitenbild mit den wichtigsten Straßenverbindungen der Untersuchungsregion

4.1.2 Klima

In der Zona Bragantina herrscht ein humides Klima mit einer ausgeprägten Trockenzeit von September bis Dezember und einem jährlichen Niederschlag zwischen 1700 und 2700 mm mit einem langjährigen Mittel von 2400 mm [SOMMER 2000; WICKEL 2003]. Das Monatsmittel der regenreichsten Monate (Januar bis Mai) beträgt 331 mm [WICKEL 2003]. Weiterhin kommt es häufig zu Starkregenereignissen. Ein Höchstwert wurde von WICKEL (2003) mit über 42 mm/h erfasst. Die maximale tägliche Niederschlagssumme wurde im März mit

84,4 mm gemessen [WICKEL 2003]. Aufgrund dieser Daten kann man davon ausgehen, dass es trotz des relativ flachen Bodenreliefs zu Rinnenerosion des Oberbodens kommen kann.
Die mittlere jährliche Temperatur beträgt 25 bis 27 °C wobei die Extremtemperaturen für 2001 zwischen 16,49 °C (16. Oktober) und 36,11 °C (21. Dezember) lagen [WICKEL 2003].

4.1.3 Boden

Die Bragantina-Region ist geomorphologisch durch ein flaches bis leicht hügeliges Bodenrelief mit Erhebungen zwischen 30 bis 70 m über Seehöhe gekennzeichnet. Die Sedimente bestehen aus Verwitterungsprodukten von Granit, Gneis und Sandstein der Guyanischen und Brasilianischen Kontinentalplatte, die während des Tertiär und Quartär abgelagert wurden. Die ältesten Sedimentschichten sind marine Sedimente der miozänen Pirabas-Formation. In den meisten Fällen ist sie von der pleistozänen Pará-Formation und/oder der pliozänen Barreiras-Formation überlagert [ACKERMANN 1964; PUTZER 1968; BEURLEN 1970]. Auf diesen Sedimenten haben sich die tropischen Böden der Bragantina entwickelt und sind daher überwiegend als Oxisols (Ustoxs oder Udoxs), jedoch auch als Ultisols und Entisols (Psamments) einzustufen. Nach der brasilianischen Bodensystematik entspricht dies den Latossolos Amarelos, Podzolicos Amarelos und Areias Quartzosas [VIERA ET AL. 1967; REGO ET AL. 1993; EMBRAPA 1999]. Die Böden werden lokal überwiegend als "Terra Firme" angesprochen, was sie als außerhalb von Überschwemmungsgebieten liegend charakterisiert. Aufgrund konstant tropischer klimatologischer Bedingungen und der langen, ungestörten Entwicklungsgeschichte der Böden sind diese tiefgründig verwittert und ausgewaschen mit in der Regel niedrigen Nährstoffgehalten in den obersten 20 cm des Bodens [VIERA ET AL. 1967; BAENA ET AL. 1998; SOMMER 2000].

4.1.4 Vegetation

Die potentielle natürliche Vegetation (PNV) des Staates Pará ist ein halbimmergrüner bis immergrüner tropischer Regenwald. Heute ist durch die

Besiedlung der größte Teil der PNV verändert worden. Die Auswertung von Satellitenbildern des Landsat von 1991 durch WATRIN (1994) hat für Igarapé-Açú eine Flächendeckung mit Primärwald von ca. 5 % ergeben. METZGER (1997) hat auf der Grundlage von Landsatbildern von 1996 einen Anteil von ca. 10 % errechnet. Die Unterschiede ergeben sich, wie auch in anderen Quellen angegeben, aufgrund der Schwierigkeit der Trennung von Primärvegetation und alter Sekundärvegetation [FEARNSIDE 1993; PICHÓN 1996; NEPSTAD ET AL. 1999]. Nach einer 1995 durchgeführten Erhebung des IBGE[2] (1997) sind ca. 58 % der Fläche des Munizips Igarapé-Açú von Primär- und Sekundärwald bedeckt. 36 % der Landfläche unterliegen der temporären oder permanenten Nutzung mit einjährigen (Mais, Reis, Bohnen, Maniok) oder mehrjährigen Kulturen (Passionsfrucht, Pfeffer, Ölpalmen, Zitrusfrüchte) oder Waldanpflanzungen.

4.1.5 Landwirtschaft in der Zona Bragantina

Die Zona Bragantina wurde bereits Mitte des 19. Jahrhunderts durch europäische Einwanderer besiedelt. Jedoch auch Siedler aus Nord-Ost-Brasilien, die der großen Dürrekatastrophe von 1877-79 zu entkommen suchten, bilden heute einen wesentlichen Bestandteil der Bevölkerung. Anfang des 20. Jahrhunderts kamen, finanziell unterstützt durch ihre Regierung, auch japanische Siedler nach Brasilien und haben sich in der Bragantina zunächst in geschlossenen Kolonien angesiedelt. Ein Beispiel dafür ist die Stadt Tomé-Açú.

Es wird also seit mehr als 120 Jahren in der Bragantina Landwirtschaft betrieben. Sie hat sich zu einer der wichtigsten Agrarlandschaften in Nordost-Pará entwickelt, in der nach Schätzungen von DENICH (1996) auf ca. 20.000 km² etwa 19 % der landwirtschaftlichen Wertschöpfung des Staates Pará erfolgen. Das bedeutet z.B., dass 44 % der Maniok-, 68 % der Passionsfrucht- (Maracujá-) und 18 % der Maisproduktion in dem Großraum der ehemalig größer gefassten *Zona Bragantina* erfolgen, die gegenüber der heutigen Mikroregion Bragantina zusätzlich den Großraum Belém und Salgado mit einschließt. Die kleinbäuerliche Familienlandwirtschaft mit weniger als 100 ha Fläche überwiegt hier in den meisten Fällen. Im Munizip Igarapé-Açú wurden nach IBGE (1997) 96 % der

[2] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatistica

Landbesitzungen von Kleinbauern mit 56 % der Landfläche bewirtschaftet.

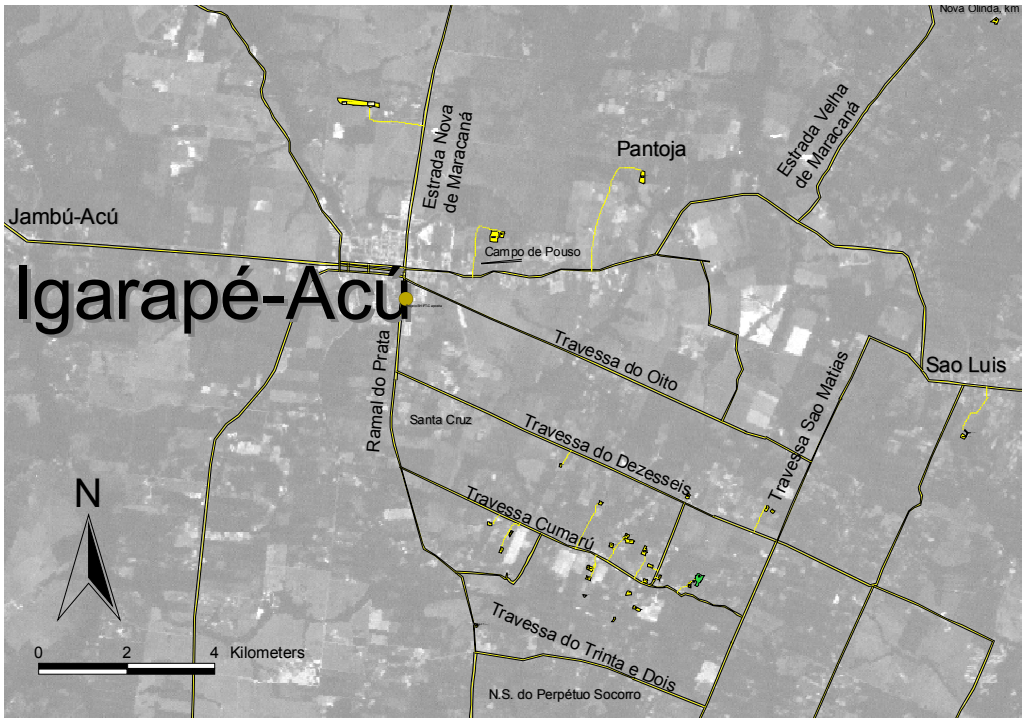


Abbildung 7: Satellitenbild der Kleinstadt Igarapé-Açú mit dem Netz der wichtigsten Straßenverbindungen

Die Kleinbauern praktizieren überwiegend die Wald-Feld-Wechselwirtschaft. Es haben in den letzten Jahren jedoch auch die mehrjährigen, in Plantagen angebauten Früchte (Maracujá, Pfeffer) erheblich an Bedeutung gewonnen. Die Pflanzung von Ölpalmen und Pfeffer im großen Stil wird aufgrund des notwendigen Kapitals zur Erstellung großer Einheiten ausschließlich durch kapitalkräftigere Bauern mit größerer Flächenausstattung vorgenommen.

4.1.6 Versuchsflächen

Bei den bearbeiteten Versuchsflächen handelt es sich fast ausschließlich um von Kleinbauern bewirtschaftete Flächeneinheiten von etwa 1000 bis 100.000 m² Größe. Nur wenige der Flächen sind vom Projekt SHIFT zu Versuchszwecken gepachtet worden. Es wurde also unter praxisnahen Bedingungen gearbeitet. Das Gros der Versuchsflächen liegt im Umkreis von 20 km um die Kleinstadt Igarapé-Açú. Hierzu gehören auch Flächen, die nicht mehr zum Munizip Igarapé-Açú gehören, sondern bereits zum benachbarten, nördlich gelegenen Marapanim.

Weiterhin wurden im Munizip Barcarena in der Gemeinde Vai-Quem-Quer Bracheflächen bearbeitet.

4.1.6.1 Auswahlkriterien

Es wurde zunächst eine Erhebung der potentiell verfügbaren Flächen durchgeführt. Hierbei war das Alter der Brachevegetation, bzw. die Brachedauer ein Kriterium zur Vorauswahl. Das Alter der Brachevegetation ist nur schwierig zu bestimmen, nicht zuletzt, weil die Aussagen der Bewirtschafter bezüglich der Brachedauer häufig widersprüchlich sind. Trotzdem ist die hilfsweise Charakterisierung einer Fläche über ihre Brachedauer ein unter Kleinbauern übliches Merkmal, das zumindest ansatzweise die Verhältnisse der Fläche beschreibt. Als unabhängige Variable „Alter“ fließt dieser Wert daher auch in die Beschreibung der bearbeiteten Flächen mit ein. Innerhalb der so ausgewählten Flächen wurde eine Auswahl im Hinblick auf die Tauglichkeit zur maschinellen Bearbeitung vorgenommen. Die Flächen, die durch besonders ungleichmäßigen Wuchs der Sekundärvegetation, wie das zum Beispiel bei stark degradierten Flächen der Fall ist, auffielen, wurden von der Bearbeitung ausgenommen, da hier die weiter unten angesprochene Methode der Phytomassebestimmung vermutlich zu hohen Fehlern in der Schätzung der tatsächlichen Phytomasse geführt hätte. Genauso wurden Bracheflächen mit einer offensichtlich sehr alten Sekundärvegetation oder hohem Anteil an Residuen aus der Brandrodung (alte Baumstämme, Baumstümpfe) so weit wie möglich ausgelassen. Eine starke Zerfurchung der Bodenoberfläche durch Gräben oder Löcher, wie sie immer wieder bei der Jagd nach Gürteltieren hinterlassen werden, haben, sofern vorher festgestellt, ebenfalls zum Ausschluss von der Bearbeitung geführt. Sollten im Zuge der Flächenauswahl solche Hindernisse nicht erkannt worden sein, so wurde dies durch die statistisch auswertbare Variable „Hindernis“ gekennzeichnet, indem sie den Wert „1“ annimmt. Einer Fläche ohne solche Hindernisse wird für die Variable der Wert „0“ zugewiesen.

Der Fahrer des Traktors hat während der Bearbeitung einer dichten Sekundärvegetation eine Vielzahl von Steuerungs- und Überwachungsaufgaben zu bewältigen. Aufgrund der angesprochenen Verhältnisse muss der Fahrer sowohl die Beschaffenheit der Vegetation als auch die der Bodenoberfläche ständig beobachten und ggf. auf Veränderungen schnell reagieren. Je mehr

Flächen durch einen Fahrer bearbeitet wurden, umso größer ist sein Vermögen, auf kritische Situationen automatisch richtig zu reagieren. Dieser antrainierte Automatismus ermöglicht dem Fahrer die Konzentration auf die äußeren Einflüsse und damit eine vermutlich höhere Arbeitsleistung. Gleichzeitig führt der steigende Grad der Erfahrung jedoch zu einer stärkeren Differenzierung bei der Flächenauswahl, da der Fahrer die Vegetation und ihre Bearbeitbarkeit einzuschätzen lernt. Aus diesem Grund wird die Erfahrung des Fahrers in der Datenaufnahme mit der unabhängigen Variablen „Erfahrung“ gekennzeichnet. Der Wert der Variablen „Erfahrung“ steigt mit der Zahl der bearbeiteten Flächen. So erhält sie z.B. für die zehnte durch den Fahrer bearbeitete Fläche den Wert 10.

4.1.6.2 Beschreibung der Versuchsflächen

Die so getroffene Vorauswahl der Flächen grenzt die Verfälschung der Arbeitsleistung der Häckselmaschinen durch Hindernisse bei der Bearbeitung weitestgehend ein. Die Flächeneigenschaften werden durch mehrere Parameter einer Stichprobenauswahl charakterisiert. Die Parameter werden im folgenden aufgeführt.

4.1.6.2.1 Vegetation

Zur Beschreibung der floristischen Komposition der Flächen wurden alle aus einer Parzelle entnommen Pflanzen bestimmt. Weiterhin wurde an jeder Pflanze der Durchmesser an der Stammbasis gemessen. Bei stark unrundem, elliptischem Querschnitt (z.B. bei *Phenakospermum guyanense*) wurde der jeweils größte und kleinste Durchmesser gemessen, wobei im Folgenden der größere Durchmesser mit „Durchmesser 1“, der kleinere mit „Durchmesser 2“ bezeichnet wird. Aus den beiden Werten wird der mittlere Durchmesser errechnet. Sollte nur ein Durchmesser vorliegen (bei kreisrundem Querschnitt der Pflanze), so wird dieser als Mittelwert der Pflanze angenommen.

Die in den Parzellen an den Pflanzen gemessenen Durchmesser werden in Durchmesserklassen eingeteilt. Die jeweiligen Anteile einer Durchmesserklasse an der erfassten Pflanzenzahl kann so für verschiedene Flächen vergleichbar dargestellt werden. Die kleinste Durchmesserklasse ist dabei die „<= 2 cm“, die größte „> 10 cm“. Die Intervallgrenzen der Klassen dazwischen liegen in 0,5 cm-

Abständen, wodurch sich 18 Durchmesserklassen ergeben.

Die Schnittfläche einer jeden Pflanze wird bei kreisrundem Querschnitt bzw. bei Vorliegen nur eines Wertes für den Durchmesser nach der Formel für eine Kreisfläche errechnet. Wenn für eine Pflanze zwei Durchmesserwerte erfasst wurden, so wird die Schnittfläche nach der Formel der Fläche einer Ellipse errechnet.

Die Höhe der Pflanze wurde von der Schnittfläche bis zum obersten Blatt der liegenden Pflanze gemessen. Aus der gemessenen Höhe wird in Verbindung mit der errechneten Schnittfläche ein näherungsweise ermitteltes Volumen der gesamten Pflanze errechnet. Dabei wird die Pflanze als zylindrischer Körper betrachtet.

In Verbindung mit der unten beschriebenen Raumdichte des Holzes der Pflanzen wird aus dem Volumen und der Dichte eine theoretische Masse der Einzelpflanze errechnet.

Aufgrund der Identifikation der Pflanzenspezies konnte im nachhinein eine Zuordnung der Wuchsform zu der jeweilig untersuchten Pflanze erfolgen. Bei den Pflanzen wird zwischen „grasartigen“ und „krautartigen“ sowie „Bäumen“, „Lianen“, „Palmen“ und „Sträuchern“ unterschieden.

4.1.6.2.2 Phytomasseerhebung vor der Bearbeitung

Als entscheidendes Kriterium zur Beschreibung der Sekundärvegetation einer Bracheﬂäche wird die oberirdisch aufgewachsenen Pflanzenmasse angenommen. Sie reflektiert bis zu einem gewissen Maße das Alter der Vegetation. Zur Bestimmung der oberirdischen Phytomasse einer Versuchsfläche wurden je Hektar in der Regel zwölf repräsentative Parzellen von 4-10 m² Größe markiert, aus denen sämtliche Pflanzen mit einem Durchmesser von mehr als 1 mm entnommen wurden. Die Pflanzenteile wurden nach folgenden Kriterien klassifiziert:

- Stamm mit Rinde
- dünneres Astwerk
- Blattwerk
- Lianen

Eine Besonderheit in dieser Klassifizierung stellt die Klasse *Lianen* dar. Während die übrigen Klassen wegen ihrer verschiedenen Trockensubstanzgehalte eingeteilt

wurden, kann der Massenanteil an Lianen ein weiteres Kriterium zur Beschreibung des Flächenzustandes bzw. der Vegetationskomposition sein. Die Klassen wurden einzeln verwogen und die Trockenmasse der einzelnen Komponenten bestimmt. Dafür wurde für jede Parzelle aus jeder Klasse eine Probe von etwa 400 g entnommen, die bis zur Gewichtskonstanz im Trockenschrank bei 65 °C getrocknet wurde. Alle Angaben in dieser Arbeit werden jedoch als Frischmasse ausgewiesen.

4.1.6.2.3 Holzdichte

Das Maß für die Holzdichte, welches den besten Bezug zur Biomasse herstellt, ist nach FEARNSIDE (1997) die *basic density*, die Raumdichte [HARZMANN 1988, SIMPSON 1993, AGUIAR 2002]. Diese wird, wie in Gleichung 1 dargestellt, errechnet.

$$\text{Raumdichte}\,[\text{g/cm}^3]\ \rho = \frac{m_{Trocken}}{V_{gesättigt}} \qquad \text{Gleichung 1}$$

Darin sind

$m_{Trocken}$ = Trockenmasse der Holzprobe (absolut trocken)
$V_{gesättigt}$ = wassergesättigtes Volumen der Holzprobe

Nach FEARNSIDE (1997) gibt diese Art der Dichteberechnung nur bedingt die tatsächliche, in Natura angetroffene Dichte wieder, da der Wassergehalt abhängig vom Standort, der Jahreszeit und dem physiologischen Zustand der Pflanzen stark variiert. Der Einfluss des Standortes auf die Raumdichte wird ebenfalls durch LIMA ET AL. (2000) bestätigt, der Untersuchungen an Eukalyptus-Klonpflanzen durchgeführt hat, wie auch durch DEWALT ET AL. (2000) und STÅHL (1988). Obwohl in dieser Untersuchung selbst unter den genetisch gleichen Individuen noch Schwankungen in der Raumdichte auf dem gleichen Standort festgestellt wurden, soll sie hier trotz der Heterogenität der Vegetationsstruktur und der Unterschiedlichkeit der nicht näher bestimmten Standortbedingungen als Maß herangezogen werden, da nach ETTELT (1997) die Dichte als Hauptfaktor des Bearbeitungswiderstandes einzuordnen ist. Obwohl der ermittelte Wert der Raumdichte für die jeweils angesprochene Spezies nur eine Momentaufnahme der durchgeführten Untersuchung darstellt, ist der von der Spezies zu erwartende

Bearbeitungswiderstand in die Gesamtheit der untersuchten Pflanzenspezies einzuordnen. Nach RAYMOND & MUNERI (2001) repräsentiert die Dichte an der Stammbasis zu einem mittelmäßigen bis hohen Grad die Dichte des gesamten Baumes. Daher wurde zur Bestimmung der Dichte der bearbeiteten Spezies Muster dieser Spezies aus zwei verschiedenen Flächen entnommen. Aus der Stammbasis wurde ein etwa 5 cm langes Stück Stamm herausgesägt und in 30 prozentige Alkohollösung eingelegt. Zersetzungsprozesse während des Transports und der Lagerung bis zum Zeitpunkt der Analyse können so unterbunden werden. Durch diese Verfahren wurden die Proben bereits mit Wasser aufgesättigt. Im Labor wurde das Volumen der wassergesättigten Probe gemessen und diese wurde danach bis auf 0 % Wassergehalt getrocknet. Der Quotient aus der Masse der absolut trockenen Probe und dem Volumen der gesättigten Probe ergibt nach Gleichung 1 die Raumdichte.
HARZMANN (1988) gibt für die Werte der Raumdichte die in Tabelle 3 aufgeführte Interpretation an.

Tabelle 3: Interpretation für Werte der Raumdichte von Holz (nach HARZMANN 1988)

geringe Dichte	<0,400 g/cm³
ziemlich geringe Dichte	0,401 – 0,500 g/cm³
mittelmäßige Dichte	0,501 – 0,600 g/cm³
ziemlich hohe Dichte	0,601 – 0,700 g/cm³
hohe Dichte	> 0,701 g/cm³

Nach HARZMANN (1988) ist die Dichte mehr als andere Kenndaten geeignet, die große Variationsbreite der Strukturen der tropischen Hölzer eindringlich zu demonstrieren. Während in gemäßigten Klimazonen Rohdichten von ρ=0,40 g/cm³ bis ρ=0,80 g/cm³ erreicht werden, füllt die Variationsbreite der bei tropischen Hölzern vorkommenden Rohdichten das ganze überhaupt mögliche Intervall zwischen 0 und 1,5 g/cm³ (Reindichte der porenfreien Holzsubstanz) fast völlig aus. Es ist ganz allgemein bei tropischen Hölzern eine höhere Dichte, als bei Hölzern gemäßigter Klimazonen zu erwarten [HARZMANN 1988].

4.1.6.2.4 Flächengröße

Zur Ermittlung der Flächengröße wurde bei der Bearbeitung mit Hilfe eines

Garmin GPS 12CX-GPS-Empfängers der zurückgelegte Weg des Traktors aufgezeichnet. Die so registrierten Daten wurden mit Hilfe des Mobilcomputers ausgelesen und in ein Geo-Informationssystem (GIS) importiert. Mit Hilfe des GIS wurden die zurückgelegten Wegstrecken des Traktors zu einer Flächenkarte verdichtet und das System errechnete danach die Größe der bearbeiteten Fläche. Zur Kontrolle wurden die ersten zehn Flächen zusätzlich manuell mindestens zweimal mit einem Maßband vermessen. Das Ergebnis der Vermessung mit dem GPS-Empfänger lag hierbei jeweils zwischen den beiden manuellen Messergebnissen. Außerdem machte die oft verwinkelte Flächenbeschaffenheit eine exakte manuelle Vermessung schwierig. Daher wurde bei den weiteren Flächen auf eine manuelle Vermessung verzichtet.

4.1.6.2.5 Phytomasseerhebung nach der Bearbeitung

Bei einem kleinen Teil der Flächen war es aufgrund von Saat- und Pflanzterminen in Kombination mit sehr kurzem Vorlauf zur Flächenvorbereitung nicht mehr möglich, die umfassende Erhebung der oberirdisch aufgewachsenen Phytomasse durchzuführen. Ersatzweise wurde ein näherungsweises Verfahren zur groben Abschätzung der Phytomasse der Fläche angewendet.
Unter einem zufällig ausgewählten Quadrat von exakt einem Quadratmeter Größe wurde die gesamte gehäckselte Pflanzenmasse aufgesammelt, von Erdbestandteilen getrennt und bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen. Bei mehrfacher Wiederholung mit einer Zufallsauswahl des Beprobungsortes konnte so die gehäckselte Pflanzentrockenmasse je Hektar abgeschätzt werden. Eine Erhebung der im Kapitel 4.1.6.2.1 erläuterten Strukturmerkmale konnte mit diesem Verfahren nicht erfolgen.

4.1.6.3 Begriffe der Flächenbeschreibung

Die zur Flächenbeschreibung verwendeten Begriffe werden im Folgenden noch einmal zusammenfassend dargestellt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Begriffe im dargestellten Sinne verwendet.

Tabelle 4: Begriffsdefinition der Flächenbeschreibung

Merkmale der Vegetation	mittlerer Pflanzendurchmesser mittlere Pflanzenhöhe Pflanzenzahl je Hektar Spezies Wuchsform Dichte der Pflanzenspezies Phytomasse der Fläche
Kombinierte Merkmale der Vegetation	mittleres Volumen der Einzelpflanze mittlere Masse der Einzelpflanze
Einflussfaktoren	Hindernisse in der Fläche Erfahrung des Fahrers Alter der Brachevegetation

Die Zusammenfassung der Merkmale, kombinierten Merkmale und Einflussfaktoren zur Beschreibung einer Bearbeitungsfläche wird im Folgenden als „Struktur der Fläche“ oder „Flächenstruktur“ bezeichnet.

4.2 Maschinen

Es wurden zwei von der Konstruktion her verschiedene Maschinen eingesetzt. Dabei handelt es sich um die nachfolgend beschriebenen Doppelrotorhacker und den ebenfalls beschriebenen Forstmulcher AHWI FM 600 und AHWI UZM 580.

4.2.1 Doppelrotorhacker

Die in Kapitel 2.3.3 formulierten Anforderungen an ein vollmechanisiertes Mulchverfahren sind bei der Konzeption des speziell für den Einsatz in der Sekundärvegetation konzipierten Doppelrotorhackers zu beachten.

4.2.1.1 Fäll- oder Trennvorrichtung

Die Auswahl der Fäll- und Trennvorrichtung für die Sekundärvegetation wird hauptsächlich durch die Präsenz holzigen Materials größeren Durchmessers bestimmt. Es kann unter diesen Voraussetzungen praktisch nur mit Sägetechnik gearbeitet werden, da im freien Schnitt des holzigen Materials das Wurzelsystem nicht beschädigt werden darf. Bei der Auswahl geeigneter Sägeblätter ist zu berücksichtigen, dass die Arbeit bodennah in potentiell staubiger Umgebung erfolgt. Dieses beeinflusst die Auswahl geeigneter Materialien für Sägeblätter und

-zähne. Ziel ist eine hohe Standzeit bei guter Wartungsfähigkeit zu erreichen. Weitere Trennvorrichtungen, beispielsweise an den Seiten der Maschine zur Trennung von verhaktem Material, sind nicht vorgesehen.

4.2.1.2 Antriebskonzept

Der einfachste denkbare Antrieb einer Holzhackmaschine besteht aus Wellen und/ oder Riemen. Hydraulische Komponenten, die nur bei relativ aufwändiger Wartung gute Betriebssicherheit gewährleisten, sind nicht geeignet unter einfachen Verhältnissen fachgerecht gewartet zu werden. Trotzdem sollen sie hier diskutiert werden.

Nach den von BLOCK (1999) geschilderten Erfahrungen müssen bei einem Keilriemenantrieb der Häckselmaschine unbedingt die hohen Außentemperaturen wie auch die starke Sonneneinstrahlung Berücksichtigung finden. Die Erhitzung eines für europäische Verhältnisse berechneten Keilriemenantriebs wird während des Betriebs unter mitteleuropäischen Verhältnissen in der Regel durch die relativ niedrigere Außentemperatur in Grenzen gehalten. Unter den klimatischen Bedingungen in Nord-Ost-Amazonien ist die Temperaturdifferenz jedoch geringer, die Kühlung ist weniger effizient. Verschärfend kommt hinzu, dass die Sonneneinstrahlung Abdeckungen und Gehäuseteile erheblich stärker aufheizt, als das in Mitteleuropa der Fall ist. Dieses muss bei der Auslegung eines Riemenantriebs für eine hoch drehmomentbelastete Häckselmaschine berücksichtigt werden.

Eine weitere Möglichkeit ist der Antrieb über hydraulische Motoren. Dieser erfordert neben der oben angesprochenen aufwändigen Wartung noch effizientere Vorrichtungen zur Kühlung des Systems. Bei maximalen Wirkungsgraden von ca. 60 % müssen 40 % der eingesetzten Energie als Verlustwärme aus dem System abgeführt werden. Bei einem angenommenen Leistungsbedarf von 100 kW muss die anfallende Abwärme von 60 kW unter klimatisch ungünstigen Verhältnissen durch ein entsprechend aufwändiges Kühlsystem abgeführt werden. Weiterhin erfordert die geringere Effizienz der Drehmomentübertragung eine höhere Motorleistung des Antriebsaggregates, um die o.a. Verluste im System auszugleichen und eine ähnliche Leistung am Häckselaggregat bereitzustellen. Dieses führte auch zu einem relativ höheren Energieverbrauch für die gleiche Häckselleistung mit mechanischer Drehmomentübertragung. Aus diesem Grund

wird für die Maschine ein mechanischer Antrieb bevorzugt.

4.2.1.3 Aufbereitungspfad

Aufgrund der leichten Bauweise und des geringen spezifischen Energiebedarfs sowie der relativ guten Verarbeitung von frischem Material ist der Schneckenhacker anderen Systemen vorzuziehen (vgl. Kapitel 2.3.2). Zur Aufbereitung des Materials bis zu einem Grad, der eine voraussichtlich genügend schnelle Dekomposition zulässt, müssen jedoch Nachzerkleinerungseinrichtungen vorgesehen werden, die den Leistungsbedarf etwas erhöhen. Die aufgrund des großen Durchmessers der Häckseltrommel und der weiteren konstruktiven Merkmale praktisch nicht vorhandene Wickelneigung des Schneckenhackers [WIENEKE 1957] ist bei den Verhältnissen in der tropischen Sekundärvegetation mit ihren Lianen und Schlingpflanzen besonders positiv zu bewerten.

4.2.1.4 Konzeption des Doppelrotorhackers

Die bereits 1996 entwickelte und 1997 erstmalig eingesetzte Tritucap 1 ist auf der Basis eines Pappelerntehäckslers entwickelt worden, der 1992 zur Beerntung von Pappeln und Weiden aus Kurzumtriebsplantagen erfolgreich eingesetzt wurde. Dieser einrotorige Schneckenhäcksler ist durch ein Sägeblatt an der Basis des Rotors sowie oberhalb angeordnete angeschärfte Schneckengänge gekennzeichnet. Für den Einsatz in der Sekundärvegetation Nord-Ost-Amazoniens muss der Häcksler reihenunabhängig über die volle Traktorbreite das Material absägen und häckseln können. Durch die Abdeckung der gesamten Traktorbreite kann die Maschine auch in dichtester Vegetation eingesetzt werden, ohne dass der Traktor die noch nicht bearbeitete Vegetation überfahren müsste.

4.2.1.5 Funktion

Bei der Bearbeitung führt die Fronthydraulik des Traktors den Häcksler dicht über der Bodenoberfläche entlang, die Frontzapfwelle treibt die Häckselrotoren an. Der mit einem stufenlos regelbaren hydraulischen Kriechgang ausgestattete Traktor fährt beim Häckseln mit einer Geschwindigkeit von 0- 1,5 km/h (0-0,42 m/s). Das an der Rotorbasis angebrachte Sägeblatt sägt die Bäume ab, die, unterstützt durch auf dem Sägeblatt aufgeschraubte Mitnehmerplatten, zur Gegenschneide an der Gehäuseaußenkante gefördert werden. Die selbstschärfende Häckselschnecke

klemmt den abgesägten Stamm zwischen den Schneckengängen und der Gegenschneide fest, wobei durch die konische Form der Häckselschnecke aus dem Stamm von unten beginnend Hackschnitzel aus dem stehenden Stamm herausgeschält werden, deren Länge dem Abstand der Schneckengänge zueinander entspricht.

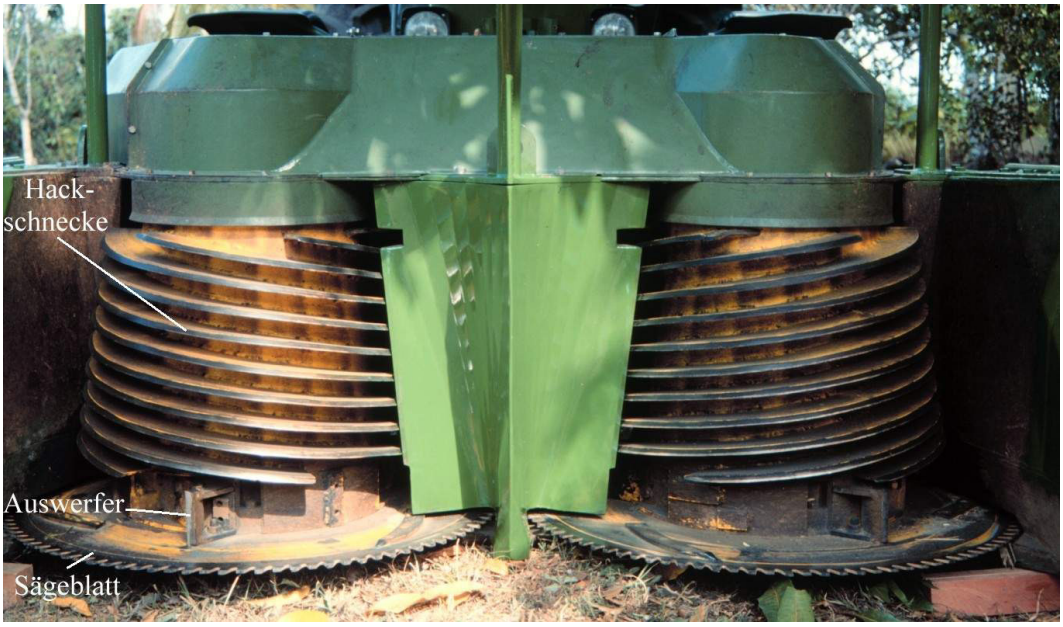


Abbildung 8: Tritucap 1, Vorderansicht

Der Stamm wird dadurch von unten in die Maschine eingezogen und komplett grob zerspant. Die Hackschnitzel werden durch die zwischen Sägeblatt und Häckselschnecke angebrachten Auswerferhaken an der Gehäuseaußenkante zum Auswurf an der Rückseite der Maschine gefördert.

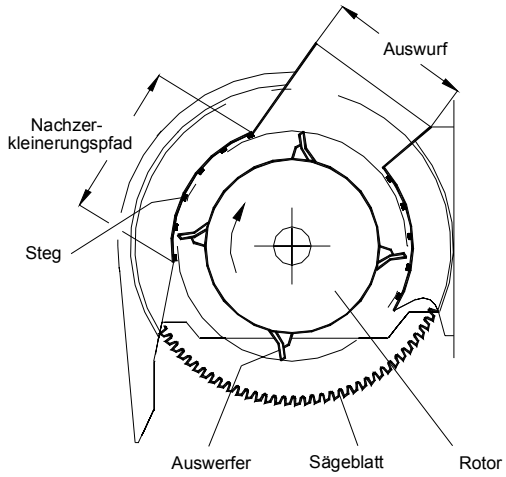


Abbildung 9: Konzeption von Aufbereitungspfad und Auswurfbereich der Tritucap

Dabei streichen sie in geringem Abstand an den in Abbildung 9 abgebildeten

eingeschweißten Querstegen entlang, die den Gutstrom bremsen und eine weitere Materialaufbereitung bewirken. Das so aufbereitete Material wird aus dem Auswurf der Maschine gefördert und vor den Traktorvorderreifen auf dem Boden als Mulchdecke abgelegt.

4.2.1.6 Entwicklung

Die bereits 1997 durchgeführten Versuche mit dem ersten Prototyp haben die Funktionsfähigkeit des Häckslerprinzips belegt. Während dieser Erprobungsphase haben sich konstruktive Schwachpunkte gezeigt, die zum Teil vor Ort noch behoben werden konnten [BLOCK 1999]. Genaueres wird in den folgenden Kapiteln erörtert.

4.2.1.6.1 Tritucap, Version 1.0

Die Maschine hat eine Arbeitsbreite von 2,0 m bei einer Gesamtmasse von ca. 1.200 kg. Da die Erprobung und Entwicklung des Prototypen in Deutschland vorgenommen werden musste, konnten Besonderheiten der brasilianischen Vegetations- und Klimaverhältnisse nicht hinreichend berücksichtigt werden. Dies führte dazu, dass in den Tests in Brasilien sowohl der Materialeinzug als auch der Rotorantrieb Funktionsschwächen zeigte. Die Geometrie des Materialeinzugs konnte noch vor Ort so geändert werden, dass die Funktion gewährleistet werden konnte. Auch der Querschnitt des Materialauswurfes konnte noch geringfügig vergrößert werden, wodurch die Verstopfungsneigung am Auswurf reduziert werden konnte. Abbildung 10 zeigt eine schematische Darstellung der Konzeption der Antriebskomponenten in der Draufsicht. Die Rotordrehzahl beträgt bei 1000 UPM an der Zapfwelle 880 UPM (Übersetzungsverhältnis 1:0,88), die Umfangsgeschwindigkeit an den Zahnspitzen der Sägeblätter 46 m/s. Die Leistungsübertragung wurde durch drei Keilriemensätze mit jeweils vier Keilriemen realisiert. Jedes dieser Keilriemenpakete hatte eine theoretische Übertragungsleistung von 74 kW. Die verwendeten Riemenantriebe neigen besonders bei hoher Belastung stark zu Schlupf. Die daraus resultierende Erwärmung der Riemen verstärkte die Schlupfneigung. Das führte bei längerem Einsatz zur Beschädigung der Riemenpakete [BLOCK 1999].

Die auf der Maschine angebrachten Bügel zur Stützung des abgesägten Materials waren offensichtlich zu niedrig. Abgesägte Bäume kippten über die Bügel hinweg

aus der Maschine heraus und konnten dem Häckselvorgang nicht mehr zugeführt werden.

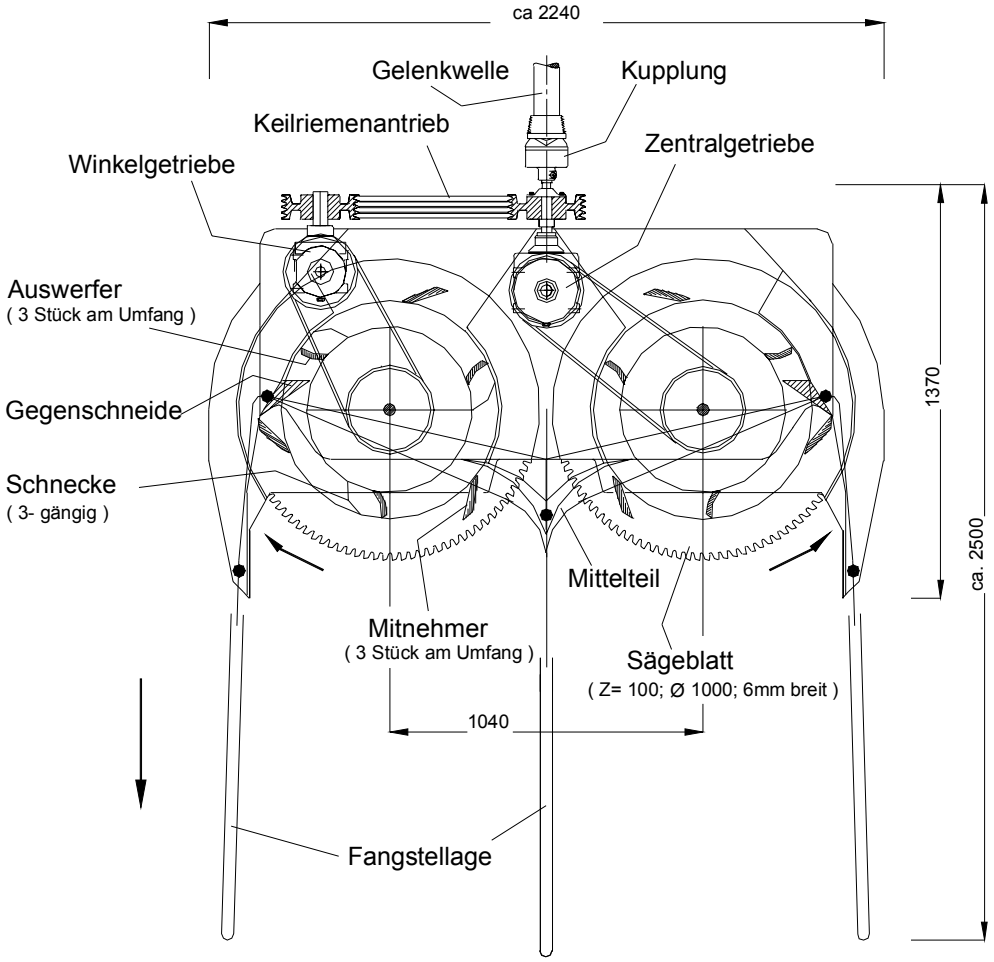


Abbildung 10: Tritucap 1.0- Draufsicht - Konzeption der Antriebs- und Häckselkomponenten

Die Arbeit in Bodennähe führte dazu, dass sich im Gehäuse der Maschine im Durchlauf der Sägeblätter Erde ablagerte, die den Durchlauf zunehmend verengte und sich nach kurzer Zeit soweit aufgebaut hatte, dass die Sägeblätter an der Erde entlangschleiften, was zu einer rapiden Abstumpfung der Sägezähne führte. Außerdem bildete sich nach kurzer Zeit eine Schicht festgebrannten Pflanzensaftes auf den Sägeblättern, was Ausdruck der Erhitzung während der Arbeit war. Diese Erhitzung wird vermutlich einen negativen Einfluss auf die Standzeit der Sägeblätter gehabt haben.

4.2.1.6.2 Tritucap, Version 1.1

Im Frühjahr 1999 wurden die in den Feldtests 1997 gewonnenen Erkenntnisse zur

Modifikation der Maschine genutzt. In die Seitenteile der Maschine wurden in Höhe der Sägeblätter Schlitze eingearbeitet. In die Maschine gelangte Erde wird so gleich wieder aus der Maschine herausgefördert. Die Führungsbügel auf der Oberseite der Maschine wurden um das 1,5-fache nach oben verlängert. Die Tendenz zum Umstürzen höherer abgesägter Bäume wurde damit beseitigt. Ein Hauptaugenmerk lag jedoch auf der Veränderung der Leistungsübertragung. Der Keilriemenantrieb wurde durch Zahnriemen ersetzt. Dieses verbessert insgesamt das Durchzugsvermögen der Maschine beim Häckseln, kann aber auch zu Überlastungen der Getriebekomponenten aufgrund kurzzeitig auftretender, hoher Drehmomente führen. Die Zahnriemen ersetzten die auf Abbildung 10 gezeigte Anordnung der Keilriemen. An der Anordnung wurden keine Änderungen vorgenommen.

4.2.1.6.3 Tritucap, Version 1.2

In der Version 1.2 der Tritucap wurde zur Erleichterung der Wartung und Ersatzteilbeschaffung das Getriebekonzept völlig neu überarbeitet.

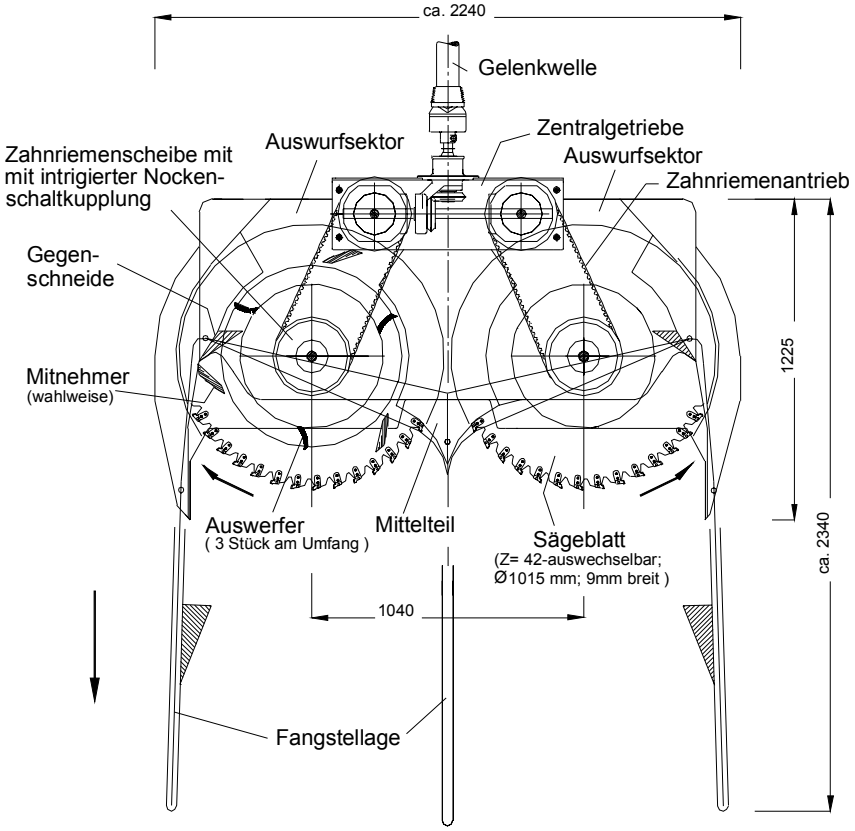


Abbildung 11: Tritucap 1.2- Draufsicht der Konzeption der Antriebs- und Häckselkomponenten

Statt Zahnriemen dreier verschiedener Längen wurden nun nur noch zwei Zahnriemen mit einheitlicher Länge eingesetzt. Die einzeln angebrachten Winkelgetriebe wurden in einer Zentralgetriebeeinheit zusammengefasst. Weiterhin wurde der Antriebsstrang durch Sicherungskupplungen der Firma GKN-Walterscheid abgesichert. Die auf 2.500 Nm Auslösemoment eingestellten Nockenschaltkupplungen wurden in die Riemenscheiben der Abtriebe des Zentralgetriebes eingebaut. Die vorstehende Abbildung 11 zeigt die Konzeption in der Draufsicht. Bei Auftreten eines Drehmoments höher als 2.500 Nm löst die Nockenschaltkupplung des jeweiligen Rotors aus und die Maschine muss zum erneuten Einkuppeln angehalten werden. Die nachstehende Abbildung 12 zeigt die Maschine in der Seitenansicht. Sie hat in dieser Version nun eine Gesamtmasse von ca. 1.300 kg. Die Getriebeübersetzung ist 1:1, was bei 1.000 Umdrehungen der Zapfwelle in einer Umfangsgeschwindigkeit von 52,5 m/s an den Zahnspitzen der Sägeblätter resultiert. Von der Firma Felde (Remscheid) entwickelte Sägeblätter mit einzeln austauschbaren Sägezähnen und sogenannten Räumschneiden ersetzten die vormals eingesetzten Sägeblätter. Dehnungsfugen auf dem Umfang ermöglichen die spannungsfreie Wärmeausdehnung des Materials bei Erhitzung der Sägeblätter.

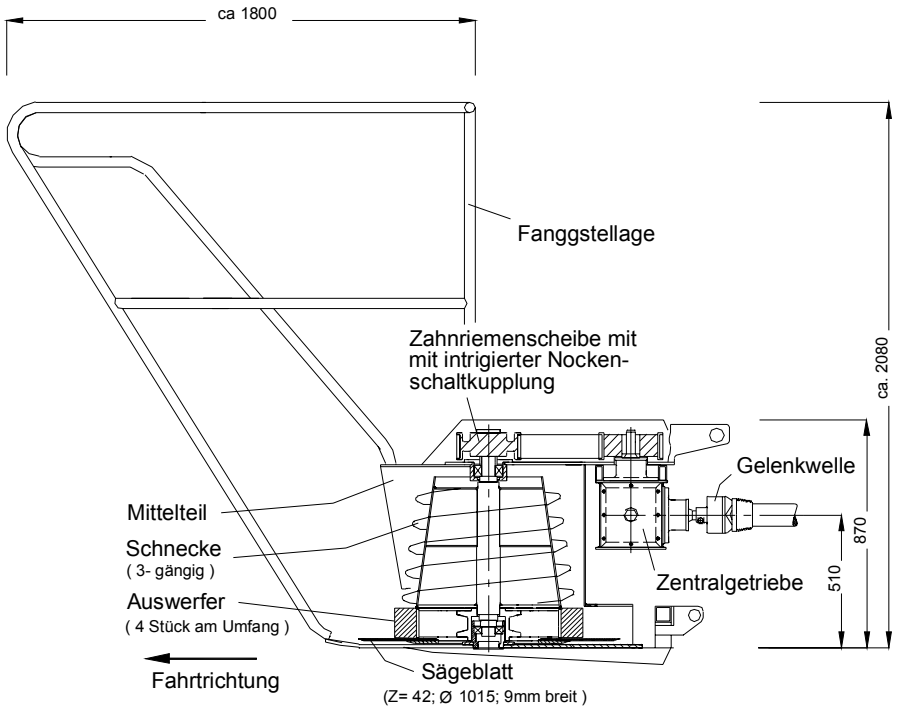


Abbildung 12: Tritucap 1.2- Seitenansicht und Maße

Sowohl das Material der Zähne als auch ihre Bauform wurde in zwei Varianten

eingesetzt. Ein Vollzahn mit positivem Schneidwinkel (5°) aus Stellit sowie ein Formzahn mit positivem Schneidwinkel (5°) aus Hartmetall wurden alternierend auf dem Umfang des Sägeblattes eingesetzt. Damit haben alle Zähne eines Sägeblattes unabhängig von der Maschinenseite gleiche Arbeitsbedingungen, was Aussagen auf die Verschleißeigenschaften der Materialien ermöglichen sollte.

4.2.2 Tritucap 2

In Version 2.0 des Gehölzmähhäckslers wurde ein völlig geändertes Antriebskonzept realisiert, das nicht mehr auf Keil- oder Zahnriemen beruht, sondern auf Wellen. In Abbildung 13 ist die Anordnung der Antriebskomponenten dargestellt. Die Gesamtmasse ist aufgrund der größeren Arbeitsbreite sowie der zusätzlichen Getriebekomponenten auf 1.800 kg angestiegen. Die Umfangsgeschwindigkeit an den Sägezahnspitzen beträgt aufgrund des vergrößerten Rotordurchmessers nun 62,8 m/s bei einer Zapfwellendrehzahl von 1.000 Umdrehungen pro Minute.

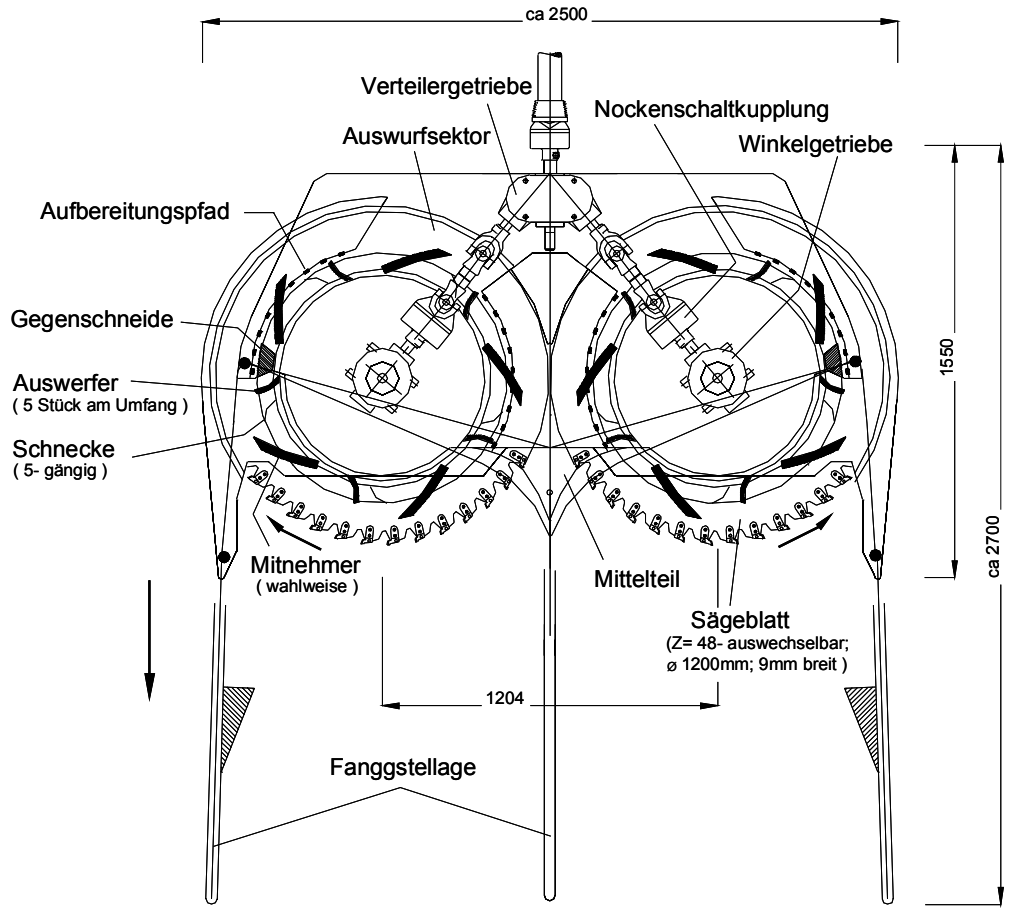


Abbildung 13: Tritucap 2- Konzeption der Antriebs- und Häckselkomponenten

Das Drehmoment des Traktors wird auf ein Verteilergetriebe der Firma Bondioli

& Pavesi (Zentralgetriebe) übertragen, das neben einer Eingangswelle zwei im 120°-Winkel versetzte Abtriebswellen besitzt. An den Abtriebswellen ist zunächst wieder jeweils eine auf 2.500 Nm eingestellte Nockenschaltkupplung der Firma GKN-Walterscheid angebaut. Die Leistungsübertragung ist an dem Winkelgetriebe angebracht, welches den Rotor direkt antreibt. Die Leistungsübertragung ist also formschlüssig. Zur zusätzlichen Kühlung des Zentralgetriebes wurde ein Ventilator auf der Zentralwelle angebaut. Im Gehäuse sind in Getriebenähe Lüftungsschlitze eingearbeitet, die einen effizienten Luftaustausch gewährleisten sollen.

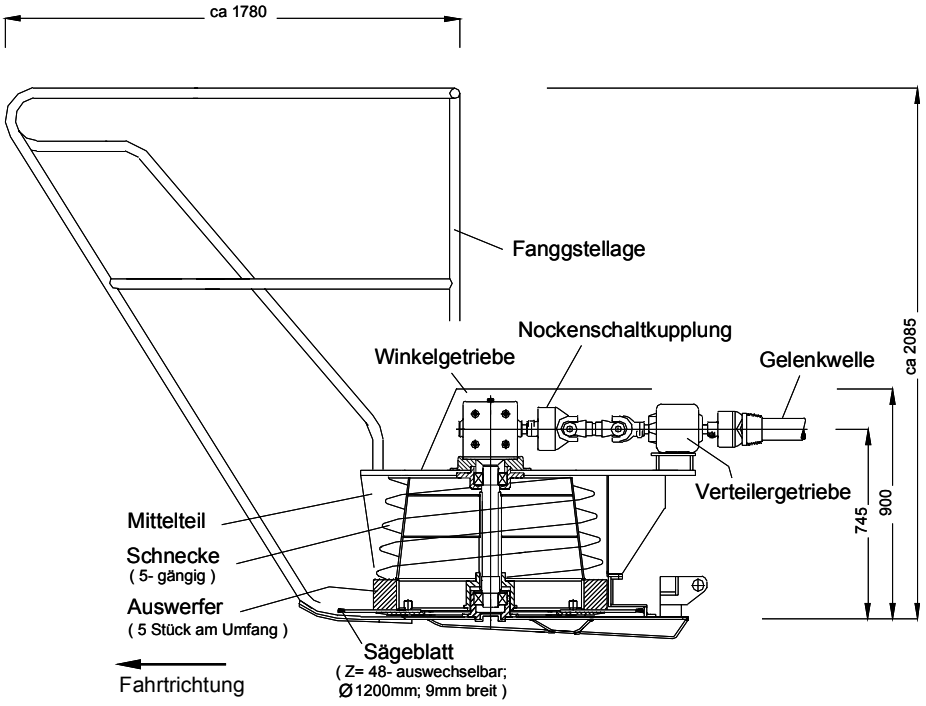


Abbildung 14: Tritucap 2- Seitenansicht der Antriebs- und Häckselkomponenten

Wie in Abbildung 14 zu erkennen ist, wurde im Vergleich zur Version 1 die Höhe der Häckselrotoren reduziert, da Version 1 offensichtlich nicht die volle Rotorhöhe benötigte. Dadurch wurde die Masse der Maschine bei Vergrößerung der Arbeitsbreite auf 2,40 m nur unterproportional höher. Die Zahl der Auswerfer wurde von drei auf fünf erhöht. Auf den Außenkanten der Auswerfer sind Verschleißplatten aufgeschraubt, die einfach demontierbar sind. Die Platten können bei erhöhtem Abstumpfungsgrad gedreht werden und bei beidseitiger Abnutzung nachgeschliffen werden. Die Erhöhung der Auswerferzahl bewirkt einen stärkeren Luftstrom am Materialauswurf, der die Verstopfungsneigung reduziert. Außerdem ist die Materialaufbereitung im Nachzerkleinerungs- oder

Aufbereitungspfad intensiver.

Nach ersten Einsätzen unter brasilianischen Bedingungen wurde der mechanische Ventilator durch einen elektrischen Kühlerventilator ersetzt, der ein höheres Luftvolumen fördern kann. Damit wurde die Kühlung der Getriebekomponenten weiter verbessert.

4.2.3 AHWI FM 600

Abbildung 15: Serienmodell des Forstmulchers AHWI FM 600 (b= 2.700 mm, Rotordurchmesser 600 mm, Masse= 2.800 kg, Umfangsgeschwindigkeit= 49 m/s bzw. 31,4 m/s)

Das Serienmodell des Forstmulchers FM 600 ("Forstmulchgerät, 600 mm Rotordurchmesser") der süddeutschen Maschinenbaufabrik AHWI (Herdwangen) ist als kommerziell verfügbare Vergleichsmaschine ebenfalls getestet worden. Der FM 600 ist ein Mulchgerät, das mit einem horizontalen Rotor arbeitet. Abbildung 15 zeigt die in Brasilien eingesetzte Maschine. Der in rückwärtiger Richtung unter die Maschine drehende Häckselrotor rotiert mit einer Drehzahl von 1.560 bzw. 1.000 UPM (entsprechend 49 m/s bzw. 31,4 m/s) (es wurden zwei Getriebeausführungen der Maschine getestet) wobei die fest aufgeschraubten, mit Hartmetallspitzen bestückten Werkzeuge in einem ersten Arbeitsschritt das Pflanzenmaterial grob vorzerkleinern. Der Traktor bewegt die Maschine dabei in

rückwärtiger Fahrtrichtung (Schubfahrt) in den stehenden Pflanzenbestand hinein. Der auf der Maschine aufgebaute hydraulisch verstellbare Bügel wird dazu verwendet, die stehende Vegetation in einen abgeflachten Winkel zum Rotor zu drücken. Die Pflanzen werden, unterstützt durch die Drehrichtung des Rotors unter die Maschine gedrückt, vorzerkleinert und erst in einem nächsten Arbeitsschritt, in dem die am Boden liegende, vorzerkleinerte Vegetation in Gegenrichtung überfahren wird, endgültig gehäckselt. Hierzu wird der Anstellwinkel des Forstmulchers am hydraulischen Oberlenker so verstellt, dass die dem Traktor zugewandte Seite weiter geöffnet ist. Dadurch wird eine größere Öffnung zur Aufnahme des liegenden Pflanzenmaterials erreicht. Zur Verlängerung des Aufbereitungspfades innerhalb der Maschine wird eine Klappe an der Rückseite des Rotors hydraulisch geschlossen, an der das Material beim Durchlauf durch die Maschine noch einmal gebremst und weiter aufbereitet wird. Der Rotor nimmt bei der Überfahrt das am Boden liegende Material auf, da die Drehrichtung auch beim zweiten Bearbeitungsschritt gleich bleibt. Im Maschinengehäuse eingebaute Gegenschneiden gewährleisten die Aufbereitung des Materials. Die folgende Abbildung 16 zeigt schematisiert den Ablauf des ersten Arbeitsschrittes, bei dem die Maschine in Schubfahrt arbeitet.

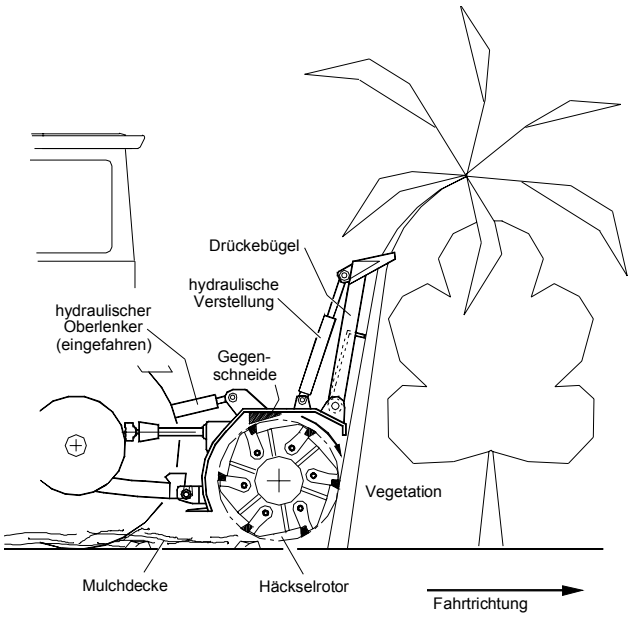


Abbildung 16: Schematische Darstellung des ersten Arbeitsschrittes der AHWI FM 600 (Fällen und Vorzerkleinerung)

Nachfolgend zeigt Abbildung 17 schematisiert den zweiten Arbeitsschritt. Der Traktor bewegt sich dabei vorwärts über das grob vorzerkleinerte Material

hinweg, die Maschine wird nachgezogen.

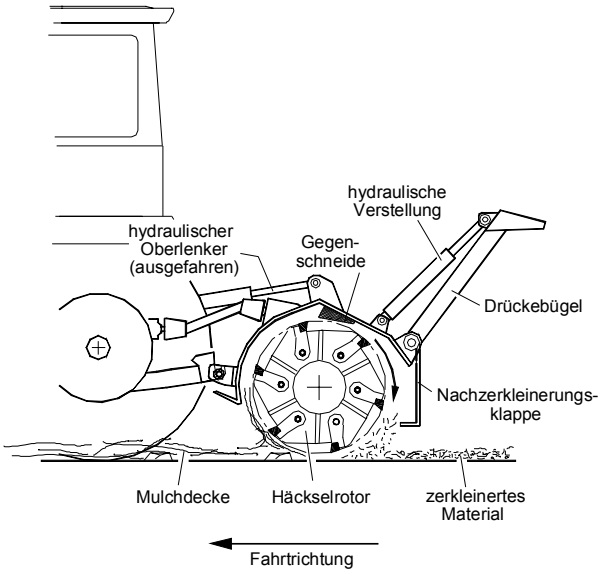


Abbildung 17: Schematische Darstellung des zweiten Arbeitsschrittes der AHWI FM 600 (Nachzerkleinerung)

4.2.4 AHWI RT 350 mit UZM 580

Der Raupentraktor RT 350 ist das Trägerfahrzeug für die der FM 600 ähnlichen Mulchmaschine UZM 580 ("Universalzerkleinerungsmulcher, Rotordurchmesser 580 mm"). An das mit etwa 260 kW motorisierte Trägerfahrzeug ist der Mulcher fest angebaut. Die gesamte Einheit ist als selbstfahrende Arbeitsmaschine zu sehen, die speziell für die Rodung größerer Baumbestände entwickelt wurde. Abbildung 18 zeigt die im Projekt getestete Maschine, die nicht speziell für Brasilien entwickelt wurde. Sie basiert vielmehr auf dem in Deutschland eingesetzten Serienmodell und wurde für die brasilianischen Verhältnisse angepasst.

Durch die hohe Motorleistung und den robuster ausgeführten Mulcher ist es mit dieser Maschine möglich, auch größere Stämme und Bäume zu häckseln. Die Maschine wurde für den Einsatz vor allem in Eukalyptusplantagen zur Zellulosegewinnung konzipiert, wo sie nach der Beerntung der Plantage die Flächenvorbereitung für den nächsten Anbau durchführen soll. Diese großräumigen Plantagen erfordern hohe Schlagkraft und Dauerhaftigkeit der Maschinen, da diese in der Regel im 24-stündigen Dauerbetrieb betrieben werden.

Abbildung 18: Raupentraktor AHWI RT 350 mit UZM 580

Die durchgeführten Modifikationen haben im wesentlichen die intensivere Kühlung der Systemkomponenten zum Ziel gehabt, um damit den klimatischen Verhältnissen Brasiliens Rechnung zu tragen.

Als Besonderheit des Rotoraufbaus der getesteten Maschine im Vergleich zur FM 600 muss erwähnt werden, dass im Mittelteil des Rotors der UZM 580 sogenannte einreihige Zähne anstelle der zweireihigen Verwendung finden. Dieses lässt die leistungssparende Bearbeitung von dickeren Baumstümpfen zu, wie sie in Eukalyptusplantagen angetroffen werden.

4.2.5 Zugfahrzeuge

4.2.5.1 Traktor John Deere 3050

Der Traktor John Deere 3050 mit 66 kW ist mit einer Fronthydraulik und Frontzapfwelle ausgestattet, um damit den ersten Prototypen der Tritucap (Version 1.0 bis 1.3) im Frontanbau betreiben zu können. Der Traktor wurde zum Betrieb mit der Maschine mit einem hydraulischen Kriechganggetriebe ausgestattet, der die stufenlose Regulierung der Fahrgeschwindigkeit im Bereich

von 0- 1,5 km/h ermöglicht. Der Traktor wurde auf der Vorderachse mit Forstbereifung ausgestattet, da durch den Frontanbau der Häckselmaschine die Achslast vergleichsweise hoch war und damit die Anfälligkeit für Beschädigungen durch Wurzelstöcke.

4.2.5.2 Traktor John Deere 7710

Der im Frühjahr 2001 zusammen mit dem Forstmulcher AHWI FM 600 nach Brasilien transportierte Traktor John Deere 7710 wurde im Institut für Agrartechnik umfassend für den Einsatz unter tropischen agroforstlichen Bedingungen vorbereitet. Der Traktor wurde neben speziell verstärkten Forstreifen mit Schutzbügeln und -platten ausgestattet, die Beschädigungen durch anschlagende Äste verhindern sollen. Der gesamte Unterboden wie auch der Tank wurde mit Blechen verkleidet, die wirksam das Eindringen von Ästen verhindern konnten. Zusätzlich zur Serienausstattung wurde eine Rückfahreinrichtung eingebaut, welche die Arbeit mit im Heck angebauten Maschinen in Schubfahrt bei normaler Sitzposition des Fahrers ermöglicht.

4.3 Versuchsparameter und Messgrößen

Um eine Beschreibung der verschiedenen Bearbeitungsflächen zu ermöglichen, die über die bloße stichprobenartige Erfassung von floristischer Komposition und Phytomasse hinausgeht, wurden während der Bearbeitung die im folgenden beschriebenen Parameter zusätzlich erfasst.

4.3.1 Kraftstoffverbrauch

Der Kraftstoffverbrauch gibt sowohl über die Belastung der Maschinen als auch indirekt über die Dauer der Bearbeitung Aufschluss. Weiterhin ist der spezifische Kraftstoffverbrauch je Tonne gehäckselter Biomasse für die jeweilige Maschine ermittelbar. Damit wird auch eine relative Vorzüglichkeit in Abhängigkeit von den Bearbeitungsbedingungen beschrieben werden können.

Die Erfassung der Kraftstoffmenge wurde bis einschließlich März 2003 durch nicht-elektronische Volumenmessung durchgeführt. Ab März 2003 wurde das verbrauchte Kraftstoffvolumen direkt am Kraftstoffsystem des Traktors gemessen.

Zu Erfassung des verbrauchten Kraftstoffvolumens kamen zwei Durchflussmengenmesser zum Einsatz. Es wurde damit sowohl der Volumenstrom zur Einspritzpumpe als auch der des Kraftstoffrücklaufs zum Tank erfasst. Die von den Messturbinen ausgehenden Zählimpulse wurden zur späteren Auswertung mit einem Mobilcomputer aufgezeichnet. Zu berücksichtigen ist bei der Auswertung die Abhängigkeit der Messimpulse von der Durchflussmenge je Zeiteinheit.

Es wurden mehrere Kalibrierungsmessungen vorgenommen, die eine Zuordnung der Messimpulse zu einem Kraftstoffvolumen ermöglichen. Es wurden Durchflussmessturbinen der Firma B.I.O.-TECH (Vilshofen) vom Typ Flowmeter Serie FH, Typ 141429-99 zur Messung verwendet. Die beiden Sensoren sowohl für den Vorlauf zur Einspritzpumpe als auch für den Rücklauf zum Tank wurden getrennt voneinander kalibriert.

4.3.2 Drehmoment und Drehzahl

Mittels einer sogenannten DLC-Messnabe der Firma Walterscheid (Lohmar) vom Typ SE 250 (Sach Nr. 197270, Profil 1 3/8“, 6-fach Verzahnung), die an dem Zapfwellenabtrieb des Traktors installiert wurde, wurden während der Arbeit mit den Maschinen die jeweiligen Drehmomente und Drehzahlen an der Zapfwelle erfasst. Die mit der Messnabe gemessenen Werte für Drehmoment und Drehzahl werden auf einem Messverstärker der Firma Walterscheid (Lohmar) vom Typ RM 250 zusammengeführt, aus dem das Messsignal digitalisiert ausgegeben und auf einem Mobilcomputer erfasst wird.

Der Computer erstellt während der Arbeit ein Messprotokoll, in dem neben der sekundengenauen Uhrzeit die jeweils gemessenen Drehmoment- und Drehzahlwerte abgetragen sind. Je Sekunde werden zwischen 50 bis 57 Messungen durchgeführt und protokolliert, so dass auch kurzfristige Spitzenbelastungen erfasst werden.

4.3.3 Fahrgeschwindigkeit

Zur Erfassung der Geschwindigkeit wird ein Magnetkontakt verwendet, der nahe der Kardanwelle zum Vorderachsantrieb angebracht ist. Auf der Kardanwelle

selbst sind zwei Magnete aufgeschraubt, die in geringem Abstand an dem Magnetkontakt vorbeistreichen. Der so geschlossene Kontakt verursacht einen Impuls, der durch den Computer aufgezeichnet wird. Aus der Anzahl der aufgezeichneten Impulse lässt sich zunächst die zurückgelegte Wegstrecke ablesen. In Verbindung mit der Zeitdauer kann auf die Fahrgeschwindigkeit geschlossen werden.

4.3.4 Ermittlung der Flächenleistung

Zur Ermittlung der Flächenleistung bei der maschinellen Flächenbearbeitung muss man zwischen den reinen Arbeitsphasen (Hauptzeiten) und den Nicht-Arbeitsphasen, den Nebenphasen (oder Nebenzeiten), unterscheiden. Während der Arbeitsphasen häckselt die jeweilige Maschine die Brachevegetation. Das Häckseln muss jedoch zwangsläufig unterbrochen werden durch die Nebenphasen, zu denen das Wenden der Maschine am Ende des Feldes gehört. Um die Arbeitsbedingungen auf einer Fläche charakterisieren zu können, wurde eine möglichst umfassende Beschreibung aller möglichen Nebenphasen vorgenommen. Es werden grundsätzlich die folgenden Phasen der Bearbeitung unterschieden:

1. Häckseln

   Die Zeit, in der die Maschine im Bestand eingreift oder sich in einem Manöver befindet, das direkt mit dem Häckseln in Zusammenhang steht.

2. Wenden

   Manöver mit der Maschine, vor allem am Ende des Feldes, um zu einer neuen Bearbeitungsphase anzusetzen; Ausweichen und Umfahrung von Hindernissen

3. Pause

   Unterbrechungen, die nicht durch die Maschine oder den Traktor hervorgerufen wurden. Es kann sich sowohl um Erholungszeiten des Fahrers wie auch um Unterbrechungen zur Aufnahme von z.B. Temperaturdaten an der Maschine handeln.

4. Verstopfung

   Unterbrechung der Häckselarbeit durch das Stehenbleiben eines oder beider Häckselrotoren. Oft verursacht durch zu großes Materialauf-

kommen, welches meistens die manuelle Beseitigung durch den Fahrer erfordert. Im Falle der AHWI FM 600 oder des RT 350 kann es sich auch um einen Eingriff des Rotors in den Oberboden handeln, der den Motor durch Überlastung stoppen kann.

5. Defekt

   Die Unterbrechung des Häckselvorganges durch notwendige Wartungsarbeiten oder Störungen am Traktor werden mit dem Stichwort "Defekt" gekennzeichnet. In den meisten Fällen handelt es sich um kleinere Wartungsarbeiten, wie zum Beispiel die Reinigung des Kühlersiebes, um eine Motorüberhitzung zu vermeiden. Jedoch auch Verstopfungen des Kraftstofffilters wurden als "Defekt" registriert.

6. Ende

   Das Ende der Bearbeitung der Fläche, an die sich meist noch ein kurzer Weg des Traktors zum Feldrand anschließt wird mit "Ende" gekennzeichnet.

Der Beginn einer dieser Phasen wird durch den Fahrer am Mobilcomputer per Tastatureingabe markiert. Die Registrierungsdatei vermerkt die sekundengenaue Uhrzeit in Verbindung mit der jeweils aktuellen Bearbeitungsphase in der Messdatei.

4.3.5 Häckselqualität

Die Qualität der von den Maschinen durchgeführten Arbeit wurde sowohl im Hinblick auf die Qualität der produzierten Hackschnitzel als auch im Hinblick auf die Verteilung auf der Feldoberfläche erfasst. Hierzu wurden dem Feld Proben entnommen die später vermessen und klassifiziert wurden. Je Flächeneinheit von 3.300 m² wurde eine Probe entnommen. Hierzu wurde quer zur Bearbeitungsrichtung ein Streifen von 0,10 m x 10,00 m markiert, aus dem sämtliche Hackschnitzel entnommen wurden. Zusätzlich wurde entlang der Markierung die Dicke der Mulchdecke gemessen.

Zur Trennung der Größenfraktionen der Hackschnitzel der so entnommenen Proben wurde ein Plansiebverfahren angewendet, das aus Holzrahmen mit aufgespanntem Drahtgeflecht verschiedener Maschenweite bestand. Die in der Literatur beschriebenen Methoden zur Siebung von Hackschnitzeln beruht auf

mechanisierten Großanlagen mit hohen Durchsatzleistungen und einer groben Einteilung des Materials zur thermischen Verwertung [BÖHM & HARTMANN 2002]. Im Untersuchungsgebiet standen jedoch keine entsprechenden Siebanlagen zur Verfügung, so dass mit dem zur Verfügung stehenden Material die unten beschriebene manuell betriebene Siebanlage aufgebaut werden musste. Die in dieser Arbeit verwendeten Siebe haben eine quadratische Maschenanordnung mit Maschenweiten von 35 mm, 25 mm, 7 mm und 1 mm. Dieses wurde so lange linear mit möglichst gleichbleibender Intensität geschüttelt, bis kein Partikel mehr durch das Sieb fiel. Die Siebgröße „1 mm“ diente dabei ausschließlich zur Abreinigung von Erdbestandteilen aus der Stichprobe. Die Möglichkeit der eindeutigen Trennung von Partikelgrößen mit diesem Verfahren musste zunächst durch die Vermessung und Verwiegung der einzelnen Stücke einer Siebung belegt werden. Hierbei wurde der kleinste und größte Durchmesser des jeweiligen Schnitzels wie auch seine Länge erfasst.

Da gerade in den feineren Siebfraktionen die Zahl der Einzelbestandteile des Siebabganges sehr groß ist, wurde die Zahl der zu messenden Einzelteile nach dem folgenden Schema festgelegt:

- Für die Siebfraktion der Klasse „< 1 mm“ wurde keine Messung durchgeführt, da es sich hauptsächlich um Staub- und Erdbestandteile handelte.
- für die Siebfraktionen der Klassen „bis 25 mm“ und „bis 7 mm“ wurden, sofern vorhanden, mindestens 100 Partikel vermessen; umfasste die Klasse weniger als 100 Teile, so wurden alle Teile dieser Klasse vermessen. Umfasste die Klasse mehr als 1.000 Teile, so werden 10 % der Gesamtzahl der Teile vermessen.
- die Siebfraktion der Klassen „bis 35 mm“ sowie der Siebrest (das auf dem Sieb verbliebene Material, „> 35 mm“) wurde vollständig vermessen.

Die Klassierung der durch die getesteten Maschinen produzierten Hackschnitzel musste jedoch nach weiteren Kriterien erfolgen, die im Folgenden dargestellt werden. Die Unterschiedlichkeit der Form und Aufbereitung der einzelnen Hackschnitzel machte es notwendig, ihre Qualität zu beschreiben. Daher wurden sechs Klassen definiert, die vermutlich die Geschwindigkeit der Rotte der Hackschnitzel reflektieren. Die sechs Klassen sind in Tabelle 5 dargestellt und

definiert. Sie sind nach ihrem Grad der Aufbereitung der Hackschnitzel gestuft, da man davon ausgehen kann, dass Holzteile, die stark zerfasert sind und damit eine große Oberfläche besitzen, einem beschleunigten Rottevorgang unterliegen im Vergleich zu kompakteren Teilen. Weiterhin setzt die Rinde der Rotte den wohl größten Widerstand entgegen. Damit unterliegen die Teile, die noch vollständig oder teilweise von Rinde umschlossen sind, einer relativ langsameren mikrobiellen Zersetzung. Hierbei ist besonders zu betonen, dass nur für den Siebrest und den Siebabgang des Siebes mit 35 mm Maschenweite die Klassierung des Materials vorgenommen wurde.

Tabelle 5: Qualitätsklassen der produzierten Hackschnitzel

	Klasse	Definition
wenig aufbereitet	mit Rinde	Teile des Hackschnitzels sind vollständig von Rinde umschlossen (mehr als 50 % auf dem Umfang)
	teilweise gehäckselt	Hackschnitzel, die offenbar durch den Häckselvorgang angeschlagen wurden, jedoch noch Teile der Rinde (weniger als 50 % auf dem Umfang) aufweisen
zunehmender Aufbereitungsgrad	kompakt	Hackschnitzel, die in einer kompakten, nicht zerfaserten Form vorliegen, jedoch keine Rinde mehr auf ihrem Umfang aufweisen
	teilweise zerfasert	Hackschnitzel, die noch in kompakter Form vorliegen, jedoch teilweise bereits zerfasert sind.
	vollständig zerfasert	Hackschnitzel, in ihrer Struktur vollständig aufgefasert sind, jedoch noch eine Form besitzen.
stark aufbereitet	strukturlos	Hackschnitzel ohne definierte äußere Form, völlig zerfasert

Abbildung 19 zeigt in einem Organigramm die Vorgehensweise zur Qualitätsbestimmung und Klassierung der beim Häckselvorgang produzierten Hackschnitzel.

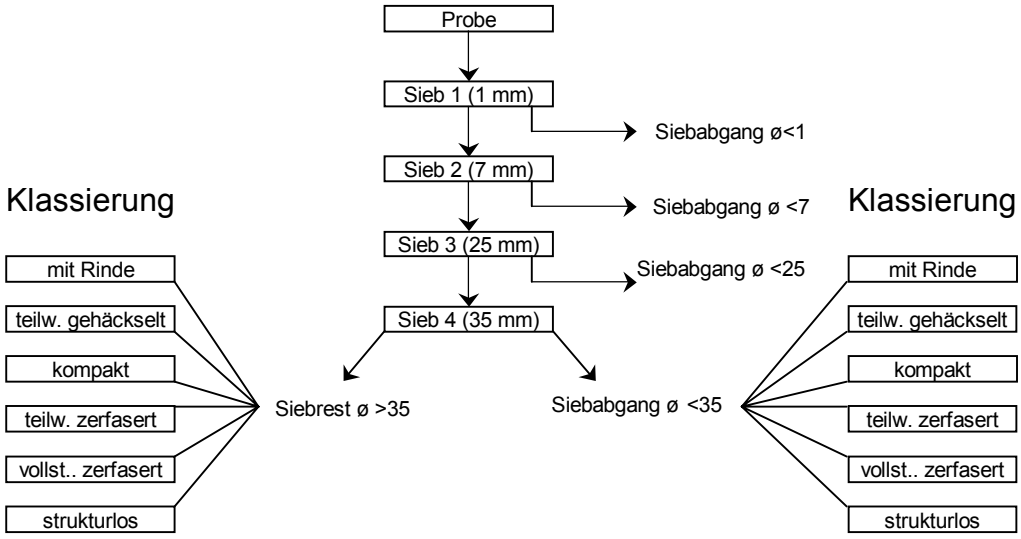
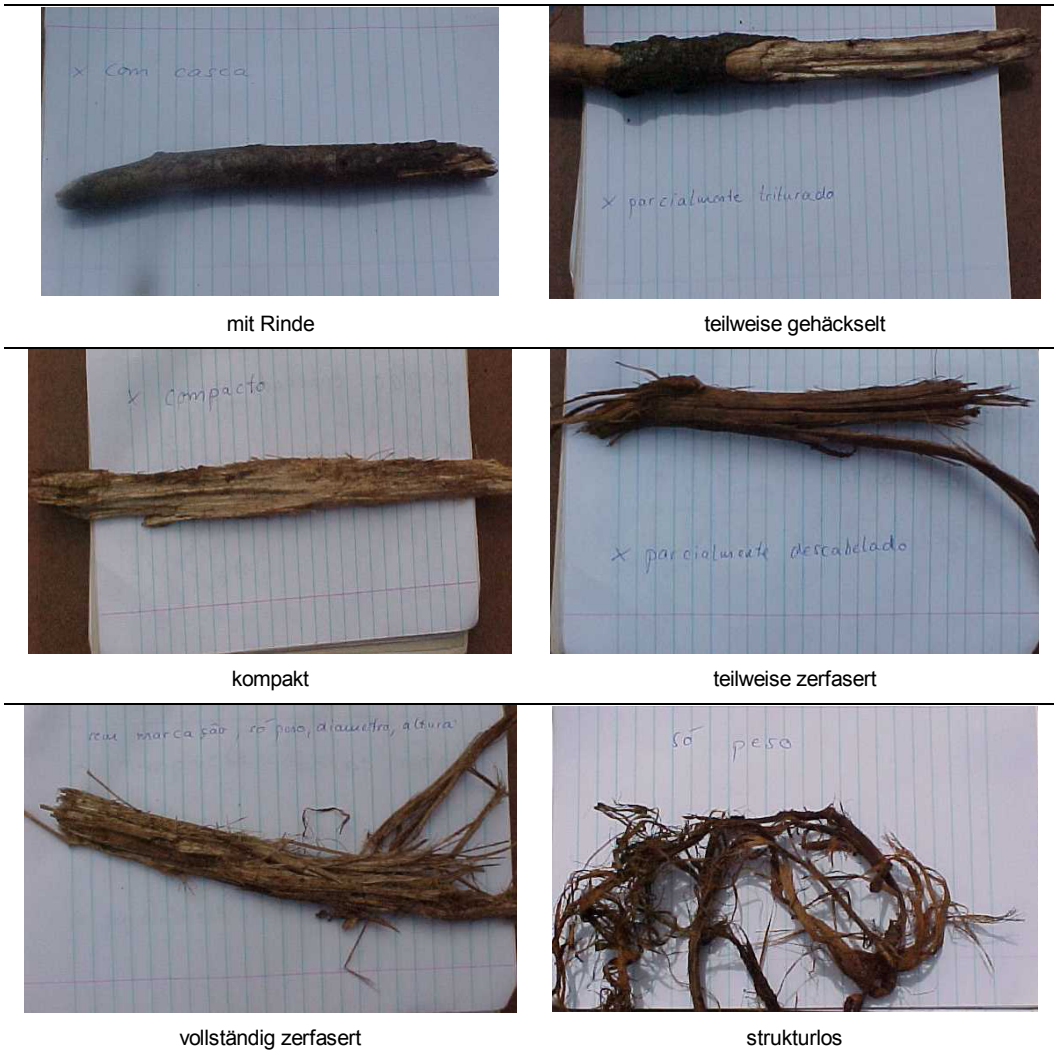


Abbildung 19: Organigramm der Klassierung von Hackschnitzeln zur Qualitätsbestimmung

Die so vorgenommene Auswertung wurde zunächst für alle Hackschnitzelklassen vorgenommen, die aus der Bearbeitung jeweils einer Fläche mit einer der drei Maschinen Tritucap 1, Tritucap 2 und AHWI FM 600 hervorgingen. Danach wurden nur noch die größten Klassen (Siebfraktion „bis 35 mm“ und Siebrest „> 35 mm“) in ihrer Qualität bestimmt, um den Aufwand des Verfahrens zu reduzieren.

In Abbildung 20 sind Muster der Hackschnitzelklassen beispielhaft dargestellt.



mit Rinde | teilweise gehäckselt

kompakt | teilweise zerfasert

vollständig zerfasert | strukturlos

Abbildung 20: Muster für die einzelnen Hackschnitzelqualitätsklassen

4.4 Versuchsdurchführung und Datensammlung

Mit dem Häcksler Tritucap 1 und Tritucap 2 wurden in allen Versionen überwiegend Tests zur Verbesserung der Konstruktion vorgenommen. Daher ist die Datengrundlage zur statistischen Auswertung nicht gegeben. Mit der Tritucap Version 1.3 wurden zwei Flächen bearbeitet. Die Testläufe mit der Tritucap Version 2.0 ermöglichten ebenfalls nur eine Erhebung auswertbarer Daten in geringem Umfang. Es standen auch hier die Verbesserung der Konstruktion und der kurzzeitige Test von Modifikationen im Vordergrund.

Die Forstmulcher der Firma AHWI wurden als Serienmaschinen nur wenig modifiziert und zur Datengewinnung auf Flächen verschiedenster

Vegetationsstruktur eingesetzt. Der Raupentraktor RT 350 wurde auf Flächen mit mindestens 10 Jahre alter Brachevegetation eingesetzt. Zusätzlich wurde eine Fläche mit einem etwa 25 Jahre alten Ölpalmenbestand gehäckselt.

4.5 Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse

Die Aufbereitung der erfassten Grunddaten der Vegetationsstruktur und der jeweiligen Phytomasse der beprobten Flächen wird im Hinblick auf einen Erklärungsansatz zur Abhängigkeit der Leistung der eingesetzten Maschinen von der natürlichen Struktur der Vegetation durchgeführt.

Zunächst werden aus den vorhandenen Daten der botanischen Untersuchungen Charakteristika der jeweils untersuchten Flächen herausgearbeitet, um diese dann mit den Daten der Bearbeitung zu verknüpfen und so die Abhängigkeiten der Bearbeitungsdaten von charakteristischen Flächenmerkmalen erklären zu können.

Im Folgenden werden die einzelnen Auswertungsschritte und die dabei angewendeten statistischen Methoden dargestellt. Zur statistischen Auswertung wurden Prozeduren des Programms „SAS®, Version 8.01e“ verwendet.

4.5.1 Charakterisierung der untersuchten Flächen

Zur Untersuchung, welche Merkmale zur Beschreibung der Nord-Ost-Amazonischen Sekundärvegetation charakteristisch sind, wurde zunächst die Häufigkeit der Wuchsformen aller untersuchter Pflanzen untersucht (n= 29.398). Die Streuung der erhobenen botanischen Daten wurde mittels mehrfaktorieller Varianzanalyse, der ein lineares Modell zugrunde liegt, untersucht. Dabei werden die F-Werte mit Angabe der Irrtumswahrscheinlichkeit simultan berechnet. Als Signifikanzniveau wird eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $p< 0,05$ gesetzt, wobei Werte mit $p< 0,01$ als hochsignifikant bezeichnet werden. Als lineares Modell wurde die nachfolgende Gleichung 2 auf einen Datensatz angewendet, in dem je vermessener Einzelpflanze eine vollständige Beobachtung, einschließlich der Beschreibung der Pflanzenspezies, vorlag (n=26.480).

$$Y_{ijklm} = \mu + F_i + P_{ij} + W_k + S_l + e_{ijklm} \qquad \text{Gleichung 2}$$

Darin sind

Y_{ijklm} mittlere Pflanzendurchmesser, mittlere Pflanzenhöhe, Volumen der Einzelpflanze

μ Mittel der Grundgesamtheit, geschätzt durch Beobachtungsmittel

F_i fixer Effekt der Fläche, für die Informationen zur Vegetationsstruktur vorliegen ($i= 41$)

P_{ij} fixer Effekt der Parzelle, in der die Pflanzendaten erhoben wurden, innerhalb Häckselfläche ($ij= 1\text{-}184$)

W_k fixer Effekt der Wuchsform des untersuchten Individuums ($k=6$)

S_l fixer Effekt der Pflanzenspezies des untersuchten Individuums ($l=256$)

e_{ijklm} Resteffekt

4.5.2 Einflussfaktoren auf die Flächencharakteristika

Zur Verdeutlichung der Abhängigkeiten der untersuchten Merkmale untereinander wurden die Pearson'schen Korrelationskoeffizienten der Mittelwerte der Pflanzencharakteristika wie auch die der Werte der flächenspezifischen Phytomasse, der flächenspezifischen Pflanzenzahl,

Gesamtvolumen der erfassten Pflanzen einer Fläche und Alter der Brachevegetation ermittelt. Zur Analyse der Varianzursachen der ermittelten Strukturdaten der Flächen wurde das in Gleichung 3 formulierte lineare Modell für eine mehrfaktorielle Varianzanalyse verwendet (n=41).

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + O_j + e_{ijk}$$ Gleichung 3

Darin sind

Y_{ijk} mittlere Pflanzendurchmesser, mittlerer gemittelter Pflanzendurchmesser, mittlere Pflanzenhöhe, mittlere Dichte der Einzelpflanze, mittlere Schnittfläche der Einzelpflanze, mittleres Volumen der Einzelpflanze, mittlere Masse der Einzelpflanze, Phytomasse je Hektar, Blattmasse je Hektar, Astmasse je Hektar, Stammmasse je Hektar, Lianenmasse je Hektar, Pflanzenzahl je Hektar, gesamtes Pflanzenvolumen je Hektar

μ Mittel der Grundgesamtheit, geschätzt durch Beobachtungsmittel

A_i fixer Effekt des Alters der Brachevegetation (*i= 3, 4, 5, 10*)

O_j fixer Effekt des Ortes, in dem die Fläche liegt (*ij= 1-8*)

e_{ijk} Resteffekt

4.5.3 Einflussfaktoren auf die Bearbeitung der Flächen

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel wurde zur Verdeutlichung der Korrelationen für alle Faktoren der Pearson'sche Korrelationskoeffizient ermittelt. Im folgenden Auswertungsschritt wurde der Zusammenhang zwischen den Daten, mit denen der Häckselverlauf beschrieben werden konnte einerseits und den Daten, die zu diesen Parametern in einer kausalen Beziehung standen andererseits untersucht. Dieses erfolgte ebenfalls mit Hilfe der mehrfaktoriellen Varianzanalyse auf der Grundlage eines Datensatzes, der je Häckselfläche eine Beobachtungsfläche aufwies (n= 64). Dem linearen Modell lag dabei die Gleichung 4 zu Grunde.

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + O_j + E_k + H_l + e_{ijklm} \qquad \text{Gleichung 4}$$

Darin sind

Y_{ijkl} Dauer der Bearbeitung, Manöver und Verstopfungen sowie Kraftstoffverbrauch während des ersten und zweiten Bearbeitungsschritts,

μ Mittel der Grundgesamtheit, geschätzt durch Beobachtungsmittel

A_i fixer Effekt des Alters der Brachevegetation (*i= 3, 4, 5, 10*)

O_j fixer Effekt des Ortes, in dem die Fläche liegt (*ij= 1, 2, 4, 5, 6, 7*)

E_k fixer Effekt der Erfahrung des Fahrers (*k=1, 2, 4*)

H_l fixer Effekt der Hindernisse in der Fläche (*l= 0, 1*)

e_{ijklm} Resteffekt

Mit diesem statistischen Modell wurde der Datensatz auf drei verschiedene Arten analysiert. Im ersten Schritt wurde als Kovariable die gemessene Phytomasse der Fläche vorgegeben, im zweiten Schritt die ermittelte Pflanzenzahl. Die ersten beiden Schritte beschränken den auswertbaren Datensatz auf Flächen, für die ein Strukturdatensatz vorliegt. Im dritten Auswertungsschritt wird der volle Datensatz aller gehäckselter Flächen ohne Vorgabe einer Kovariable analysiert. Damit fließen auch Flächen in die Analyse ein, für die keine Erfassung der Vegetationsstruktur durchgeführt wurde.

5 Ergebnisse

Es werden zunächst Merkmale untersucht, die zur Beschreibung der untersuchten Flächen geeignet sind. In einem nächsten Schritt werden die Flächen anhand dieser Merkmale charakterisiert und Faktoren untersucht, die diese Merkmale beeinflussen. Zur vollständigeren Charakterisierung der Flächen werden weitere Einflussfaktoren dargestellt, die ebenfalls auf ihre Aussagefähigkeit hin untersucht werden.
Im Anschluss daran werden die Leistungsdaten der Maschinen im Zusammenhang mit den durch sie bearbeiteten Flächen dargestellt.

5.1 Struktur und Phytomasse der untersuchten Flächen

5.1.1 Merkmale zur Flächencharakterisierung

Es wurden insgesamt 41 Flächen verschiedenen Alters auf ihre Vegetationsstruktur und oberirdische Phytomasse hin untersucht.
Die zur Beschreibung der Vegetationsstruktur verwendeten Merkmale sind die Folgenden:

- mittlerer Durchmesser der Pflanzen
- mittlere Höhe der Pflanzen
- Phytomasse der Fläche
- Wuchsform der Pflanzenspezies
- Dichte der Pflanzenspezies

Aus der Kombination einzelner dieser Merkmale ergeben sich weitere, sogenannte kombinierte Merkmale:

- Durchmesser und Höhe → mittleres Volumen der Einzelpflanzen
- Durchmesser, Höhe und Dichte→ mittlere Masse der Einzelpflanzen

Die vollständige Beschreibung der untersuchten Pflanzen der Flächen besteht aus der Angabe des Durchmessers, der Höhe und der Spezies.
Es wurden insgesamt 29.230 Pflanzen vollständig beschrieben. Diese wiesen dabei im Mittel einen Durchmesser von 2,25 cm auf. Zu berücksichtigen ist dabei, dass für Pflanzenspezies mit stark elliptischem Querschnitt, im wesentlichen

Phenakospermum guyanennse, zwei Durchmesser erfasst wurden. Die mittlere Pflanzenhöhe aller Pflanzen betrug 309,9 cm.

Die Extrema der Durchmesser sind 0,1 cm als Minimalwert und 83 cm als Maximalwert bei einer Standardabweichung von 2,54 cm. Die Extrema der Höhe betragen 10 cm (Minimum) und 1870 cm (Maximum) bei einer Standardabweichung von 218,1 cm (vgl. Anhang, Tabelle A- 14 – Tabelle A- 17).

Sowohl die Extrema wie auch die Standardabweichungen der Merkmale lassen die große Heterogenität der untersuchten Vegetation erahnen. Daher wurde davon ausgegangen, dass diese drei Merkmale allein nicht ausreichen, die Flächen hinreichend zu beschreiben.

Zur zusätzlichen Charakterisierung der beprobten Flächen wurde eine Unterteilung der erfassten Pflanzen in die Wuchsformen „Grasartige", „Krautartige", „Palme", „Baum", „Liane" und „Strauch" vorgenommen. Die folgende Abbildung 21 zeigt die numerischen Anteile der jeweiligen Wuchsform aller untersuchter Pflanzen.

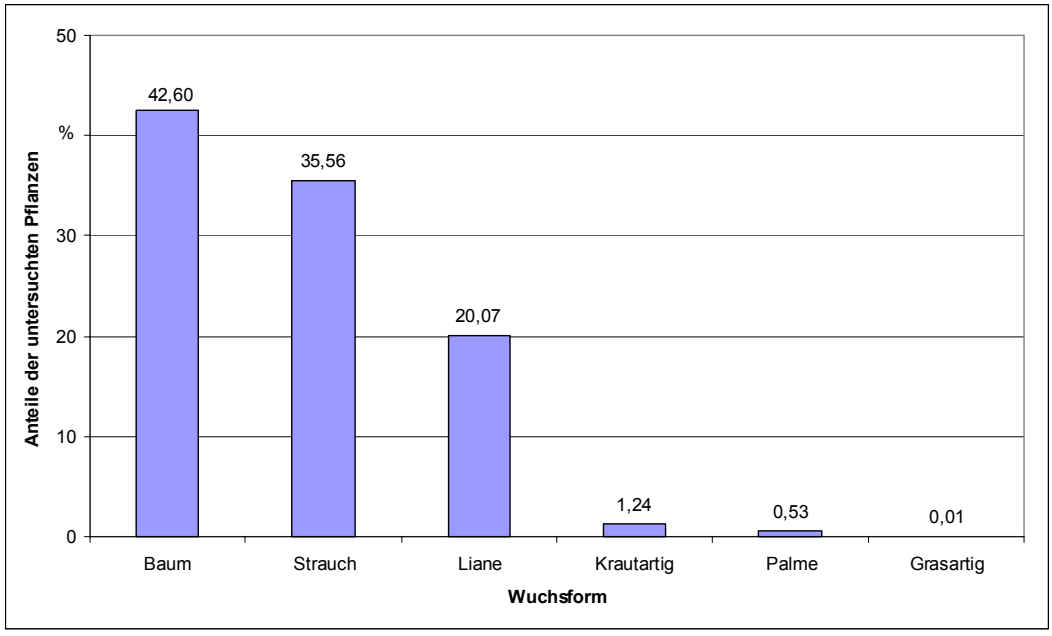


Abbildung 21: Numerischer Anteil der verschiedenen Wuchsformen der untersuchten Pflanzen (n= 29.398, 2.760 nicht zuzuordnen)

Da die Zuordnung der Wuchsformen zu den Spezies erst nach der Erhebung der Merkmale im Feld erfolgte, konnte den nicht identifizierten Pflanzen im nachhinein keine Wuchsform mehr zugeordnet werden. Diese fließen jedoch in dir Darstellung in Abbildung 21 nicht mit ein.

Die Abbildung zeigt sehr deutlich, dass der mit mehr als 78 % größte Teil der in der Sekundärvegetation angetroffenen Pflanzenarten baumartigen oder strauchartigen Wuchs haben, tendenziell also einen hohen Anteil an holzigen Spezies enthält. Die Gruppe der Lianen ist mit 20 % der identifizierten Spezies vertreten. Den Gruppen „Grasartige“ und „Krautartige“ kommt in den untersuchten Pflanzenarten keine große Bedeutung zu.

Eine Varianzanalyse der Merkmale mit den in Gleichung 2 angeführten Linearfaktoren (Fläche, Parzelle, Wuchsform, Pflanzenspezies) hat gezeigt, dass die untersuchten Flächen sich signifikant durch diese Merkmale unterscheiden. Die Varianz der Merkmale innerhalb der Fläche (Flächennummer 1- 42) war geringer, als die der Merkmale zwischen den Flächen. Für die Betrachtung der Varianzursache der Pflanzendurchmesser hat sich ergeben, dass der Einfluss der Fläche (1- 42) wesentlich höher ist, als der Einfluss der Parzellen. Diese Werte sind hochsignifikant ($p< 0,0001$). Einschränkend muss jedoch gesagt werden, dass nur rund 44 % der Streuung durch das vorliegende lineare statistische Modell erklärt werden können ($R^2= 0,4399$). Für die varianzanalytische Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Pflanzenhöhe hat sich ein noch stärkerer Einfluss der Fläche ergeben. Das Modell erklärt zu etwa 50 % die Streuung der Faktoren ($R^2= 0,5075$). Die Werte sind ebenfalls hochsignifikant ($p< 0,0001$) (vgl. Anhang, Tabelle A- 18 – Tabelle A- 21).
Die Charakterisierung der Flächen durch die untersuchten Merkmale ist demnach möglich. Die Flächen sind im Bezug auf die untersuchten Merkmale im Vergleich zueinander unterschiedlicher als die Parzellen innerhalb der Fläche. Es kann also eine gewisse Homogenität innerhalb der Flächen unterstellt werden.

5.1.2 Merkmale der untersuchten Flächen

Für die 41 untersuchten Flächen mit den Flächennummern 1 bis 42 (Flächennummer 37 wurde nicht vergeben) werden in der folgenden Abbildung 22 die mittleren Durchmesser der untersuchten Pflanzen sowie die Standardabweichungen als ein Hauptcharakteristikum dargestellt.

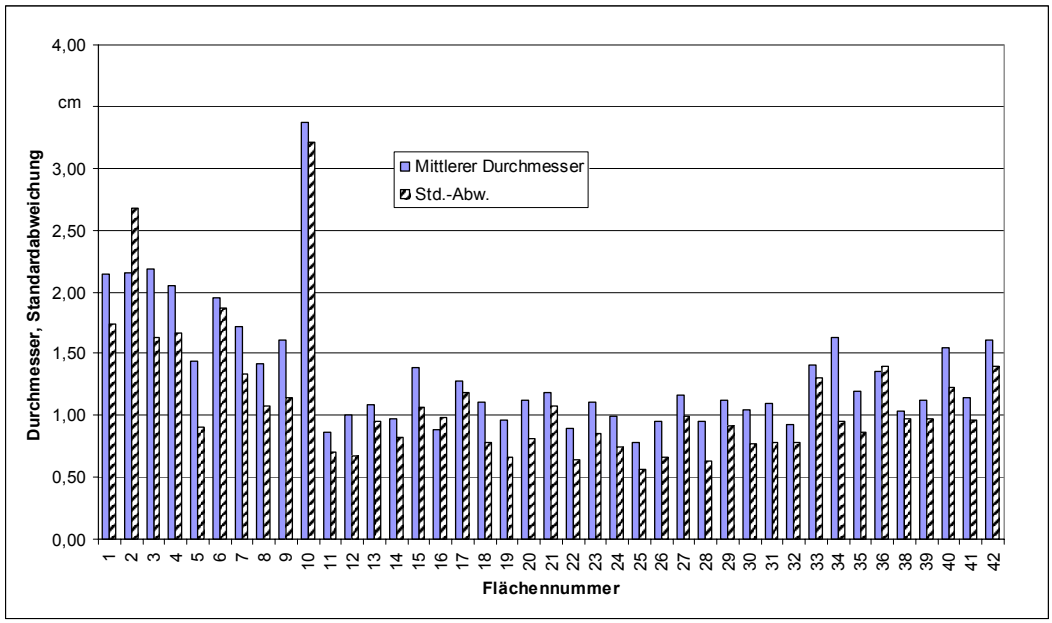


Abbildung 22: Mittlere Pflanzendurchmesser und Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Untersuchungsfläche (n=41)

Auffällig ist der hohe Wert für den mittleren Durchmesser auf Fläche 10. Diese Fläche stellt einen Sonderfall dar, da hier laut Aussage des Bewirtschafters die Brachedauer ca. 10 Jahre betrug. Damit ist die Brachedauer dieser Fläche wesentlich länger als auf den meisten anderen untersuchten Flächen. Ebenso weisen die Flächen 1– 4 eine höhere Brachedauer aus als die Flächen mit den Nummern 11– 32. Auch hier ist ein höherer Wert für den mittleren Durchmesser augenfällig. Es lässt sich also ein Zusammenhang zwischen der Brachedauer und dem mittleren Pflanzendurchmesser vermuten.

Die Betrachtung der mittleren Pflanzenhöhen der untersuchten Flächen ergibt das in der folgenden Abbildung 23 gezeigte Bild. Der bereits in Abbildung 22 erkennbare Verlauf der Mittelwerte zeigt sich in ähnlicher Weise, wobei die Fläche mit der Nummer 10 den höchsten Wert aufweist.

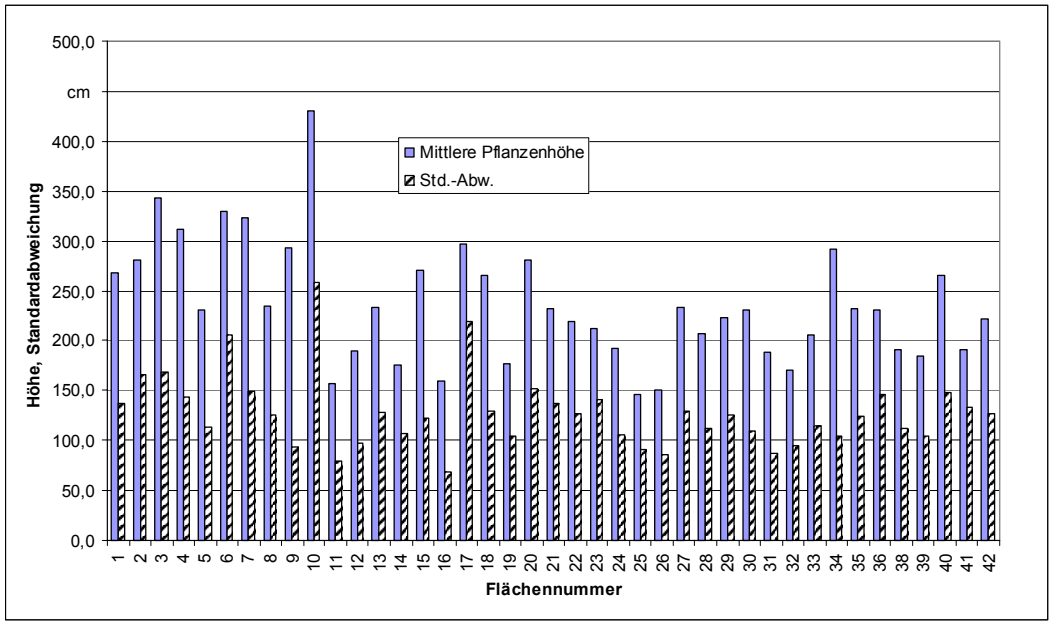


Abbildung 23: Mittlere Pflanzenhöhen und Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Untersuchungsfläche (n=41)

Zur Präzisierung der Flächenbeschreibung wurde die in Abbildung 24 dargestellte oberirdisch aufgewachsene Phytomasse der Flächen erfasst. Sie weist ebenfalls einen relativ hohen Wert für die Phytomasse auf Fläche 10 aus (vgl. Anhang, Tabelle A- 22– Tabelle A- 26). Es scheint also wiederum ein Zusammenhang zwischen Brachedauer und Phytomasse zu bestehen.

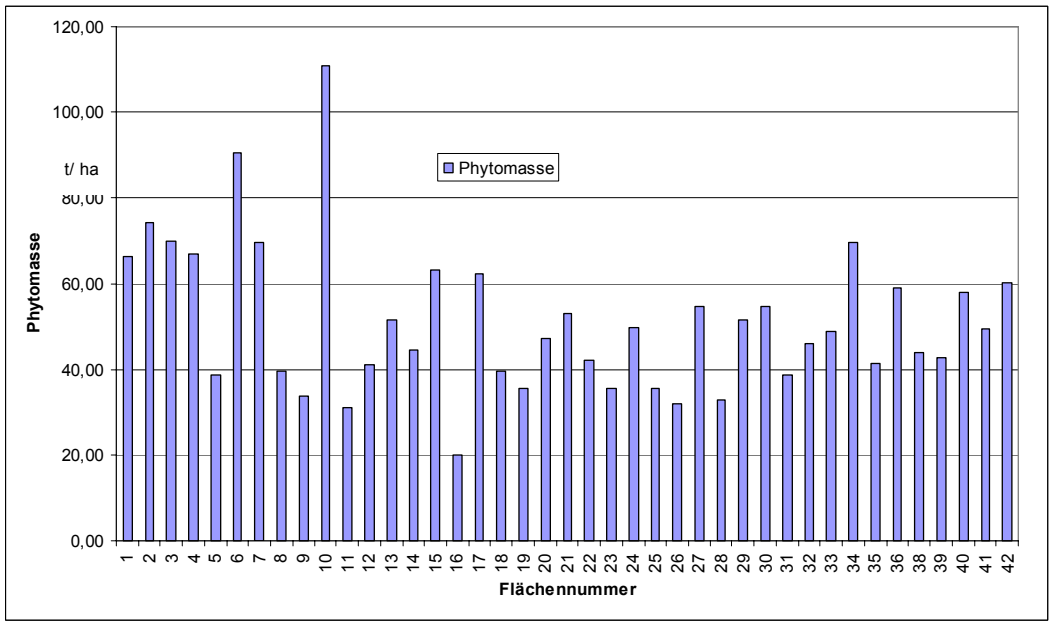


Abbildung 24: Oberirdisch aufgewachsene Phytomasse in Abhängigkeit von der Untersuchungsfläche (n=42)

Der Zusammenhang zwischen Phytomasse und Brachedauer wird durch den

hochsignifikanten Pearson'schen Korrelationskoeffizienten von 0,61985 bestätigt ($p< 0,0001$). Noch höher ist die Korrelation zum mittleren Durchmesser der Pflanzen der Fläche mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,73713, der ebenfalls hochsignifikant ist ($p< 0,0001$). Im Vergleich zum mittleren Pflanzendurchmesser ist der Pearson'sche Korrelationskoeffizient für die Pflanzenhöhe und die Brachedauer etwas geringer (0,668), jedoch ebenfalls hochsignifikant ($p< 0,0001$).
Die folgende Tabelle 6 zeigt zusammenfassend die o.a. Korrelationskoeffizienten.

Tabelle 6: Ausgewählte Korrelationskoeffizienten von botanischen Merkmalen mit Signifikanzniveau (n= 41)

Variable	Durchmesser	Höhe	Phytomasse	Pflanzenzahl	Alter
Durchmesser	1	0,86017***	0,84553***	-0,83277***	0,73713***
Höhe		1	0,82596***	-0,82779***	0,66789***
Phytomasse			1	-0,62161***	0,61985***
Pflanzenzahl				1	-0,59688***
Alter					1

obere Hälfte: Pearson'sche Korrelationskoeffizienten; *** = hochsignifikant ($p< 0,0001$)
Variablen: Mittlerer Durchmesser ; Mittlere Pflanzenhöhe; Phytomasse der Fläche; Anzahl der Pflanzen der Fläche; Alter der Brachevegetation seit der letzten Rodung

Das Merkmal „Pflanzenzahl je Hektar" weist durchgängig ein negatives Vorzeichen für die dargestellten Korrelationen aus. Dem ist zu entnehmen, dass mit zunehmender Stärke der Brachevegetation die Anzahl der Pflanzen je Flächeneinheit hochsignifikant abnimmt.
Die Merkmale sind also, wie gezeigt, stark miteinander korreliert. Als ein möglicher Einflussfaktor hat sich dabei die Brachedauer gezeigt, dessen Einfluss im Folgenden näher untersucht werden soll.

5.1.3 Weitere Einflussfaktoren auf die Merkmale

Die bislang nicht untersuchten Einflussfaktoren auf die Merkmale sind das o.a. Alter der Brachevegetation sowie die Lage der Fläche. Zu ihrer varianzanalytischen Untersuchung wird die Gleichung 3 zugrunde gelegt.
Alters- wie auch Ortsangaben mussten zur Formulierung des statistischen Modells in Klassen eingeteilt werden. Die folgenden Tabellen zeigen die Gruppierung der

Rohdaten für die Altersangabe und die Angabe der Lage in den definierten, statistisch auswertbaren Schlüsseln.

Tabelle 7: Zusammenfassung von Altersangaben de Brachevegetation in einem auswertbaren statistischen Schlüssel

Altersangabe	Schlüssel
2 Jahre , 3 Jahre	3
4 Jahre	4
5 Jahre, 6 Jahre	5
8 Jahre, 10 Jahre, 20 Jahre	10

Die Zusammenfassung der verschiedenen Altersgruppen zu einem Schlüssel erfolgte nach der Maßgabe, dass die gruppierten Angaben ein Höchstmaß an Ähnlichkeiten aufweisen.

Die Lage der Fläche wurde als Ortschaft angegeben, in der die Fläche sich befindet. Zur statistischen Auswertung wurden die in Tabelle 8 aufgeführten Zusammenfassungen in einem Schlüssel vorgenommen, wobei räumlich einander naheliegende Ortschaften in einem Schlüssel zusammengefasst wurden.

Tabelle 8: Zusammenfassung von Flächenlagen in einem auswertbaren statistischen Schlüssel

Lage	Schlüssel
Abaetezinho, Nossa Senhora Aparecida, São João	1
Cumarú, Nossa Senhora de Belém, Ramal do Prata, Nossa Senhora do Rosário, Travessa 16	2
Curí	3
Igarapé-Açú, Pantója	4
Nova Olinda, Porto Seguro, São Luis	5
São Matias	6
Vai-Quem-Quer, Japiím, Barcarena	7
Santa Izabel	8

Die Varianzanalyse der botanischen Merkmale nach den so gewonnenen Klassen „Alter der Fläche“ und „Lage der Fläche“ hat nach Auswertung der 41 untersuchten Flächen das in der folgenden Tabelle verkürzt dargestellte Resultat erbracht. Die Streuung des mittleren Durchmessers ist zu 78,1 % durch das angewendete statistische Modell hochsignifikant erklärbar, wobei das Alter der Vegetation den im Vergleich zur Lage der Fläche höheren Einfluss auf die Streuung des mittleren Durchmessers der Pflanzen hat.

Tabelle 9: Bestimmtheitsmaß, F-Wert und Signifikanzniveau (Pr > F) der Varianzanalyse des Merkmals (mittlerer Durchmesser der Pflanzen) mit den Einflussfaktoren „Alter der Fläche“ und „Lage der Fläche“ (n=41)

abhängige Variable: Mittlerer Durchmesser	R^2	F-Wert	Pr > F
Modell	0,781	12,29	< 0,01%

unabhängige Variable	F-Wert	Pr > F
Alter der Vegetation	13,18	< 0,01%
Lage der Fläche	5,99	0,03%

Die Betrachtung der weiteren Merkmale der Flächen (mittlere Pflanzenhöhe, Pflanzenzahl der Fläche und Phytomasse) ergibt Ergebnisse, die hochsignifikant den gleichen Zusammenhang zeigen. Allein die varianzanalytische Auswertung der kombinierten Merkmale von Einzelpflanzen resultiert in einem abweichenden Ergebnis. Hierbei wird das mittlere Volumen und die mittlere Masse der einzelnen Pflanze betrachtet. Als Beispiel zeigt die folgende Tabelle 10 zeigt das Resultat der Auswertung für die mittlere Masse der Einzelpflanzen.

Tabelle 10: Bestimmtheitsmaß, F-Wert und Signifikanzniveau der Varianzanalyse der botanischen Merkmale mit den Klassen „Alter der Vegetation“ und „Lage der Fläche“ sowie der abhängigen Variablen „mittlere Masse der Einzelpflanzen“ (n=41)

abhängige Variable: mittlere Masse der Einzelpflanzen	R^2	F-Wert	Pr > F
Modell	0,9295	45,56	< 0,01%

unabhängige Variable	F-Wert	PR > F
Alter der Vegetation	13,14	< 0,01 %
Lage der Fläche	33,79	< 0,01 %

Ausschließlich in diesem Fall hat die Lage der Fläche den signifikant höheren Einfluss auf die mittlere Masse der Einzelpflanze. Das Modell kann die Streuung zu 92,95 % erklären.

Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass das Alter der Vegetation einen signifikanten Einfluss auf die untersuchten Pflanzenmerkmale hat und damit die Fläche durch die angegebenen Merkmale beschrieben werden kann (vgl. Anhang,

Tabelle A- 27 – Tabelle A- 32).

Die Streuung der Merkmale einzelner Pflanzen kann durch die Lage der Flächen charakterisiert werden. Das bedeutet, dass die Streuung der kombinierten Einzelmerkmale der Pflanzenwuchses, wie z.B. Durchmesser und Höhe zum Volumen, hochsignifikant durch die örtliche Lage der Fläche beeinflusst werden.

Dabei ist zu betonen, dass dieser Zusammenhang nicht für die ermittelte Phytomasse der Fläche gilt. Diese ist stärker durch das Alter der Vegetation beeinflusst.

5.2 Raumdichte der untersuchten Pflanzenspezies

Es wurden für 209 verschiedene Pflanzenspezies der typischen Sekundärvegetation Untersuchungen der Raumdichte durchgeführt. Diese wurden durch weitere Angaben aus Literaturquellen ergänzt, so dass damit für 285 Spezies Werte zur Raumdichte vorliegen. Der Mittelwert der Raumdichte aller untersuchter Pflanzen liegt bei 0,5810 g/cm³, das Minimum und Maximum liegt bei 0,089 g/cm³ (*Calantha divaricata*) bzw. 1,02 g/cm³ (*Dalbergia subcymosa*). Die von HARZMANN (1988) angesprochene Variationsbreite der Dichten hat sich damit nur teilweise bestätigt. Es ist zu berücksichtigen, dass hier relativ junge Pflanzen untersucht wurden und damit vermutlich noch nicht die sehr hohen Raumdichten vorliegen, wie sie von HARZMANN (1988) beschrieben wurden. Eine Auflistung aller untersuchten Spezies mit den jeweiligen Raumdichten findet sich im Anhang(Tabelle A- 33 – Tabelle A- 42).

5.3 Arbeitsergebnisse der Häckselsysteme

Als ein weiterer Parameter zur Erklärung der Leistung der Häckselsysteme unter verschiedenen Vegetationsbedingungen dient der Grad der Erfahrung des Maschinenführers (vgl. Kapitel 4.1.6.1). Der Rang in der Reihenfolge der Bearbeitung einer Fläche wird mit einem nach dem in Tabelle 11 dargestellten Schlüssel für die statistische Auswertung gekennzeichnet.

Tabelle 11: Zusammenfassung der Bearbeitungsreihenfolge im statistischen Schlüssel „Erfahrung“

Reihenfolge der Bearbeitung	Erfahrung
1 - 10	1
11 - 20	2
21 - 30	3
> 30	4

5.3.1 Arbeitsergebnisse Tritucap 1

5.3.1.1 Konstruktive Änderungen

Bei der in Kapitel 4.2.1.6.3 beschriebenen Version des Häckslerprototypen Tritucap 1.2 wurden im Einsatz bereits bei geringer Belastung Zähne von den Zahnträgern abgebrochen. Auch eine Räumschneide im Sägeblatt wurde in Mitleidenschaft gezogen. Die Ursache hierfür ist das Anschlagen der Sägezähne am Einlauf in das Maschinengehäuse bei hoher Torsionsbelastung des Sägeblattes. Zu dieser Art der Belastung kommt es, wenn sich die Maschinenhöhe beim Eingriff eines Sägeblattes in einen Stamm verändert. Das Sägeblatt verbiegt sich soweit, dass die Zähne an den Einlauf anschlagen und damit abbrechen.

Um diesem Problem zu begegnen wurde der Prototyp Tritucap 1.2 modifiziert und zur Version 1.3 umgebaut. Ein wesentlicher Bestandteil der Veränderungen ist der Einbau von Sägeblättern mit 10 mm Materialstärke statt der vorher verwendeten Sägeblätter mit 6 mm Stärke. Zugunsten der Torsionssteifigkeit wurde auf den Einsatz von Räumschneiden verzichtet. Zusätzlich wurden im Einlaufbereich Längsstege eingeschweißt, die bei einer Torsion des Sägeblattes die Verbiegung soweit begrenzen, dass ein Kontakt der Zähne mit dem Maschinengehäuse nicht mehr stattfinden kann. Statt der vormals verwendeten verschiedenen Zähne (Vollzahn aus Stellit und Formzahn aus Hartmetall) werden nun nur noch Vollzähne eingesetzt. Auf dem Umfang des Sägeblattes wurden die Dehnungsfugen beibehalten.

Das Abbrechen der Sägezähne, wie es bei Version 1.2 auftreten konnte, wurde durch die getroffenen Maßnahmen wirksam unterbunden. Allerdings kam es öfters zu einem Materialstau am Einlaufbereich, da sich an den eingeschweißten Längsstegen Äste ansammelten, die sonst durch das Gehäuse hindurchgerutscht wären. Die Selbstreinigung der Zähne verschlechterte sich offensichtlich. Es

bildeten sich Ablagerungen aus Pflanzensaft auf den Zahnflächen. Dieses ist auf darauf zurückzuführen, dass der durch den Zahn abgehobene Holzspan nicht mehr in dem Maße an der Zahnfläche entlanggeführt wird, wie das bei einem positiven Spanwinkel der Fall ist. Ein Effekt des geänderten Spanwinkels auf das Schneidergebnis wie auch auf die Materialannahme war jedoch nicht zu beobachten.

5.3.1.2 Leistungsdaten Tritucap 1

Die mit der Tritucap 1 bearbeiteten Flächen wurden besonders im Hinblick auf ihr Alter und die Vegetationsstruktur ausgewählt. Da an dieser Maschine noch viele Modifikationen und Anpassungen vorgenommen wurden, konnte keine breite Datengrundlage zur Evaluierung der Arbeitsleistung geschaffen werden. Diese Arbeiten stellen jedoch die Grundlage für die Entwicklung des zweiten Prototypen dar, der weiter unten näher beschrieben wird.
Tabelle 12 stellt die Bearbeitungsdaten der beiden Flächen gegenüber.

Tabelle 12: Gegenüberstellung der Merkmale mit den Arbeitsergebnissen der mit der Tritucap 1.3 bearbeiteten Versuchsflächen

Flächennummer		1	14
Größe	[m²]	4.777	3.491
Brachedauer	[Jahre]	4	3
Ort		Cumarú	São João
Hindernis[1]		0	1
Erfahrung[2]		2	3
Phytomasse	[t/ha]	66,31	44,44
mittlere Pflanzenzahl je ha	[1/ha]	50.667	154.444
mittlerer Pflanzendurchmesser	[cm]	2,316	0,974
mittlere Pflanzenhöhe	[cm]	266,26	175,50
Flächenleistung Bearbeitung[3]	[ha/h]	0,1171	0,2066
Flächenleistung Gesamt[4]	[ha/h]	0,0708	0,1004
Massenstrom; gehäckselte Masse je Häckselzeit	[t/h]	7,764	9,181
Massenspezifischer Kraftstoffverbrauch	[l/t]	3,29	3,98
flächenspezifischer Kraftstoffverbrauch	[l/ha]	218,34	106,27

[1] Merkmalsausprägung „0“ bedeutet: keine Hindernisse in der Fläche
[2] ordinales Merkmal: Reihenfolge der Bearbeitung
[3] Flächleistung bei ausschließlicher Berücksichtigung der Häckselzeiten
[4] Flächenleistung bei Berücksichtigung aller Nebenzeiten

Es werden hier nur die Flächen berücksichtigt, die in vollem Umfang vorher auf ihre Vegetationsstruktur hin untersucht wurden. Die Flächen, auf denen kurzzeitige Tests zur Funktionsprüfung einzelner veränderter Maschinen-komponenten durchgeführt wurden, finden keinen Eingang in die Daten. Es wurde

im Mittel auf den zwei untersuchten Flächen eine Flächenleistung von 0,162 ha/h erreicht (0,1171 ha/ h und 0,2066 ha/h). Hierbei ist zu beachten, dass sich diese Zahlen ausschließlich auf die Häckselzeiten beziehen. Die Nebenphasen für Manöver, Pausenzeiten etc. sind unter „Flächenleistung Gesamt“ erfasst.

Die Flächenleistung ist auf der Versuchsfläche 14 ebenso wie die gehäckselte Masse je Zeiteinheit höher. Der mittlere Pflanzendurchmesser und die mittlere Pflanzenhöhe ist auf Fläche 1 ebenso wie die Phytomasse höher.

Die Unterschiede der Flächenleistung sind offenbar auf die stark unterschiedliche Strukturierung der Vegetation zurückzuführen. Sowohl die Durchmesserverteilung der Pflanzenproben als auch die ermittelte oberirdische Phytomasse weichen stark voneinander ab.

Zur Erklärung der Unterschiede in der Flächenleistung und dem Massenstrom kann eine Darstellung der Verteilung auf die definierten 18 Klassen der gemessenen Durchmesser in den beprobten Flächen herangezogen werden.

Tabelle 13: Numerische Verteilung der Pflanzendurchmesser auf den Versuchsflächen 1 (n= 304) und 14 (n= 278)

Flächennummer	1	14
< 20 mm	60,20%	92,45%
20-25 mm	10,20%	1,44%
25-30 mm	4,93%	2,88%
30-35 mm	2,96%	2,52%
35-40 mm	2,96%	0,00%
40-45 mm	3,62%	0,36%
45-50 mm	3,95%	0,00%
50-55 mm	3,29%	0,00%
55-60 mm	2,30%	0,00%
60-65 mm	0,99%	0,00%
65-70 mm	1,32%	0,00%
70-75 mm	0,99%	0,00%
75-80 mm	1,64%	0,00%
80-85 mm	0,33%	0,36%
85-90 mm	0,00%	0,00%
90-95 mm	0,00%	0,00%
95-100 mm	0,33%	0,00%
> 100 mm	0,00%	0,00%
mittlerer Pflanzendurchmesser [mm]	23,16	9,74

Hier ist noch eindeutiger als am mittleren Durchmesser zu erkennen, dass eine große Anzahl an Pflanzen auf der Fläche 1 einen wesentlich höheren Durchmesser besitzt, als auf der Fläche 14. Auf dieser Fläche haben über 99 % der gemessenen Pflanzen eine Durchmesser von weniger als 35 mm während auf Versuchsfläche 1 mehr als 78 % in diesem Bereich liegen. Jedoch auch in den noch kleineren

Durchmesserklassen ist ein markanter Unterschied zwischen den beiden Flächen zu sehen. Während bei Fläche 1 60,20 % der gemessenen Pflanzen weniger als 20 mm durchmaßen, sind es bei Fläche 14 bereits 92,45 %.

Diese Tatsache kann als ein Erklärungsansatz des trotz höherer Phytomasse geringeren Massenstroms auf Fläche 1 im Vergleich zu Fläche 14 dienen. Vergleicht man die beiden Flächen hinsichtlich ihrer Bearbeitungsdaten direkt miteinander ergeben sich die in Tabelle 14 dargestellte Relationen.

Tabelle 14: Ausgewählte Relationen der Bearbeitungsdaten von Fläche 1 und Fläche 14

Flächennummer	1	14
Verhältnis Phytomasse	1,00	0,6702
Verhältnis Flächenleistung	1,00	1,7643
flächenspezifischer Kraftstoffverbrauch	1,00	0,4867
Verhältnis Massenstrom	1,00	1,1825
massenstromspezifischer. Kraftstoffverbrauch	1,00	1,2097

Bei dem Verhältnis von 1: 0,6702 für die Phytomasse beträgt das Verhältnis der Flächenleistungen 1: 1,7643. Dementsprechend ungünstiger ist der flächenspezifische Kraftstoffverbrauch auf Fläche 1. Dabei weichen die massenstromspezifischen Daten jedoch nur relativ gering voneinander ab. Offenbar wirkt die Struktur und Phytomasse der Vegetation limitierend auf die Flächenleistung. Mit zunehmender Phytomasse und zunehmender Größe des mittleren Pflanzendurchmessers und der mittleren Pflanzenhöhe nimmt die Flächenleistung ab. Der aufgezeigte stark unterschiedliche flächenspezifische Kraftstoffverbrauch dokumentiert diese Abhängigkeit deutlich.

Genauere Aussagen können aufgrund der nur begrenzt verfügbaren Daten jedoch nicht getroffen werden.

5.3.2 Arbeitsergebnisse Tritucap 2

Auch hier werden, wie in Kapitel 5.3.1.2, nur die Arbeitsergebnisse näher erläutert, die sich auf das Häckseln von untersuchten Flächen beziehen. Es wurden ebenfalls zwei Flächen untersucht, von denen die zweite nur teilweise bearbeitet wurde. Die Ergebnisse beziehen sich auf den bearbeiteten Teil der

Fläche. Auf derselben Fläche ist wegen eines Getriebeschadens im Verteilergetriebe eine Teilfläche mit nur einem Rotor bearbeitet worden. Die Fläche, die mit der doppelrotorigen Maschine bearbeitet wurde ist im folgenden mit 36a bezeichnet. Der Teil, der mit nur einem Rotor bearbeitet wurde ist mit 36b bezeichnet. Die folgende Tabelle 15 zeigt die Arbeitsergebnisse. Hauptunterscheidungsmerkmal der Flächen 35 und 36 ist die oberirdisch gewachsene Phytomasse, die bei 41,58 t/ha bzw. 59,07 t/ha liegt. Trotz der rund 42 % höheren Phytomasse auf Fläche 36 ist die Anzahl der Pflanzen im Vergleich zu Fläche 35 rund 6 % höher, was den in Kapitel 5.1.2 gefundenen Zusammenhängen (vgl. Tabelle 6) widerspricht. Bei Betrachtung der Merkmale „mittlerer Durchmesser" und „mittlere Höhe" der Pflanzen zeigt sich eine starke Ähnlichkeit in der Strukturierung der Flächen. Während die Durchmesser noch leicht unterschiedlich sind, sind die mittleren Höhen der Pflanzen nahezu identisch.

Tabelle 15: Gegenüberstellung der Merkmale mit den Arbeitsergebnissen der mit der Tritucap 2.0 bearbeiteten Versuchsflächen

Flächennummer		35	36a[5]	36b[6]
Größe	[m²]	2.689	3.340	6.200
Brachedauer	[Jahre]	3	4	4
Ort		N.S. de Belém	Curí	Curí
Hindernis[1]		0	0	0
Erfahrung[2]		4	4	4
Phytomasse	[t/ha]	41,58	59,07	59,07
mittlere Pflanzenzahl je ha	[1/ha]	100.000	106.388	106.388
mittlerer Pflanzendurchmesser	[cm]	1,217	1,406	1,406
mittlere Pflanzenhöhe	[cm]	231,72	231,21	231,21
Flächenleistung Bearbeitung[3]	[ha/h]	0,2767	0,2900	0,1813
Flächenleistung Gesamt[4]	[ha/h]	0,1841	0,0844	0,1399
Massenstrom; gehäckselte Masse je Häckselzeit	[t/h]	11,53	17,16	10,71
Massenspezifischer Kraftstoffverbrauch	[l/t]	2,71	2,27	2,47
flächenspezifischer Kraftstoffverbrauch	[l/ha]	109,12	112,55	140,02

[1] Merkmalsausprägung „0" bedeutet: keine Hindernisse in der Fläche
[2] ordinales Merkmal: Reihenfolge der Bearbeitung
[3] Flächenleistung bei ausschließlicher Berücksichtigung der Häckselzeiten
[4] Flächenleistung bei Berücksichtigung aller Nebenzeiten
[5] Bearbeitung mit Doppelrotor
[6] Bearbeitung mit einfachem Rotor

Der Vergleich der gemessenen Flächenleistungen der Tritucap 2 ergibt ebenfalls ein Bild, was den für die Tritucap 1.3 gefundenen Ergebnissen zu widersprechen scheint, da für die Fläche mit der höheren Phytomasse eine höhere Flächenleistung gemessen wurde. Daraus resultiert zwangsläufig der in der Tabelle gezeigte höhere Massenstrom. Ebenfalls durch die Flächenleistung

beeinflusst zeigt sich der massenspezifische Kraftstoffverbrauch auf Fläche 36 günstiger.

Zur genaueren Analyse dieser scheinbaren Widersprüche soll daher die numerische Verteilung der Pflanzendurchmesser betrachtet werden. Tabelle 16 zeigt die Verteilung auf die Durchmesserklassen. Es zeigt sich, dass die Pflanzendurchmesserklassen mit höheren Werten auf Fläche 36 stärker vertreten sind, als auf Fläche 35. Dieses schlägt sich auch in dem o.a. leicht höheren Wert des mittleren Pflanzendurchmessers der Fläche nieder. Die Zusammensetzung der Durchmesser der einzelnen Pflanzendurchmesser kann also nicht zur Erklärung der Flächenleistung herangezogen werden.

Tabelle 16: Numerische Verteilung der Pflanzendurchmesser auf den Versuchsflächen 35 (n= 180) und 36 (n= 1.149)

Flächennummer	35	36
< 20 mm	85,56%	82,97%
20-25 mm	10,00%	5,07%
25-30 mm	1,11%	2,62%
30-35 mm	1,11%	2,45%
35-40 mm	0,00%	1,83%
40-45 mm	0,56%	0,96%
45-50 mm	0,00%	0,96%
50-55 mm	0,56%	0,87%
55-60 mm	0,56%	0,35%
60-65 mm	0,00%	0,26%
65-70 mm	0,00%	0,35%
70-75 mm	0,00%	0,09%
75-80 mm	0,56%	0,09%
80-85 mm	0,00%	0,26%
85-90 mm	0,00%	0,17%
90-95 mm	0,00%	0,35%
95-100 mm	0,00%	0,35%
> 100 mm	0,00%	0,00%
mittlerer Pflanzendurchmesser [mm]	12,17	14,06

Die Gegenüberstellung der numerischen Relationen soll im Folgenden zunächst wegen der Vergleichbarkeit für die Daten der Bearbeitung mit zwei Rotoren vorgenommen werden.

Trotz der Unterschiede in Vegetationsstruktur und Phytomasse ist die Flächenleistung bei der Arbeit mit zwei Rotoren sehr ähnlich mit 0,2767 ha/h bzw. 0,2900 ha/h (vgl. Tabelle 15). Die weiteren Relationen zeigt die folgende Tabelle 17.

Tabelle 17: Ausgewählte Relationen der Bearbeitungsdaten von Fläche 35 und Fläche 36

Flächennummer	35	36
Verhältnis Phytomasse	0,7039	1,00
Verhältnis Flächenleistung	0,9541	1,00
flächenspezifischer Kraftstoffverbrauch	0,9695	1,00
Verhältnis Massenstrom	0,6719	1,00
massenstromspezifischer Kraftstoffverbrauch	1,1938	1,00

Die Phytomasse als primär charakterisierendes Merkmal dieser Betrachtung beträgt auf Fläche 35 nur das 0,7039-fache derjenigen von Fläche 36. Die Flächenleistung weicht jedoch, ebenso wie der flächenspezifische Kraftstoffverbrauch, nur gering ab. Der Massenstrom jedoch ist bei der Bearbeitung von Fläche 35 nur das 0,6719-fache desjenigen der Bearbeitung von Fläche 36. Damit ist der korrespondierende spezifische Kraftstoffverbrauch bezogen auf den Massenstrom auf Fläche 35 höher. Der massenstromspezifische Kraftstoffverbrauch steigt jedoch nicht in gleichem Maße, wie der Massenstrom abgenommen hat.

In dem betrachteten Fall ist also für die Tritucap 2 keine eindeutige Aussage zu einem limitierenden Faktor für die Flächenleistung möglich. Die Flächenleistung wird also offensichtlich durch einen nicht klar abzugrenzenden Faktor determiniert.

Einen möglichen Anhaltspunkt bietet das Merkmal „Pflanzenzahl je Hektar“. Der Pflanzenwuchs auf der betrachteten Fläche 36 scheint bei hoher Phytomasse so homogen zu sein, dass sich die Phytomasse auf viele Einzelpflanzen verteilt und damit für die Maschine eine leichtere Bearbeitbarkeit gewährleistet. Doch auch die mit 6,36 % stark abundante Spezies *Phenakospermum guyanense* in Fläche 36 kann einen Erklärungsansatz bieten. Die Raumdichte von *Phenakospermum guyanense* ist mit 0,1672 g/cm³ gemessen worden. Die faserige Pflanze hat einen hohen Wasseranteil und ist nur unwesentlich verholzt. Nach ETTELT (1997) kann die Dichte als Maß für den Bearbeitungswiderstand gesehen werden (vgl. Kapitel 4.1.6.2.3). Danach dürfte eine Pflanze mit so geringer Dichte der Bearbeitung nur geringen Widerstand entgegensetzen.

Da für die Bearbeitung von Fläche 36 mit nur einem Häckselrotor keine Vergleichsdaten vorliegen, können die Ergebnisse der Bearbeitung nur im Vergleich mit der Bearbeitung mit zwei Rotoren auf derselben Fläche dargestellt werden. Ein großer Teil der Fläche 36 von 6.200 m² wurde mit einem Rotor, 3.340 m² wurden mit beiden Häckselrotoren bearbeitet. Die geringere Flächenleistung beim Einsatz der Maschine mit einem Rotor beruht im wesentlichen auf der Halbierung der Arbeitsbreite. Jedoch wird die Flächenleistung nicht um den gleichen Betrag der Arbeitsbreite reduziert (entsprechend 50 % Arbeitsbreite). Die Flächenleistung mit einem Rotor beträgt noch 62,51 % im Vergleich zur Leistung der zweirotorig arbeitenden Maschine. Der Massenstrom nimmt proportional dazu ab. Diese Äquivalenz liegt darin begründet, dass sich die Größe der Bezugsgröße (Stunden Bearbeitungszeit) zwar ändert, nicht jedoch die Daten der Flächenstruktur. Die Ermittlung der mittleren Fahrgeschwindigkeit während des Häckselvorgangs hat für das Häckseln mit der zweirotorigen Maschine 0,63 m/s ergeben, während die mittlere Fahrgeschwindigkeit mit der einrotorig arbeitenden Maschine 0,93 m/s betrug, was einer Steigerung von rund 47,6 % entspricht. Die Fahrgeschwindigkeit bezogen auf die Arbeitsbreite ist also insgesamt zurückgegangen.

Tabelle 18: Arbeitsbreite, Fahrgeschwindigkeit und theoretische Flächenleistung der Tritucap 2 im Betrieb mit Doppel- und Monorotor

Verfahren		**Doppelrotor**	**einfacher Rotor**
Arbeitsbreite	[m]	2,4	1,2
Fahrgeschwindigkeit	[m/s]	0,63	0,93
theoretische Flächenleistung	[m²/s]	1,512	1,116
theoretische Flächenleistung	[ha/h]	0,544	0,402

Die theoretische Flächenleistung ist das Produkt aus mittlerer Fahrgeschwindigkeit und Arbeitsbreite. Sie beträgt beim Betrieb Tritucap 2 mit einem Rotor 73,8 % der Flächenleistung beim doppelrotorigen Betrieb. Es lässt sich daher vermuten, dass die je Rotor verfügbare Traktorleistung einen entscheidenden Einfluss hat, da diese bei Betrieb mit einem Rotor diesem vollständig zur Verfügung steht.

5.3.3 Arbeitsergebnisse AHWI FM 600

Der größte Teil der bearbeiteten Flächen wurde mit dem AHWI- Forstmulcher FM 600 gehäckselt. Um ein zufriedenstellendes Häckselergebnis zu erreichen, mussten in allen Fällen zwei Häckselschritte durchgeführt werden, wobei der erste Schritt aus dem „Fällen“ der Vegetation und der groben Vorzerkleinerung besteht und der zweite Arbeitsschritt aus dem Aufbereiten der am Boden liegenden, vorzerkleinerten Vegetationsdecke, der sog. „Nachzerkleinerung“ (vgl. Kapitel 4.2.3).

Die Anzahl der verschiedenartigen bearbeiteten Flächen macht eine statistische Auswertung der erfassten Daten sinnvoll. Dieses gilt umso mehr, als kein monofaktorieller oder linearer Zusammenhang zwischen der Flächenstruktur und der Arbeitsleistung gefunden werden konnte.

5.3.3.1 Bearbeitung von Flächen mit vorangegangener Struktur-datenerfassung

Von den insgesamt 64 mit der AHWI FM 600 bearbeiteten Flächen, die erfasst wurden, war bei 33 Flächen vorher eine Erhebung der Vegetationsstruktur durchgeführt worden. In der statistischen Auswertung wurde dies berücksichtigt und es wurde zur Erklärung der Zusammenhänge das in Gleichung 4 (Seite 66) beschriebene Modell verwendet (vgl. Kapitel 4.5.3).

Zur Analyse der Zusammenhänge wurden die Pearson’schen Korrelationskoeffizienten für die Korrelation der Merkmale der Flächenstruktur mit den Bearbeitungsdaten errechnet. Dadurch wurde eine positive Korrelation zwischen der Bearbeitungsdauer während des ersten Häckselschritts „Fällen“ und dem mittleren Pflanzendurchmesser offensichtlich. Der Korrelationskoeffizient von 0,76451 ist dabei hochsignifikant ($p< 0,0001$). Der Zusammenhang ist dabei bei Betrachtung des ersten Häckselschritts „Fällen“ deutlicher ausgeprägt, als beim zweiten Häckselschritt, der „Nachzerkleinerung“ (0,66938; $p< 0,0001$).

Der markanteste Zusammenhang besteht aber zwischen der Bearbeitungsdauer und der Flächengröße. Für beide Bearbeitungsschritte ist der Korrelationskoeffizient von 0,85 hochsignifikant ($p< 0,0001$). Dabei unterscheiden sich die Korrelationskoeffizienten für die Bearbeitungsdaten „Bearbeitungsdauer“ und „Kraftstoffverbrauch“ der beiden Bearbeitungsschritte

„Fällen“ und „Nachzerkleinerung“ nur wenig. Bei alleiniger Betrachtung der Korrelationskoeffizienten ist also die Flächengröße stärkste Determinante der Bearbeitungsdauer, gefolgt von der Stärke der zu bearbeitenden Vegetation.

Die varianzanalytische Betrachtung des oben erläuterten Einflussfaktors „Erfahrung“ zu den Bearbeitungsdaten der Flächen (Bearbeitungsdauer, Wendezeiten, Verstopfungszeiten, Kraftstoffverbrauch) hat einen eindeutigen Zusammenhang erkennen lassen. Die Erfahrung hatte hochsignifikant in dem verwendeten linearen Modell (vgl. Gleichung 4) den größten Einfluss auf die Streuung der Bearbeitungsdaten. Das vorliegende Modell hat ein Bestimmtheitsmaß von nahezu 96 %, was jedoch auf die geringe Probenzahl (n= 33) zurückzuführen ist, dem eine relativ große Zahl von fünf Variablen zur Erklärung der Streuung gegenübersteht.
Bei der Betrachtung des Zusammenhangs der „Erfahrung“ mit den botanischen Merkmalen der Flächen ergibt sich ein hochsignifikanter Korrelationskoeffizient von –0,6. Die Varianzanalyse des Einflusses der „Erfahrung“ auf die botanischen Merkmale zeigt, dass mit zunehmender „Erfahrung“ die Merkmale (Durchmesser, Höhe, Phytomasse etc.) geringere Werte annehmen. Mit zunehmender Erfahrung des Fahrers wurden also schwächere Bestände zur Bearbeitung ausgewählt. Der große Einfluss der „Erfahrung“ im statistischen Modell bedeutet im Umkehrschluss also, dass die Stärke der Vegetation (mittlerer Durchmesser, mittlere Höhe, etc.) einen großen Einfluss auf die Bearbeitungsdaten der Maschine hat (vgl. Anhang, Tabelle A- 43 – Tabelle A- 50).

5.3.3.2 Bearbeitung von Flächen mit und ohne vorangegangene Strukturdatenerfassung

Die Flächen, auf denen keine Strukturdatenerfassung durchgeführt wurde, wurden einzig durch die Altersangabe des Bewirtschafters grob beschrieben. Nach den Auswertungen in Kapitel 5.1.3 ist dieses als Anhaltswert aussagefähig.
Bei Betrachtung aller mit der AHWI FM 600 bearbeiteten Flächen (n=64) reduziert sich der Einfluss der Variablen „Erfahrung“ beträchtlich und dem Alter der Sekundärvegetation kommt die tragende Rolle als Einflussfaktor auf die Bearbeitungsleistung zu. Ein reduziertes Bestimmtheitsmaß von 0,71 ist auch Ausdruck der verbreiterten Datengrundlage. Der hochsignifikant hohe Einfluss

des Alters der Brachevegetation auf die Streuung aller Merkmale der Bearbeitungsleistung bestätigt den oben geschilderten Zusammenhang zwischen Flächenleistung und Stärke der Vegetation (Vgl. Anhang, Tabelle A- 51 – Tabelle A- 58).

5.3.3.3 Bearbeitungsleistung der AHWI FM 600

Die Bearbeitung der 64 Untersuchungsflächen mit der AHWI FM 600 haben die in der folgenden Tabelle 19 dargestellten Arbeitsergebnisse ergeben. Hierbei wird sowohl zwischen den jeweiligen Bearbeitungsschritten unterschieden, wie auch ein Gesamtwert für beide Bearbeitungsschritte dargestellt.

Tabelle 19: Mittelwerte, Standardabweichungen und Extrema von Arbeitsergebnissen mit der FM 600

		Mittelwert	Std.-Abw.	Min	Max
Bearbeitete Flächengröße	[ha]	1,04	0,72	0,23	4,03
Brachedauer	[Jahre]	3,95	1,37	2,00	8,00
Flächenleistung erster Schritt	[ha/h]	0,542	0,195	0,203	1,232
flächenspezifischer Kraftstoffverbrauch erster Schritt	[l/ha]	51,46	21,82	17,59	106,27
Flächenleistung zweiter Schritt	[ha/h]	0,776	0,282	0,278	1,850
flächenspezifischer Kraftstoffverbrauch zweiter Schritt	[l/ha]	37,13	12,21	7,50	82,50
Flächenleistung Gesamt	[ha/h]	0,319	0,129	0,155	1,006
flächenspezifischer Kraftstoffverbrauch Gesamt	[l/ha]	88,582	30,727	22,982	169,344

Die Tabelle zeigt, dass Flächen mit einer Brachedauer von 2 bis 8 Jahren (Minimum und Maximum der Brachedauer) bearbeitet wurden, wobei die Flächengröße von 0,23 ha bis 4,03 ha variierte. Es hat sich im Mittel für den ersten Bearbeitungsschritt „Fällen“ eine Flächenleistung von 0,542 ha/h ergeben. Der zweite Bearbeitungsschritt weist mit 0,776 ha/h eine höhere Leistung aus, was darauf zurückzuführen ist, dass bei der nun stattfindenden Zerkleinerung der am Boden liegenden Vegetation praktisch allein die Motorleistung des Traktors begrenzend auf die Flächenleistung ist. Die Fahrgeschwindigkeit während dieses Bearbeitungsschrittes wird nicht durch z.B. das Umfahren von schwierig zu fällender Vegetation beeinflusst. Bei Betrachtung des flächenspezifischen Kraftstoffverbrauchs ergeben sich auch aus diesem Grunde für den ersten Schritt höhere Werte, als für den zweiten.

Als gesamte Flächenleistung der AHWI FM 600 ist unter diesen Bedingungen 0,319 ha/h bei einem Kraftstoffverbrauch von 88,582 l/ha ermittelt worden.

Die Bearbeitung der auf ihre botanischen Merkmale hin untersuchten Flächen ergab die in der folgenden Tabelle 20 dargestellten Ergebnisse. In diese Tabelle fließen ausschließlich die Bearbeitungsdaten der untersuchten Flächen ein.
Für die untersuchten Flächen ist die mittlere Flächengröße etwas geringer, als für die Betrachtung aller bearbeiteten Flächen. Die mittlere Phytomasse der Flächen lag bei 49,94 t/ha mit Extrema von 20 t/ha und 90,6 t/ha. Die Flächenleistung ist für den ersten Bearbeitungsschritt „Fällen“ im Mittel 0,51 ha/h, für den zweiten Bearbeitungsschritt „Nachzerkleinerung“ 0,705 ha/h. Beide Bearbeitungsschritte zusammen ergeben eine Flächenleistung von 0,296 ha/h mit einem flächenspezifischen Kraftstoffverbrauch von 94,05 l/ha.

Tabelle 20: Mittelwerte, Standardabweichungen und Extrema von Arbeitsergebnissen mit der FM 600, Flächen mit vorangegangener Strukturdatenerfassung

		Mittelwert	Std.-Abw.	Min	Max
bearbeitete Flächengröße	[ha]	0,86	0,58	0,23	2,76
Brachedauer	[Jahre]	3,97	1,38	2,00	8,00
Phytomasse	[t/ha]	49,94	14,88	20,06	90,62
Flächenleistung erster Schritt	[ha/h]	0,511	0,166	0,215	0,906
flächenspezifischer Kraftstoffverbrauch erster Schritt	[l/ha]	55,59	25,29	21,56	122,34
massenspezifischer Kraftstoffverbrauch erster Schritt	[l/t]	1,163	0,490	0,309	2,286
mittlerer Massenstrom erster Schritt	[t/h]	33,70	14,36	16,39	73,78
Flächenleistung zweiter Schritt	[ha/h]	0,705	0,206	0,278	1,142
flächenspezifischer Kraftstoffverbrauch zweiter Schritt	[l/ha]	38,46	12,92	20,31	82,50
massenspezifischer Kraftstoffverbrauch zweiter Schritt	[l/t]	0,832	0,318	0,337	1,591
mittlerer Massenstrom zweiter Schritt	[t/h]	41,50	16,80	15,74	75,78
Flächenleistung Gesamt	[ha/h]	0,296	0,077	0,160	0,424
flächenspezifischer Kraftstoffverbrauch Gesamt	[l/ha]	94,05	38,12	41,87	204,84
massenspezifischer Kraftstoffverbrauch Gesamt	[l/t]	1,995	0,808	0,646	3,877

Bei beiden Bearbeitungsschritten ist der Massenstrom durch die Häckselmaschine bei der Nachzerkleinerung höher, als bei dem ersten Schritt. Dieses deutet auf eine insgesamt höhere Fahrgeschwindigkeit während des zweiten Schrittes hin. Insgesamt wird in beiden Arbeitsschritten zusammen ca. 2 Liter Kraftstoff je Tonne gehäckselter Phytomasse verbraucht, wobei beim ersten Schritt ein mit 58,29 % etwas höherer massenspezifischer Verbrauch vorliegt.

5.3.4 Arbeitsergebnisse AHWI RT 350

Die Maschine wurde für das Häckseln von großräumig angelegten Plantagen

konzipiert (vgl. Kapitel 4.2.4). Speziell in Eukalyptusplantagen zur Cellulosegewinnung wird die Maschine eingesetzt, um die nach der Ernte verbliebenen Baumstümpfe zu beseitigen und so die Fläche für die nächste Anbauphase vorzubereiten. Da diese Flächen teilweise bis 45° Hangneigung aufweisen, wurde die Maschine mit einem Raupenkettenlaufwerk ausgestattet. Neben der größeren Spurtreue gerade in Gelände mit starker Neigung sind die Ketten unempfindlicher gegen mechanische Einwirkungen durch Baumstümpfe als gummibereifte Räder. Durch das Raupenkettenlaufwerk ist allerdings die Mobilität der Maschine auf öffentlichen Straßen stark eingeschränkt. Daher wurde sie im Projekt SHIFT-Capoeira ausschließlich auf großen Flächen (4,5 ha und 8,39 ha) mit Vegetation höheren Alters (> 10 Jahre) sowie in einer 25-jährigen Ölpalmplantage eingesetzt. Transporte über längere Distanzen mussten mittels LKW und Tieflader durchgeführt werden.

5.3.4.1 Einsatz in Brachevegetation

Die zwei bearbeiteten Flächen unterschieden sich grundlegend in Ihrer Vegetationsstruktur. Während die in Tabelle 21 aufgeführte Fläche 10 mit 8,39 ha von einer etwa 10 bis 12-jährigen Brachevegetation bewachsen war, war die Vegetation der Fläche 58 eher schon als dichter Wald zu bezeichnen. Die Brachedauer betrug hier mindestens 20 Jahre. Es wurden Strukturdaten auf Fläche 58 erhoben, jedoch nach einer vom üblichen Verfahren stark abweichenden Methode. Statt der üblichen 12 Parzellen je Hektar wurden nur 10 Parzellen auf der gesamten Fläche von 4,5 ha angelegt. Die Stichprobe erscheint daher zu klein und die Daten werden nur bedingt hier angeführt.

Tabelle 21: Daten der Bearbeitung zweier Bracheflächen mit AHWI RT 350

Flächennummer		10	58
Größe	[m²]	83.903	45.093
Brachedauer	[Jahre]	10	20
Ort		Igarapé-Acú	Igarapé-Acú
Hindernis[1]		1	1
Erfahrung[2]		10	26
Phytomasse	[t /ha]	110,76	154,00
mittlere Pflanzenzahl je ha	[1/ ha]	11.497	-[5]
mittlerer Pflanzendurchmesser	[cm]	3,368	17,43[5]
mittlere Pflanzenhöhe	[cm]	430,13	379,87[5]
Flächenleistung Bearbeitung[3]	[ha/h]	0,3455	0,1998
Flächenleistung Gesamt[4]	[ha/h]	0,3329	0,1856
Massenstrom; gehäckselte Masse je Häckselzeit	[t/ h]	36,86	28,59
Massenspezifischer Kraftstoffverbrauch	[l/ t]	0,89	1,36
flächenspezifischer Kraftstoffverbrauch	[l/ha]	98,71	209,15

[1] Merkmalsausprägung „0" bedeutet: keine Hindernisse in der Fläche
[2] ordinales Merkmal: Reihenfolge der Bearbeitung
[3] Flächleistung bei ausschließlicher Berücksichtigung der Häckselzeiten
[4] Flächenleistung bei Berücksichtigung aller Nebenzeiten
[5] Merkmale der Vegetationsstruktur nach vereinfachten Verfahren mit geringerem Probenumfang erhoben

5.3.4.2 Einsatz in einer Ölpalmenplantage

Nach Auskunft des Besitzers der Plantage haben Ölpalmen nach etwa 20 bis 25 Jahren den Zenit ihrer Ertragsfähigkeit überschritten und die Ernte der Fruchtstände wird aufgrund der Wuchshöhe zunehmend aufwändiger. Die Räumung der Flächen vom Palmenbestand gestaltet sich jedoch sehr schwierig, da die Palmen praktisch nur mit schwerem Gerät von der Fläche beseitigt werden können. In der Regel werden schwere Bagger und Raupen eingesetzt, die die Palmen entwurzeln und zum Feldrand transportieren, wo sie aufgeschichtet werden. Eine weitergehende Bearbeitung der Pflanzen findet nicht statt. Dieses aufwändige Verfahren könnte ggf. erheblich verbilligt werden, indem die Palmen an Ort und Stelle gehäckselt werden und die Residuen der Palme eine Mulchdecke bilden, die eine gewisse Nährstoffnachlieferung gewährleisten könnte. Die phytosanitären Effekte eines solchen Verfahrens sind jedoch noch nicht geklärt.

Auf der untersuchten Fläche wurde ausschließlich der Kraftstoffverbrauch und die benötigte Arbeitszeit sowie die Anzahl der gehäckselten Palmen erfasst. Die Fläche war mit etwa 128 Palmen je Hektar bewachsen. Die bearbeitete Fläche betrug 1,631 ha.

Zum Häckseln einer Palme wurde diese durch den Traktor zunächst umgedrückt und dann auf dem Boden liegend der Länge nach gehäckselt. Die Daten der

Bearbeitung werden in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22: Daten der Bearbeitung einer Ölpalmenplantage mit AHWI RT 350

	Versuchsreihe	a	b	c
	Fahrer	1	1	2
Anzahl gehäckselter Palmen	**[1]**	76	78	54
spezifische Arbeitszeit gesamt	**[min/Palme]**	2,20	3,07	3,25
Häckselzeit	**[min/Palme]**	1,71	2,26	2,66
Manöver	**[min/Palme]**	0,23	0,27	0,25
Verstopfungen	**[min/Palme]**	0,03	0,04	0,03
Probleme am Traktor	**[min/Palme]**	0,01	0,27	0,00
Pausenzeiten	**[min/Palme]**	0,23	0,23	0,31
Kraftstoffverbrauch	**[l]**	130	168	126,5
Verbrauch je Palme	**[l/ Palme]**	1,71	2,15	2,34
Verbrauch je Minute	**[l/min]**	0,78	0,70	0,72
Verbrauch je Stunde	**[l/h]**	46,66	42,15	43,22

Es wird auch hier unterschieden zwischen der Zeit für das Häckseln der Palmen, der Zeit für das Anfahren der nächsten Palme, Verstopfungen an der Maschine, Probleme am Traktor (Kühlerreinigung, Ausfall der Klimaanlage etc.) und Zeiten für Pausen des Fahrers.

Es wurden drei Versuchsreihen durchgeführt (a, b, c) wobei zwei verschiedene Fahrer zum Einsatz kamen. Eine Vermessung der Palmen hat nicht stattgefunden, es konnte jedoch rein visuell eine gewisse Homogenität der Pflanzen festgestellt werden.

Für das Umdrücken der Palmen wurden im Schnitt 14,3 Sekunden je Palme benötigt. Die restliche Zeit (88,3 Sekunden Versuchsreihe a; 121,3 Sekunden Versuchsreihe b; 145,3 Sekunden Versuchsreihe c) wurde für das Häckseln der Palmen aufgewendet.

Die Versuchsreihen b und c haben unter feuchten Bedingungen direkt nach einem starken Regen stattgefunden. Vermutlich ist das ein Faktor für die tendenziell etwas höhere Bearbeitungsdauer als unter trockeneren Bedingungen.

Auch im höheren spezifischen Kraftstoffverbrauch je Palme lässt sich dieses ablesen. Davon ausgehend, dass die Fläche mit 128 Palmen/ha bewachsen ist, hat die Bearbeitung eine mittlere Flächenleistung der drei Versuchsreihen von 0,17 ha/h ergeben.

5.4 Häckselqualität

Die Zersetzung der Hackschnitzel hängt entscheidend von ihrer Größe und der Qualität der Aufbereitung ab. Wenig aufbereitete, grobe Holzpartikel, die nicht zerfasert sind und somit wenig Angriffsfläche für die mikrobielle Zersetzung bieten, geben die in ihnen gebundenen Nährstoffe nicht an den Boden ab. Diese Nährstoffe stehen somit den Kulturpflanzen nicht zur Verfügung. Es wird deshalb für den größten Teil der mit den Häckselmaschinen produzierten Hackschnitzeln eine feine Partikelgröße angestrebt, die zudem einen hohen Aufbereitungsgrad , besitzt. Ein Teil der Hackschnitzel sollte größer und weniger aufbereitet für die Dauer der Bewirtschaftung als Deckschicht auf dem Feld verbleiben (vgl. Kapitel 2.1.3.6).

Zur vollständigen Bestimmung der Hackschnitzelqualitäten wurde jeweils eine Probe einer mit der entsprechenden Maschine gehäckselten Fläche entnommen und nach dem in Kapitel 4.3.5 beschriebenen Verfahren den definierten Größen- und Qualitätsklassen zugeordnet.

Zur Probennahme wurden drei Flächen für die Bestimmung der Hackschnitzelqualitäten ausgewählt. Diese wurden als repräsentativ für die normalen Arbeitsbedingungen der jeweiligen Maschine angesehen, so dass die Hackschnitzelqualitäten typische für die jeweilige Maschine sein sollte.

Die folgende Tabelle 23 zeigt die charakteristischen Merkmale der entsprechenden Flächen.

Tabelle 23: Bearbeitete Flächen zur vollständigen Qualitätsbestimmung der Hackschnitzel aller Größenklassen.

Flächennummer		14	1	23
Alter der Brachevegetation	[Jahre]	3	4	5
Lage der Fläche		Sao Joao	Cumarú	Sao Matias
Bearbeitungsmaschine		Tritucap 1	Tritucap 2	FM 600
Phytomasse	[t/ha]	44,44	66,31	35,46
mittlerer Pflanzendurchmesser	[cm]	0,97	2,32	1,11
Mittlere Pflanzenhöhe	[cm]	175,50	266,26	211,98
Mittleres Einzelpflanzenvolumen	[cm³]	426,90	8248,10	541,50
Mittlere Einzelpflanzenmasse	[g]	275,54	2449,38	308,04
Pflanzen je Hektar	[1/ha]	154.444	50.667	88.333

Die durch Siebung in die verschiedenen Größenklassen klassierten Hackschnitzel wurden nach der Größensortierung in die entsprechenden Qualitätsklassen

eingeteilt. Die Größenklassierung wird durch eine Siebung mit Plansieben, die Qualitätsklassierung visuell vorgenommen.

Bei der Siebung wird zunächst die gesamte Stichprobe mit dem Sieb der kleinsten Maschenweite (1 mm) gesiebt. Dieser Schritt dient der Reinigung der Probe von Erdbestandteilen. Danach wird die Probe mit dem Sieb der Maschenweite „7 mm“ gesiebt und die kleinsten Partikel bis 7 mm Größe fallen durch das Sieb hindurch. Diese Partikel sind damit der Größenklasse „bis 7 mm“ zugeordnet. Die auf dem Sieb verbliebene Probe wird dem Sieb mit der Maschenweite „25 mm“ zugeführt und gesiebt, womit der Siebabgang der Größenklasse „> 7 bis 25 mm“ zuzuordnen ist. Der auf dem Sieb verbliebene Siebrest wird dem letzten Sieb mit der Maschenweite „35 mm“ zugeführt. Die Partikel des Siebabgangs gehören der Größenklasse „>25 bis 35 mm“ an. Der Siebrest ist der Größenklasse „> 35 mm“ zugeordnet. Alle Partikel, die auf dem letzten Sieb mit der größten Maschenweite verbleiben bilden also eine Größenklasse. Die Partikel einer Größenklasse werden für die Stichprobe einer Fläche einzeln vermessen und damit wird das Volumen eines jeden Partikels errechnet.

Erst danach werden die Partikel der Qualitätsklassierung unterworfen. Es muss an dieser Stelle betont werden, dass für die Qualitätsklasse „strukturlos“ kein Partikelvolumen ermittelt werden konnte, da keine sinnvollen Messwerte für Durchmesser und Höhe dieser Qualitätsklasse ermittelt werden konnten. Die so klassierten Hackschnitzel wurden damit in der Untersuchung zur Eignung der Siebung nicht mit einbezogen.

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Auswertung für die untersuchten Maschinen vorgestellt. Dabei wird zunächst jeweils die Eignung des angewendeten Siebverfahrens zur Trennung der Größenklassen untersucht, indem die mittleren Volumina der jeweiligen Größenklassen vergleichend gegenüber gestellt werden. Danach werden die Ergebnisse der Größen- und Qualitätsklassierung vorgestellt.

5.4.1 Tritucap 1

Die Eignung des Siebverfahrens wurde durch die Gegenüberstellung der mittleren Hackschnitzelvolumina einer Größenklasse untersucht.

Die folgende Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse der Klassierung der durch

Siebung ermittelten Hackschnitzelklassen für die Tritucap 1. Das Diagramm zeigt, dass die Volumina der Hackschnitzel in den verschiedenen Größenklassen sich eindeutig unterscheiden. Die Siebung ist demnach als Verfahren zur Trennung der Größenklassen geeignet.

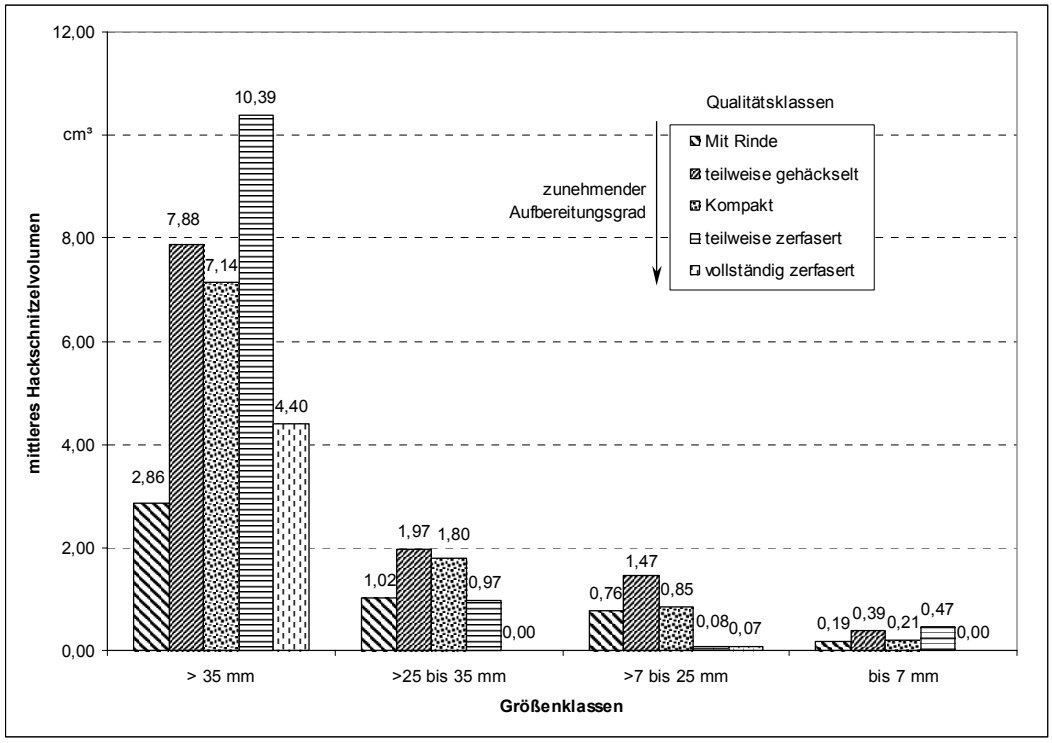


Abbildung 25: Mittlere Partikelvolumina der durch Siebung ermittelten Größenklassen, Bearbeitungsmaschine: Tritucap 1

Die Hackschnitzel der Qualitätsklasse „vollständig zerfasert“ weisen die kleinsten Volumina in fast jeder Größenklasse auf. Dabei ist zu betonen, dass die Partikel dieser Qualitätsklasse in der Regel durch die in alle Richtungen abstehenden Holzfasern sehr sperrig sind trotz ihrer geringen Masse ein hohes Volumen aufweisen. Bei der Siebung verhindert dieses eine Passage durch Siebe geringerer Maschenweite. Damit ist das in Abbildung 25 dargestellte geringe, bzw. nicht vorhandene Volumen zu erklären.

Die Unterschiedlichkeit der Volumina der Partikel der verschiedenen Qualitätsklassen ist in der Größenklasse „> 35 mm“ am größten, da hier alle Hackschnitzel, die das Sieb mit 35 mm Maschenweite nicht mehr passiert haben, aufgeführt sind. Damit fallen also sehr grobe Hackschnitzel genauso dieser Größenklasse zu, wie solche, die nur geringfügig größer sind, als die Maschenweite des Siebes. Die Streuung in den anderen Größenklassen ist geringer, da zuerst die kleinen Größen abgesiebt werden und die größeren

Hackschnitzel den nächstgrößeren Klassen zugeordnet werden. Damit sind die Hackschnitzelgrößen innerhalb einer Klasse bedingt durch das Auswerteverfahren relativ homogen.

Zur Einordnung der Häckselqualität über alle Durchmesserklassen zeigt die Tabelle 24 die prozentualen Anteile aller Hackschnitzel an den Qualitätsklassen.

Tabelle 24: Massenanteile von Hackschnitzeln aller Durchmesserklassen an den definierten Qualitätsklassen, Bearbeitungsmaschine: Tritucap 1

Qualitätsklasse	Massenanteil [%]
mit Rinde	33,00
teilweise gehäckselt	5,06
Kompakt	28,88
teilweise zerfasert	4,54
vollständig zerfasert	1,00
strukturlos	27,51

Demnach machen die Hackschnitzel der Qualitätsklasse „mit Rinde“ den größten Anteil aus, gefolgt von „kompakten“ Hackschnitzeln. Drittgrößte Klasse stellt mit 27,51 % die der „strukturlosen“ Hackschnitzel dar.

Die Zersetzung der Hackschnitzel hängt jedoch wie o.a. nicht nur von ihrer Qualität ab, sondern auch von der Größe des Partikels. Daher wird in der folgenden Abbildung 26 die Verteilung der Hackschnitzelqualitäten auf die Größenklassen dargestellt.

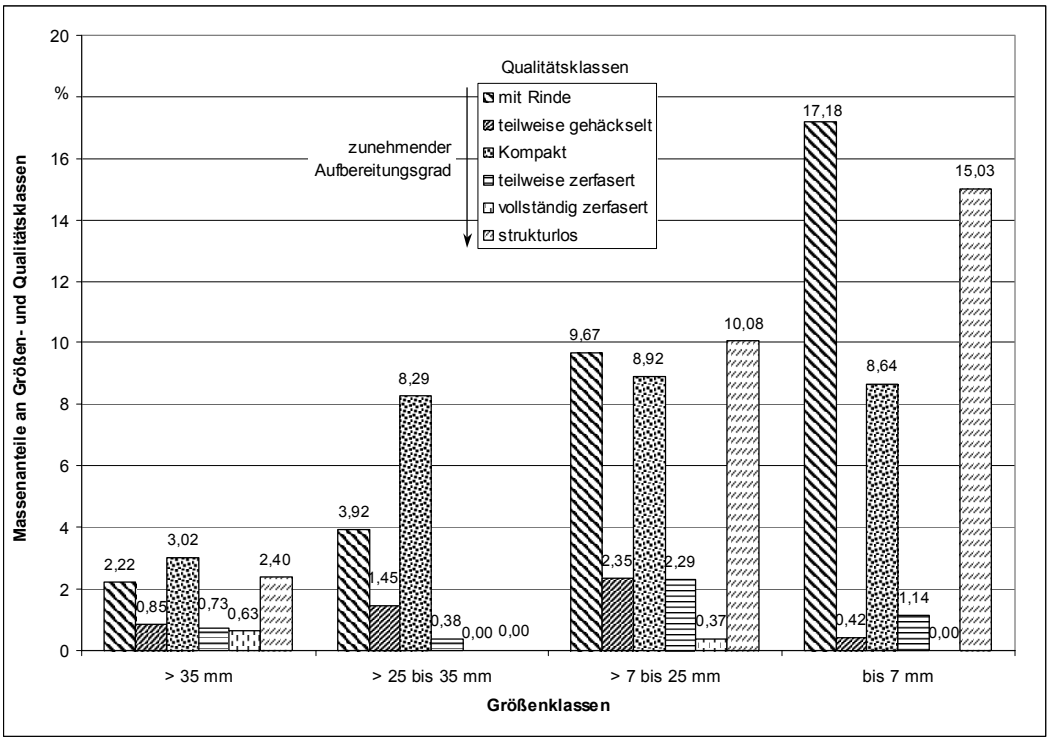


Abbildung 26: Verteilung der Hackschnitzelqualitäten auf die definierten Größenklassen, Bearbeitungsmaschine: Tritucap 1; Bezugsgröße: Masse der Gesamtprobe

In dieser Abbildung zeigt sich, dass die Qualitätsklassierung über alle Klassen allein keine Aussagekraft zur voraussichtlichen Zersetzungsgeschwindigkeit des gehäckselten Materials hat. Die o.a. Qualitätsklassen „mit Rinde“ und „Kompakt“ haben in allen Größenklassen einen hohen Anteil. Der Anteil dieser vermutlich am schlechtesten zersetzbaren Hackschnitzelqualitäten nimmt mit abnehmender Größenklasse zu. Es handelt sich also bei dieser Qualitätsklasse um relativ kleine Partikel. Der relativ hohe Anteil an vermutlich schlecht zersetzbaren Hackschnitzel der Qualitätsklassen „mit Rinde“ und „Kompakt“ stehen in der kleinsten Größenklasse „bis 7 mm“ einem hohen Massenanteil an Hackschnitzeln der Klasse „strukturlos“ gegenüber. Bei dieser Qualitätsklasse kann man davon ausgehen, dass die Zersetzung am schnellsten vonstatten geht. Die Klassen „teilweise gehäckselt“ und „teilweise zerfasert“ haben keine große Bedeutung. Praktisch nicht vorhanden mit nur 1 % der Gesamtmasse der Stichprobe hat die Klasse „vollständig zerfasert“.

5.4.2 Tritucap 2

Im Folgenden ist die Auswertung der mit der Tritucap 2 produzierten Hackschnitzel dargestellt.

Die Gegenüberstellung der Hackschnitzelvolumina der jeweiligen Qualitätsklassen in den Größenklassen zeigt, dass auch hier eine eindeutige Trennung der Hackschnitzelvolumina durch die Siebung möglich ist, da keine Überschneidungen der mittleren Partikelvolumina zwischen den Größenklassen für die jeweiligen Qualitätsklassen auftreten. Dieser Zusammenhang ist grafisch in Abbildung 27 dargestellt.

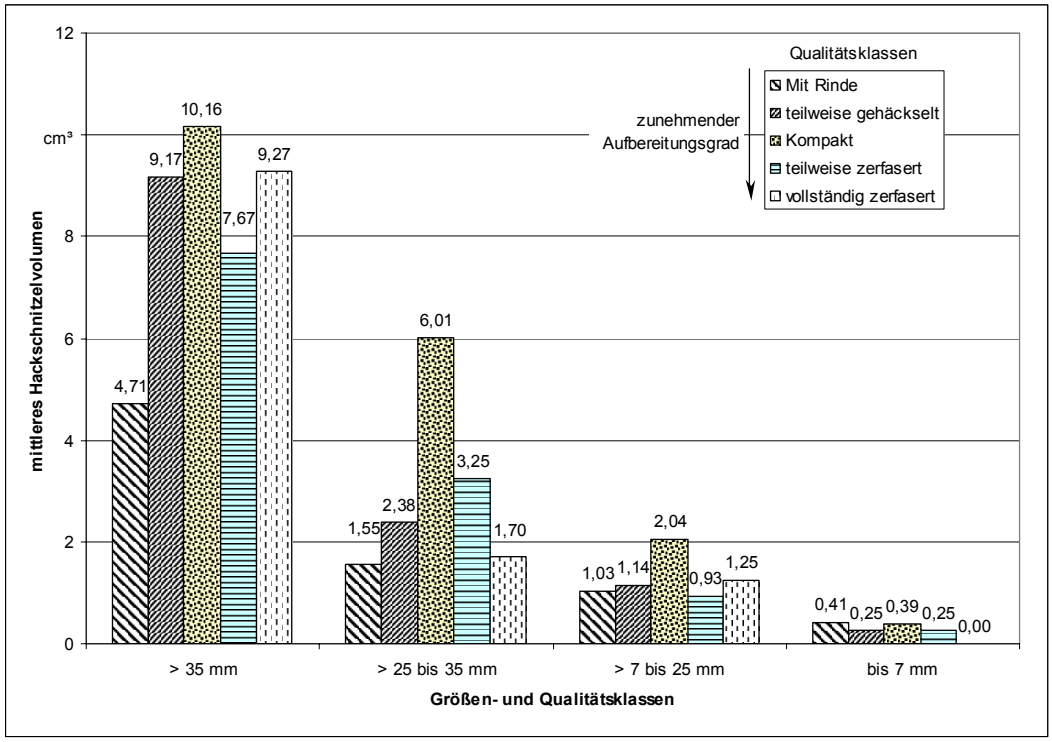


Abbildung 27: Mittlere Partikelvolumina der durch Siebung ermittelten Größenklassen,, Bearbeitungsmaschine: Tritucap 2

Die Zuordnung der Partikel aller Größenklassen zu ihren jeweiligen Qualitätsklassen hat das in Tabelle 25 gezeigte Resultat gehabt.

Tabelle 25: Massenanteile von Hackschnitzeln aller Durchmesserklassen an den definierten Qualitätsklassen, Bearbeitungsmaschine: Tricap 2

Qualitätsklasse	Massenanteil [%]
mit Rinde	13,70
teilweise gehäckselt	10,07
Kompakt	31,47
teilweise zerfasert	7,15
vollständig zerfasert	4,29
strukturlos	33,32

Auffällig ist hier der hohe Anteil an Hackschnitzeln, die als „strukturlos“ klassifiziert wurden. Mit 33,3 % stellen sie neben den als „kompakt“ klassifizierten mit 31,5 % den größten Anteil dar. Die Qualitätsklassen des geringsten Aufbereitungsgrades, „mit Rinde“ und „teilweise gehäckselt“ repräsentieren insgesamt ca. 24 % aller Hackschnitzel. Hingegen die am stärksten aufbereiteten Partikel der Qualitätsklassen „teilweise zerfasert“, „vollständig zerfasert“ und „strukturlos“ stellen fast 45 % der untersuchten Hackschnitzelmasse dar. Im Folgenden werden die Hackschnitzelqualitäten in Abhängigkeit von der Größenklassierung dargestellt.

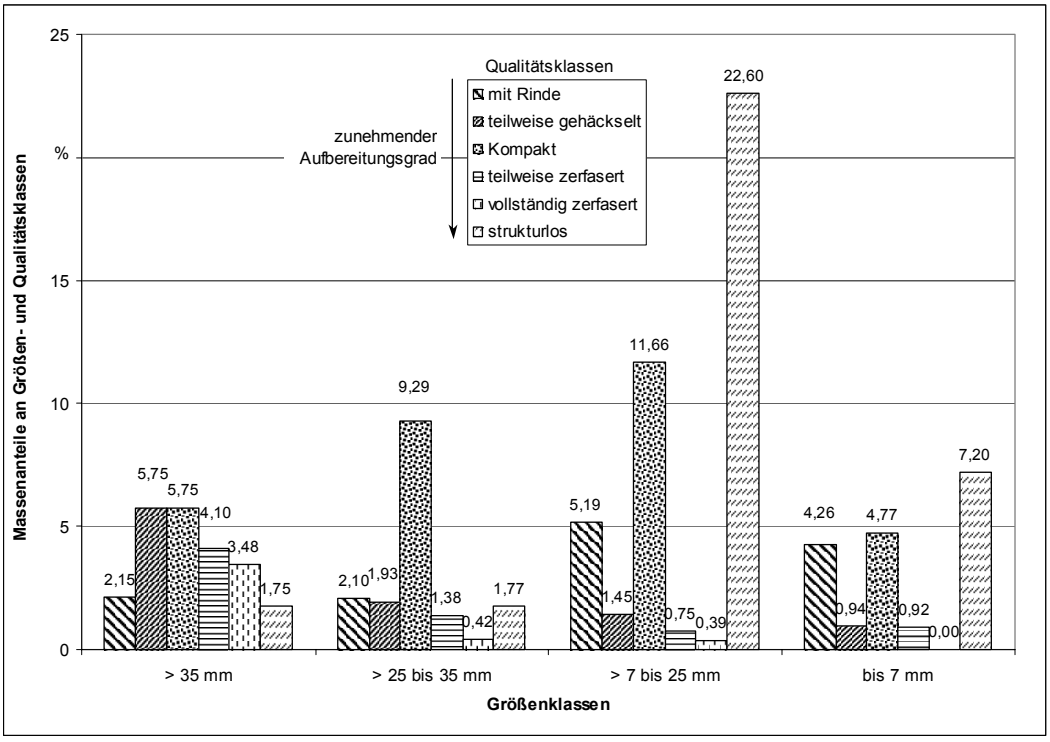


Abbildung 28: Verteilung der Hackschnitzelqualitäten auf die definierten Größenklassen, Bearbeitungsmaschine: Tricap 2; Bezugsgröße: Masse der Gesamtprobe

Der bereits in Tabelle 25 gezeigte hohe Hackschnitzelmassenanteil von 33,32 %

an der Qualitätsklasse „strukturlos“ gehört zu großen Teilen mit 22,6 % der Größenklasse „>7 bis 25 mm“ an, wie in Abbildung 28 dargestellt. Der nächstgrößere Anteil dieser Qualitätsklasse gehört der kleinsten Größenklasse „bis 7 mm“ an. Dieses lässt insgesamt zunächst auf eine starke Aufbereitung des Materials schließen. Trotzdem ist die Qualitätsklasse „kompakt“ in allen Größenklassen mit relativ hohen Massenanteilen vertreten. Die Qualitätsklasse „mit Rinde“ ist ebenfalls in allen Größenklassen vorhanden und die Massenanteile schwanken dabei zwischen minimal 2,10 % („>25 bis 35 mm“) und maximal 5,19 % („>7 bis 25 mm“). Der Anteil an Partikeln dieser Qualitätsklasse ist also in allen Größenklassen auf niedrigem Niveau relativ konstant.

Die Qualitätsklasse „vollständig zerfasert“ ist in den kleineren Größenklassen nicht vertreten. Die Ursachen hierfür liegen, wie bereits in Kapitel 5.4.1 angeführt, weniger in der Aufbereitung des Materials begründet als vielmehr in der Technik der Siebung, die mit abnehmender Siebmaschenweite nur noch „vollständig zerfaserte“ Hackschnitzel geringer Masse passieren lässt.

5.4.3 AHWI FM 600

Die Klassierung der Hackschnitzelqualitäten und –größen wurde bei der AHWI FM 600 für eine Stichprobe vorgenommen, deren Hackschnitzel aus der Bearbeitung mit einer Umfangsgeschwindigkeit der Häckselwerkzeuge von 49,3 m/s (Rotordrehzahl: 1.570 Umdrehungen pro Minute) resultierten.

Die Volumina der mit der AHWI FM 600 produzierten und gesiebten Hackschnitzel ist in Abbildung 29 dargestellt.

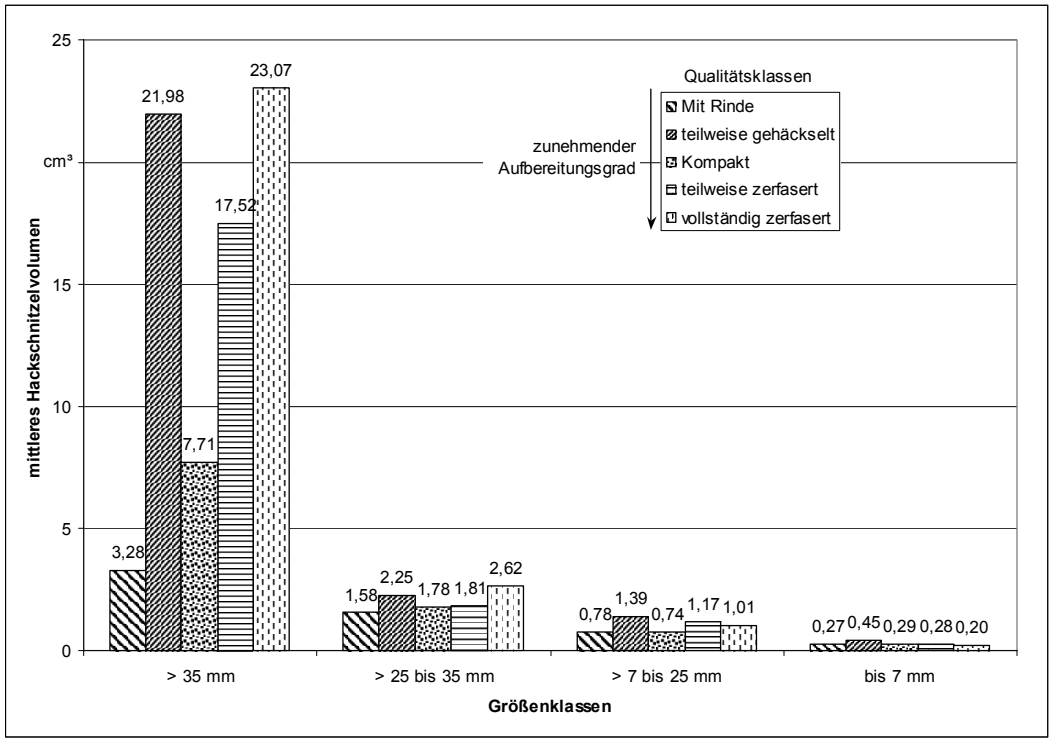


Abbildung 29: Mittlere Partikelvolumina der durch Siebung ermittelten Größenklassen, Bearbeitungsmaschine: AHWI FM 600

Innerhalb der Qualitätsklassen zeigt sich hier ebenfalls eine eindeutige Trennung der Hackschnitzelvolumina durch die Größenklassen. Auffällig ist das sehr hohe Volumen der Hackschnitzel in den Qualitätsklassen der Größenklasse „>35 mm“ im Vergleich zu den kleineren Größenklassen. Neben den wesentlich kleineren Volumina der Partikel der kleineren Größenklassen sind die Unterschiede der Volumina der Qualitätsklassen innerhalb dieser Größenklassen sehr gering.

Die Gegenüberstellung der Massenanteile der Qualitätsklassen aller Größenklassen weist die in Tabelle 26 gezeigten Relationen auf. Die Qualitätsklasse „strukturlos“ weist hier mit 44,56 % den bei weitem größten Massenanteil auf. Die Klasse „Kompakt“ stellt den nächsthöheren Massenanteil mit 25,79 % der Gesamtmasse der Probe.

Tabelle 26: Anteile von Hackschnitzeln aller Durchmesserklassen an den definierten Qualitätsklassen, Bearbeitungsmaschine: AHWI FM 600

Qualitätsklasse		Massenanteil [%]
mit Rinde	[%]	8,82
teilweise gehäckselt	[%]	6,36
Kompakt	[%]	25,79
teilweise zerfasert	[%]	3,39
vollständig zerfasert	[%]	11,08
strukturlos	[%]	44,56

Die Darstellung der Aufteilung der Partikelqualitäten in die zugehörigen Größenklassen ist in der folgenden Abbildung 30 dargestellt.

Die Qualitätsklasse „mit Rinde“ ist in allen Größenklassen mit nur geringen Anteilen relativ gleichmäßig vertreten, wobei der Anteil mit abnehmender Partikelgröße (Größenklasse) leicht ansteigt. Die Massenanteile der Qualitätsklasse „teilweise gehäckselt“ und „teilweise zerfasert“ nehmen kontinuierlich mit kleiner werdender Größenklasse ab. Auffällig in dieser Abbildung ist der Anteil an „vollständig zerfaserten“ Hackschnitzeln in der größten Durchmesserklasse, wobei diese Qualität in den anderen Größenklassen nur gering oder gar nicht repräsentiert ist. Dieses ist auf die in Kapitel 5.4.1 geschilderten Zusammenhänge zurückzuführen, dass die Hackschnitzel sehr sperrig sind und kleine Maschenweiten bei der Siebung nicht passieren.

Mit abnehmender Partikelgröße (Größenklasse) steigt der Anteil an „strukturlos“ klassierten Hackschnitzeln stark an.

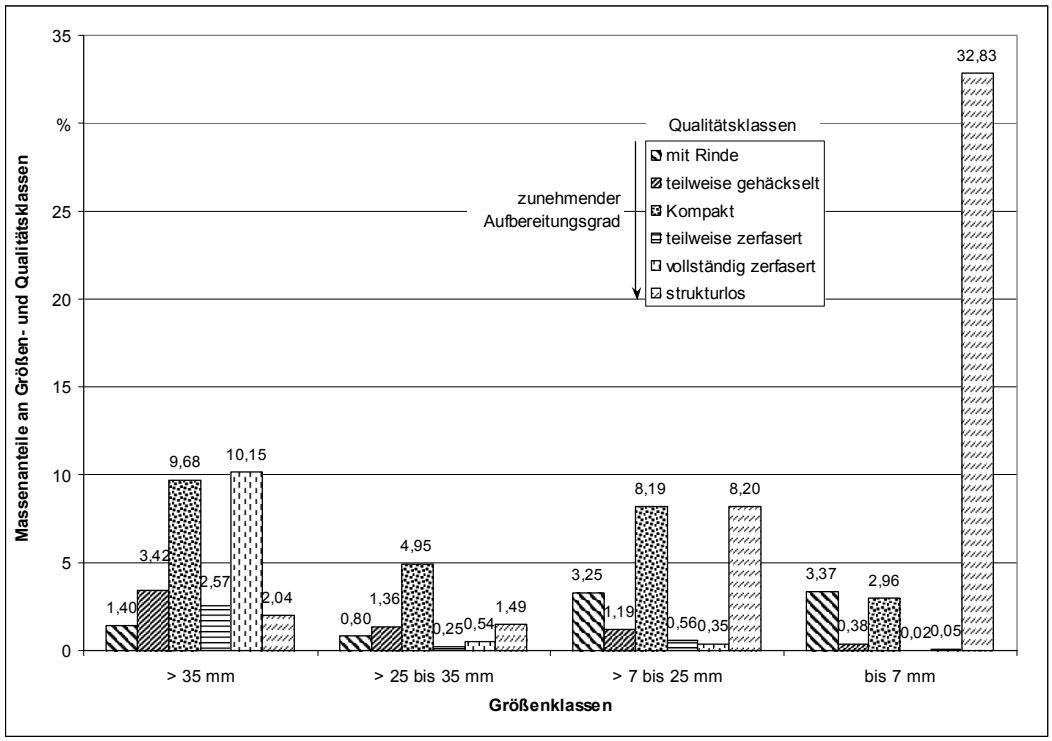


Abbildung 30: Verteilung der Hackschnitzelqualitäten auf die definierten Größenklassen, Bearbeitungsmaschine: AHWI FM 600; Bezugsgröße: Masse der Gesamtprobe

Während der Versuchsreihen wurde das zentrale Getriebe der AHWI FM 600 ausgetauscht, was eine Reduktion der Drehzahl der Häckselrotors von 1.570 U/min auf 1.000 U/min zur Folge hatte. Der Effekt der Drehzahl des Rotors auf die Qualität der Hackschnitzel stellt sich in der folgenden Abbildung dar.

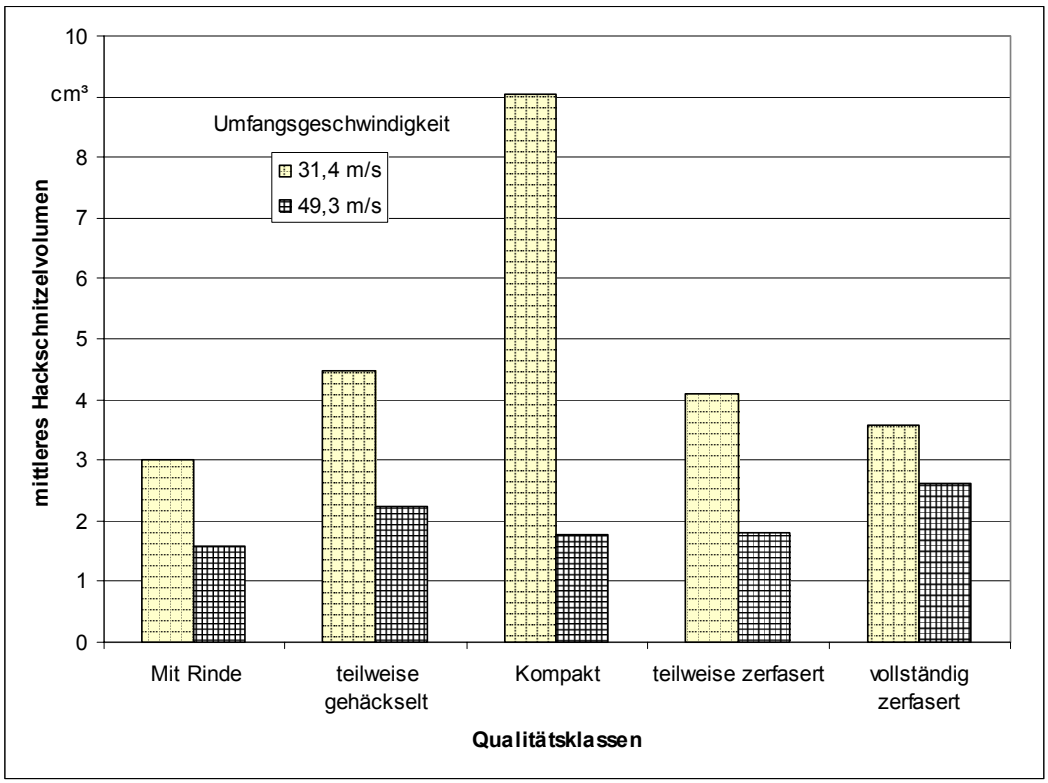


Abbildung 31: Hackschnitzelvolumina in den Größenklassen in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit der Häckselwerkzeuge bei Forstmulcher AHWI FM 600

Die Abbildung 31 zeigt deutlich, dass bei höherer Drehzahl des Häckselrotors bzw. höherer Umfangsgeschwindigkeit der Häckselwerkzeuge im Mittel relativ kleinere Hackschnitzelvolumina produziert werden. Besonders deutlich ist dabei die Abnahme des Partikelvolumens in der Qualitätsklasse „Kompakt“ bei höherer Umfangsgeschwindigkeit. Die höhere Umfangsgeschwindigkeit der Häckselwerkzeuge führt erwartungsgemäß zu einer stärkeren Zerkleinerung des Materials. Auf nähere Zusammenhänge soll im Diskussionsteil dieser Arbeit eingegangen werden.

5.5 Drehmoment und Drehzahl

Die Messungen von Drehmomenten und Drehzahlen während der Häckselarbeit konnten technisch nur an der Tritucap 2 und der AHWI FM 600 durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Messungen sollen hier exemplarisch an einem Häckselvorgang auf zwei Flächen dargestellt werden.

In der nachfolgenden Tabelle 27 sind die auf den Versuchsflächen 23 und 35 für die jeweilig verwendete Maschine gemessenen Daten abgetragen.

Tabelle 27: Gegenüberstellung der gemessenen Drehmomente, Drehzahlen, Leistungen und Energien in Abhängigkeit von der Bearbeitungsmaschine

Flächennummer		**35**	**23**	**23**
Bearbeitungsmaschine		Tritucap 2	FM 600 1. Schritt	FM 600 2. Schritt
Phytomasse	[t/ha]	41,58	35,46	35,46
Brachedauer	[Jahre]	3	5	5
Flächengröße	[ha]	0,2689	0,6600	0,6600
Flächenleistung	[ha/h]	0,2767	0,4622	0,7242
Massenstrom	[t/h]	11,51	16,39	25,68
Mittleres Drehmoment	[Nm]	701,38	511,92	918,29
Maximales Drehmoment	[Nm]	2929	2882	2888
Standardabweichung Drehmoment	[Nm]	396,86	349,65	338,58
Mittlere Drehzahl	[1/min]	958,81	999,18	900,6
Standardabweichung Drehzahl	[1/min]	92,99	77,12	151,3
Mittlere Leistung	[kW]	66,53	53,56	88,33
Maximale momentane Leistung	[kW]	295,39	298,38	279,91
Standardabweichung Leistung	[kW]	28,73	30,44	20,62
für die Fläche aufgewendete Energie	[kWh]	64,65	72,68	80,50
flächenspezifischer Energieaufwand	[kWh/ha]	240,44	232,10	
Gesamtenergieaufwand je t gehäckselter Phytomasse	[kWh/t]	5,78	6,55	

Die Daten für Drehzahl und Drehmoment sowie die zugehörigen Standardabweichungen sind aus den Messdateien ermittelt worden, indem der Mittelwert der Messwerte über das Zeitintervall von einer Sekunde gebildet wurde. Es wurde jeweils die bearbeitete Fläche als Einheit zur Auswertung betrachtet. Bezugsgröße für die energetische Auswertung ist die jeweils vollständig bearbeitete Fläche, d.h. für die Tritucap 2 ist eine Überfahrt, mit der AHWI FM 600 zur vollständigen Bearbeitung zwei Überfahrten notwendig. Mit der Tritucap 2 wurde eine dreijährige Brachevegetation mit 41,58 t/ha Phytomasse bearbeitet, mit der AHWI FM 600 eine fünfjährige Brachevegetation mit 35,46 t/ha Phytomasse. Bei der Bearbeitung mit der FM 600 wurden beide Bearbeitungsschritte, bestehend aus „Fällen“ und „Nachzerkleinerung“ durchgeführt. Die Flächenleistung der einzelnen Schritte ist zwar jeweils wesentlich größer, als für die Tritucap 2. Insgesamt ergibt sich aus den beiden Schritten mit 0,4622 bzw. 0,7242 ha/h (entsprechend 2,1636 h/ha + 1,3808 h/ha= 3,5444 h/ha)eine Flächenleistung von 0,2821 ha/h, die damit noch geringfügig höher ist, als für die Tritucap 2 mit 0,2767 ha/h.

Während der Massenstrom für die Tritucap 2 bei 11,5 t/h liegt, ist er für die

AHWI FM 600 im ersten Schritt 16,39, im zweiten Schritt sogar 25,68 t/h. Dieses spiegelt den in Kapitel 5.3.3.3 geschilderten Zusammenhang wider, nach dem der zweite Bearbeitungsschritt größere Flächenleistungen, als der erste aufweist.
Entsprechend dem höheren Massenstrom im zweiten Schritt sind auch die mittleren Drehmomente höher. Einem im Mittel 55,7 % höheren mittleren Drehmoment steht ein 63,8 % höherer Massenstrom gegenüber. Diese höheren Drehmomente resultieren in einer niedrigeren mittleren Drehzahl, die von 999,18 U/min auf 900,6 U/min gesunken ist. Die Standardabweichungen der Drehzahl sind im zweiten Schritt nahezu doppelt so hoch, wie im ersten Schritt, was auf eine erhebliche Belastung der Häckselmaschine mit stark variierenden Drehzahlen hindeutet. Beleg dafür ist die wesentlich höhere mittlere Leistung im zweiten Schritt.
Der Betrag des mittleren Drehmoments der Tritucap 2, wie auch der der mittleren Drehzahl und der mittleren Leistung liegt in etwa zwischen den Werten für den ersten und zweiten Bearbeitungsschritt der FM 600. Die Standardabweichung des mittleren Drehmoments liegt etwas unter der für die FM 600 im ersten Schritt.
Für die Tritucap 2 wurde ein flächenspezifischer Energieaufwand von 240,44 kWh/ha für das Häckseln der untersuchten Fläche 35 ermittelt. Da in der Regel mit der AHWI FM 600 zwei Bearbeitungsschritte durchgeführt werden, wird der Energieaufwand der beiden Bearbeitungsschritte berücksichtigt. Damit ergibt sich ein flächenspezifischer Energieaufwand von 232,10 kWh/ha für die AHWI FM 600 für die Bearbeitung der Fläche 23.

Wie bereits aus den in Tabelle 27 aufgeführten mittleren Drehmomenten und den zugehörigen Standardabweichungen ersichtlich, scheint es Unterschiede in der Betriebscharakteristik der jeweiligen Maschinenbauart zu geben.
Die Betrachtung der in den folgenden Abbildungen gezeigten Drehmoment-, Drehzahl- und Leistungsverläufe über der Zeit zeigt klare Unterschiede in der Charakteristik der jeweiligen Maschinen. Es wird zur Verdeutlichung nur ein kleiner zeitlicher Ausschnitt von jeweils 7 Sekunden dargestellt, in denen die Maschinen an der oberen Grenze der Traktorleistung arbeiten. Zunächst werden die Kurvenverläufe für die Tritucap 2 in der folgenden Abbildung 32 dargestellt.

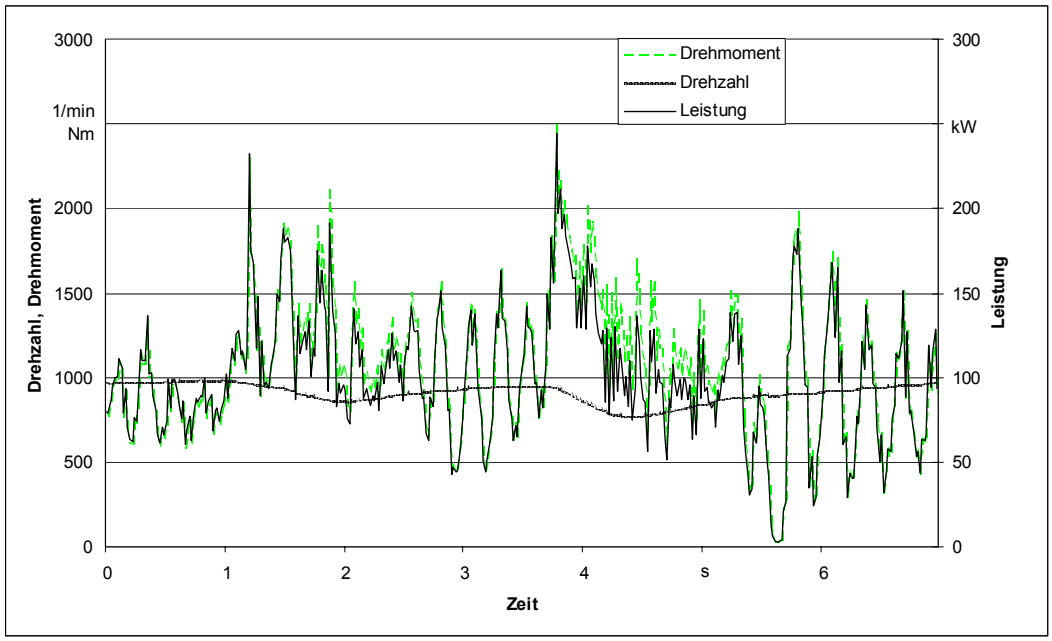


Abbildung 32: Drehmoment-, Drehzahl- und Leistungsverläufe während eines Häckselvorganges mit der Tritucap 2 über den Zeitraum von 7 Sekunden

Zunächst ist auffällig, dass der Verlauf der Leistungskurve in etwa dem der Drehmomentkurve entspricht. Da die Leistung ein Produkt aus Drehzahl und Drehmoment ist, ist dies mit der relativ konstanten Drehzahl zu erklären. Daher soll als Charakteristikum im Folgenden nur noch auf den Verlauf der Leistungskurve eingegangen werden.

Ab Sekunde 1 ist ein sprunghafter Anstieg der gemessenen Leistung zu verzeichnen, die weit über die maximal verfügbare Leistung des Traktors von 120 kW hinausgeht. Am Drehzahlverlauf ist zu sehen, dass diese leicht verzögert abfällt. Die Belastung der Maschine bleibt bestehen und die Leistungskurve hat insgesamt einen gezackten Verlauf, der durch viele hohe Spitzen gekennzeichnet ist. Etwa bei Sekunde 5,5 sinkt die Leistung auf einen Wert nahe Null (3,3 kW). Es handelt sich offensichtlich um einen Lastwechsel, bei dem der Antrieb kurzfristig entlastet wurde.

Bei Betrachtung der entsprechenden Verläufe für die AHWI FM 600 ergibt sich das in Abbildung 33 dargestellte Bild. Bei Sekunde 1 wird die Belastung der Maschine höher, die Drehmoment- und Leistungskurve steigen gemeinsam an. Hier werden mit 262 kW Werte weit über der maximalen Leistung des Traktors erreicht.

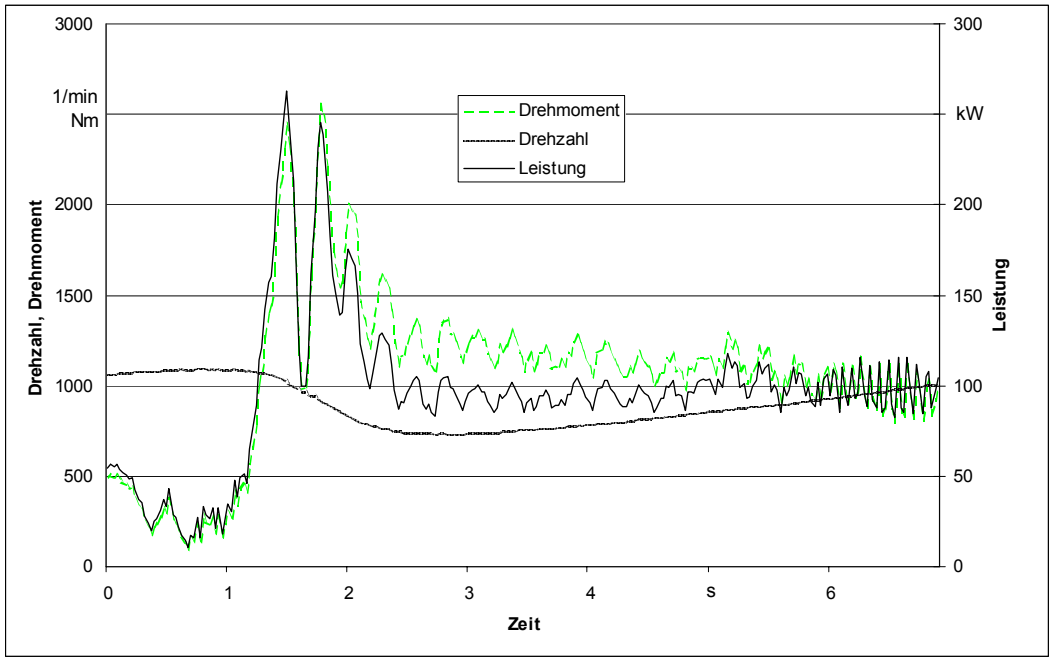


Abbildung 33: Drehmoment-, Drehzahl- und Leistungsverläufe während eines Häckselvorganges mit der AHWI FM 600 über den Zeitraum von 7 Sekunden

Die Leistungskurve flacht bei Sekunde 2 wieder ab und schwingt im Bereich um 100 kW. Die Drehzahl der Zapfwelle steigt jedoch leicht an, während die Drehmomente leicht zurückgehen. Die Drehzahlsteigerung ist im Vergleich zum Drehmomentabfall etwas stärker ausgeprägt und damit steigt die Leistung ebenfalls leicht an. Auch hier ist ein leicht gezackter Verlauf der Leistungslinie zu sehen, der jedoch lange nicht die Schwankungsbreite, wie bei der Tritucap 2 erreicht.

Die Kurvenverläufe der beiden Maschinen sind also, wie gezeigt, sehr unterschiedlich. Bei der Tritucap 2 spielen offensichtlich Lastwechselmomente eine große Rolle, während der Drehmomentverlauf bei der FM 600 gleichmäßiger ist.

Auf näheres hierzu wird in der folgenden Diskussion eingegangen.

6 Diskussion

Ziel dieser Arbeit war zum Einen die Anpassung der untersuchten Maschinen an die Gegebenheiten tropischer Brachevegetation. Zum Anderen wurde das Betriebsverhalten unter diesen Bedingungen dokumentiert und Arbeitsergebnisse im Zusammenhang mit der zu bearbeitenden Vegetation ermittelt. Hierzu wurden zunächst die charakteristischen Merkmale der zu bearbeitenden Flächen untersucht.

6.1 Struktur und Phytomasse der Flächen

Zur Charakterisierung der zu bearbeitenden Flächen wurden die Merkmale „mittlerer Pflanzendurchmesser“, „mittlere Pflanzenhöhe“, Phytomasse der Fläche, Wuchsform der Pflanzenspezies und Dichte der Pflanzenspezies untersucht. Da Methoden zur zerstörungsfreien Erhebung der Phytomasse mit Hilfsgrößen (z.B. Blattflächenindex) nicht zur Verfügung standen, wurde die stichprobenartige Erhebung dieser Daten vorgenommen. Dieser vorbereitende Schritt durfte jedoch nicht so stark in die Struktur der Fläche eingreifen, dass er das Arbeitsergebnis der Bearbeitung verfälscht hätte. Daher wurden nur wenige Parzellen je Hektar zufällig verteilt angelegt, von denen auf die Phytomasse und Struktur der gesamten Fläche geschlossen wurde. Natürliche Schwankungen innerhalb der Flächen wurden durch die zufällige Anlage der Untersuchungsparzellen versucht zu eliminieren.

Die hohe Differenz zwischen Minima und Maxima der erhobenen Vegetationsmerkmale sowie die hohen Standardabweichungen der Mittelwerte weisen auf die Heterogenität der untersuchten Pflanzengesellschaften hin.

Bei der Auswertung der Wuchsformen der Pflanzen fällt auf, dass die Klasse „Grasartig“ mit nur 0,01 % aller untersuchter Pflanzen repräsentiert ist. In einem Datensatz von insgesamt 29.401 Pflanzen wurden nur drei erfasst, auf die das Attribut „Grasartig“ zutrifft. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zum Einen die grasigen Pflanzenspezies, gerade in Brachevegetation längerer Brachedauer, durch die holzigen, höherwüchsigen Spezies zurückgedrängt werden. Zum Anderen werden grasartige Pflanzen aufgrund ihres tendenziell geringen Durchmessers nur selten erfasst, da die Grenze für die Erfassung von Pflanzen bei

einem Mindestdurchmesser von 1 mm angesetzt wurde.

Die Klasse „Grasartig“ spielt damit in der Auswertung der botanischen Merkmale der Flächen keine Rolle. Außerdem ist davon auszugehen, dass der Einfluss grasiger Pflanzen auf das Arbeitsergebnis der untersuchten Maschinen von untergeordneter Bedeutung sein dürfte.

Die Ergebnisse der Varianzanalyse zeigen, dass sich die Flächen durch die erhobenen Merkmale charakterisieren lassen und sich hochsignifikant voneinander unterscheiden.

Die hohe Korrelation von Pflanzendurchmesser, Pflanzenhöhe mit der gemessenen Phytomasse wird durch die in der Literatur beschriebenen sogenannten „allometrischen Formeln“ bestätigt, die jedoch überwiegend spezifisch für einzelne Spezies angewendet wurden. Hierbei wird, ausgehend von Brusthöhendurchmesser (BHD) und Wuchshöhe die Masse der untersuchten Spezies mit hohen Bestimmtheitsmaßen und geringem Fehler errechnet [OVERMANN ET AL. 1994; HIGUCHI ET AL. 1998; NELSON ET AL. 1999].

Die so gefundenen Zusammenhänge wurden in einem nächsten Schritt der statistischen Auswertung auf den Zeitraum bezogen, in dem die Sekundärvegetation ungehindert aufwachsen konnte. Dieses wurde als „Alter“ der Brachevegetation definiert und hat in der Varianzanalyse hauptsächlich auf die Faktoren „mittlere Masse der Einzelpflanze“, „mittlerer Durchmesser“ und „mittlere Höhe“ der untersuchten Pflanzen einen hochsignifikanten Einfluss, wobei das Bestimmtheitsmaß des statistischen Modells für den Einfluss auf die „Masse der Einzelpflanze“ mit knapp 93 % am höchsten ist. Man kann also die Flächen auch stark vereinfacht durch das Alter der Brachevegetation beschreiben. Den schwächsten, wenn auch hochsignifikanten Einfluss hat das Alter der Fläche auf die gemessene Phytomasse. Das deutet auf die starke Unterschiedlichkeit der Phytomasse bei Flächen gleichen Alters hin. Die Phytomasse allein reicht also nicht zur Charakterisierung der Flächen aus. Dabei ist hervorzuheben, dass die stichprobenartige Erhebung der Phytomasse die einzige praktikable Möglichkeit der Phytomassebestimmung in dieser Arbeit darstellte, die unter Umständen stark von den realen Verhältnissen abweichen kann. Zur genauen Bestimmung dieses Zusammenhanges müsste also eine vollständige Phytomasseerhebung der gesamten Fläche erfolgen, wobei dann wiederum kein anschließender Bearbeitungsschritt mehr stattfinden kann.

Der vermutete Zusammenhang zwischen der örtlichen Lage der Fläche und einem Einfluss auf die untersuchten Merkmale konnte nicht durch die Daten nachgewiesen werden. Es lässt sich jedoch ein Unterschied in der floristischen Komposition der Flächen verschiedener Orte vermuten, der durch eine Untersuchung der Zusammensetzung der Spezies in den Flächen nachgewiesen werden könnte.

6.2 Raumdichte der untersuchten Spezies

Die Schwankungen der Raumdichte der Pflanzen innerhalb der Spezies können erheblich sein, abhängig vom Alter der Pflanze und den weiteren Wachstumsbedingungen, z. B. Lichteinfall und Regenverfügbarkeit. Die Erhebung der Daten zur Raumdichte einzelner Spezies wurde daher nur auf zwei verschiedenen Flächen durchgeführt. Daher ist davon auszugehen, dass die untersuchten Pflanzen unter relativ homogenen Bedingungen, was Bodenqualität und Wasserversorgung angeht, gewachsen sind. Da jedoch zum einen die Bodengüte wie auch die Wasserversorgung innerhalb einer Fläche variieren kann, der Lichteinfall jedoch mit ziemlicher Sicherheit homogen sein kann, ist bei den Spezies, für die mehrere Proben entnommen werden konnten, eine erhebliche Schwankungsbreite der Raumdichte von bis zu 40 % ermittelt worden. Daher wurden die gewonnenen Daten, soweit möglich, mit Daten aus der Literatur verglichen (z. B. FEARNSIDE (1997), FAO (1999)).

Unabhängig davon weisen die Spezies untereinander teilweise erheblich Unterschiede in ihrer Raumdichte auf. Diese sind zum Einen durch die physiologischen Eigenschaften der Pflanze, zum Anderen durch die o.a. Wachstumsfaktoren beeinflusst [HARZMANN 1988]. Die folgende Tabelle 28 zeigt beispielhaft die gemessenen und die in der Literatur angegebenen Werte für die Raumdichte ausgewählter Pflanzenspezies.

Tabelle 28: Raumdichten ausgewählter Pflanzenspezies (Quelle: eigene Messungen, Fearnside (1997), FAO (1999))

	Raumdichte [g/cm³]		
Pflanzenspezies	eigene Messung	Fearnside (1997)	(FAO (1999)
Byrsonima spicata	0,62	0,61	0,61
Couratari guianensis	0,60	0,54	0,50
Dipteryx odorata	0,82	0,93	0,86
Enterolobium schomburgkii	0,75	0,78	0,82
Inga alba	0,51	0,62	0,53
Lecythis lurida	0,57/ 0,60/ 0,67/ 0,98	0,83	-
Lueheopsis duckeana	0,62	0,62	0,64
Rollinia exsucca	0,55/ 0,72	0,52	0,32
Sacoglottis guianensis	0,79	0,77	-
Schefflera morototoni	0,43	0,41	0,40
Spondias mombin	0,31	0,38	0,40
Tapirira guianensis	0,61	0,50	0,47

Die Tabelle enthält hauptsächlich die Datensätze, für die sowohl eine eigene Messung durchgeführt wurde, als auch Angaben in den verwendeten Literaturquellen vorhanden waren. Im Fall der Spezies *Byrsonima spicata* lässt sich ein praktisch identischer Wert der Raumdichte über alle drei Quellen ablesen. Dieses gilt in ähnlicher Weise für die folgenden Spezies, wobei eine Abweichung von 0,1 g/cm³ als sehr gering einzustufen ist [AGUIAR 2002]. Für die eigenen Messungen der Spezies *Lecythis lurida* ergeben sich jedoch höchst unterschiedliche Werte. Der Betrag der Raumdichte liegt dabei zwischen 0,57 g/cm³ und 0,98 g/cm³, wobei nach der Definition von HARZMANN (1988) 0,57 g/cm³ als „mittelmäßige Dichte“ und 0,98 g/cm³ als „hohe Dichte“ zu werten ist. Der von FEARNSIDE (1997) ermittelte Wert für diese Spezies ist mit 0,83 g/cm³ ebenfalls der Gruppe mit „hoher Dichte“ zuzuordnen. Noch auffälliger ist die Abweichung jedoch bei der Pflanze *Rollinia exsucca*, wo der erste Wert der eigenen Messung mit 0,55 g/cm³ in etwa dem von FEARNSIDE (1997) entspricht (0,52 g/cm³), die von der FAO (1999) ermittelte Raumdichte mit 0,32 g/cm³ jedoch erheblich abweicht und nach HARZMANN (1988) der Gruppe der Pflanzen mit „geringer Dichte“ angehört.

Es lässt sich also eine gewisse Schwankung in den Werten für die Raumdichten der Spezies untereinander ebenso wie innerhalb einer Spezies feststellen. Tendenziell stimmen die Daten der Literatur aber mit den im Feld erhobenen Daten überein. Die Daten wurden ausschließlich zur Errechnung der Masse der Einzelpflanzen herangezogen, und fließen so in die statistische Auswertung ein.

6.3 Ergebnisse der Arbeit mit den Häckselmaschinen

Bei der Entwicklung einer völlig neuartigen Häckselmaschine zur Bearbeitung der Sekundärvegetation der Zona Bragantina stand in der Zeit von 1996 bis 2000 die Anpassung der neuen Technologie an die Vegetation und die infrastrukturellen Verhältnisse im Vordergrund. Die mit dem doppelrotorigen Tritucap-Häcksler während der ersten Tests 1997 gewonnenen Daten wurden 1999 zu einer ersten Weiterentwicklung des Prototypen verwendet und haben in weiteren Tests gezeigt, dass die Maschine eine Alternative zur Brandrodungswirtschaft darstellen kann. Der zweite getestete Maschinentyp ist die Forstmulchfräse AHWI FM 600, die als Serienmaschine vergleichend getestet wurde.

6.3.1 Tritucap-Häcksler

6.3.1.1 Häckselorgane

Die Modifikationen, die zum Prototypen der Version 1.2 führten, wurden getestet, und es zeigten sich schnell Schäden an den Sägezähnen, die nur durch den Austausch der betroffenen Zähne behoben werden konnten.

Die offensichtlich geringe Torsionssteifigkeit der 6 mm starken Sägeblätter wurde durch den Einbau stärkerer Sägeblätter in Version 1.3 verbessert, wodurch sich die Beschädigung der Zähne vermeiden ließ.

Der Vorteil des Einsatzes von Dehnungsfugen hat sich bei den eingesetzten Sägeblättern schnell an der geringeren Erwärmungsneigung der Sägeblätter im Vergleich zur Version 1.0 und 1.1 beim Einsatz gezeigt. Auch dadurch konnte das Festbrennen von Pflanzensaft auf den Blättern verhindert werden. Die in Version 1.2 verwendeten Räumschneiden in Kombination mit den Dehnungsfugen haben jedoch offensichtlich die Struktur des Sägeblattes so nachhaltig geschwächt, dass dieses dann letztendlich zum Bruch des Blattes führte. Daher wurde in Version 1.3 auf den Einsatz von Räumschneiden im Sägeblatt verzichtet. Es musste befürchtet werden, dass der Materialtransport in der Maschine sich dadurch verschlechtern würde, was sich jedoch nicht bestätigt hat. Die Einflussfaktoren des Materialtransports innerhalb der Maschine konnten durch eine Versuchsreihe ermittelt werden, in der sämtliche Komponenten, die den Materialfluss unterstützen könnten, entfernt und sukzessive wieder angebaut wurden. Dabei hat

sich die Materialannahme verändert. Als Ergebnis dieser Untersuchung konnte der Schärfegrad der Schnecke als Haupteinflussfaktor des Materialtransports ermittelt werden, die weiteren Komponenten (Mitnehmerplatten, Auswerfer) haben allenfalls unterstützende Wirkung. Sowohl für die Versionen Tritucap 1.3 wie auch 2.0 konnte dieser Zusammenhang festgestellt werden.

Die Schnecke als zentrales Element der Materialzerkleinerung wurde selbstschärfend konzipiert (vgl. Kapitel 4.2.1.5). Der vorgesehene Effekt der Selbstschärfung der Schnecke wird dabei durch die Kombination eines zähen Trägermaterials mit einem härteren Material, das unter dem Schneckengang aufgeschweißt wird, erreicht. Diese sogenannte „Aufpanzerung“ führt dazu, dass von der Häckselschnecke beim Eingriff im zu häckselnden Material ein sehr geringer Materialabtrag stattfindet. Dieser gewollte „Verschleiß“ betrifft zunächst nur das weichere Material der Schnecke, welches geringfügig schneller abgetragen wird, als das härtere, aufgeschweißte Material. Es bleibt also bei idealen Bedingungen immer eine scharfe Kante zwischen hartem Aufpanzerungsmaterial und weicherem Trägermaterial stehen. Damit ist die Schnecke immer scharf.
Bei den Tests in Deutschland bis 1997 wurde dieser selbstschärfende Effekt beim Einsatz des Häckslers in Pappelplantagen beobachtet. mit zunehmender Betriebsdauer stieg der Schärfegrad der Schnecken an, wobei ein sichtlicher Verschleiß nicht stattfand. Es wurde also mit geringstem Materialabtrag beim Häckselvorgang die Selbstschärfung erreicht.
Dieser Effekt ließ sich beim Einsatz in tropischer Brachevegetation nicht beobachten, was nur auf die zu häckselnde Vegetation zurückzuführen sein kann. Während in Pappelplantagen reine Holzstämme gehäckselt wurden, die Häckselschnecke also praktisch ständig im schneidenden Eingriff war, wurden in tropischer Vegetation große Teile buschiger und fleischiger Pflanzen mit hohem Wassergehalt gehäckselt. Diese haben offensichtlich nicht den gewünschten Materialabtrag zur Folge gehabt. Die aufgepanzerte, harte Kante der Schnecke wurde nicht in gewünschtem Umfange abgetragen, sondern unterlag einem nur geringen Verschleiß, ebenso wie das weichere Trägermaterial. Es konnte keine scharfe Kante herausgearbeitet werden und dadurch konnte kein Selbstschärfungseffekt erzielt werden. Damit wurde die Schnecke stumpf.

Vermutlich ist die aufgepanzerte Materialschicht zu hart für die zu häckselnde Vegetation.
Eine ähnliche Beobachtung wurde beim Einsatz der Maschine in einer Miscanthus-Plantage in Deutschland gemacht. Die dünnen, aber sehr silikatreichen Stängel der Miscanthus-Pflanze wurden sauber vom Wurzelstock getrennt, gelangten in den Häckselspalt und konnten da für einen relativ langen Zeitraum (über mehrere Sekunden) verbleiben, da ihr Durchmesser so gering war, dass die Stängel nicht zwischen Maschinenaußenwand und Häckselschnecke eingeklemmt werden konnten. Damit standen mehrere einzelne Stängel der Miscanthuspflanze im Häckselspalt und rollten aufgrund ihrer runden Form vor der einlaufenden Schnecke entlang. Dieses rundete auf Dauer die Schneide der Schnecke ab und die Häckselschnecke wurde dadurch stumpf. Mit zunehmender Abstumpfung wurde auch hier die schlechter werdende Materialannahme beobachtet.
Auch hier hat vermutlich nicht der gewünschte Materialabtrag stattgefunden. Die scharfe Kante der Häckselschnecke wird aufgrund fehlenden Materialeingriffs abgerundet. Da sich mit abnehmender Schärfe der Schnecke immer mehr abgesägtes Material im Häckselspalt durch den Fördervorgang der Sägeblätter ansammelt, verstärkt sich dieser Effekt der Abrundung weiter und die Schnecke stumpft noch schneller ab.
Nach Auskunft von KUTZ (2003) lässt sich jedoch für die geänderten Verhältnisse in Sekundärvegetation oder Miscanthus jeweils geeignetes Material zur Aufpanzerung empirisch ermitteln. Zur Optimierung der Aufpanzerungsschicht müssten daher weitere Versuchsreihen unter den Bedingungen der zu bearbeitenden Vegetation vorgenommen werden.

Die Konzeption der Auswerfer wie auch der Befestigungsschrauben hat sich bei den Versionen 1.2 und 1.3 als konstruktiv zu schwach gezeigt. Nach längerem Einsatz sind mehrere Befestigungsschrauben sowie ein Auswerfer gebrochen und mussten ersetzt werden. Das zeigt, dass nicht nur die Schnecke das abgesägte Pflanzenmaterial aufbereitet. Auch die Auswerfer, gerade bei horizontal in die Maschine gelangendem Material, tragen erheblich zur Zerkleinerung bei. Entsprechend war auch an den Auswerfern eine Abrundung der vormals scharfen Kanten festzustellen. Die Konzeption der Schneidkanten der Auswerfer als

einzeln auswechselbares Verschleißteil, wie in der Tritucap 2 realisiert, ist deshalb sehr sinnvoll.

6.3.1.2 Antrieb

Die Konzeption des Antriebs der Maschine der Version 1.2 hat Schwachstellen gerade an den Sicherungskupplungen aufgewiesen. Bei regulärem Betrieb sind offenbar so hohe, kurzzeitige Drehmomente aufgetreten, dass dieses zum Auslösen der Sicherungskupplungen führte mit einer dadurch bedingten zwangsweisen Unterbrechung des Häckselvorganges. Durch das häufige Auslösen der Sicherungskupplungen schien das eingestellte Auslösemoment von 2.500 Nm sich verändert zu haben. Nach etwa 20 Betriebsstunden konnten die Kupplungen durch bloßes Drehen der Sägeblätter von Hand ausgelöst werden. Dieses machte eine Arbeit mit der Maschine unmöglich. Aus diesem Grunde wurden die Sicherungskupplungen „seitenverkehrt“ in die Maschine eingebaut. Während vorher die Drehmomente abgesichert wurden, die vom Traktor auf den Antriebsstrang gegeben wurden, wurde nun die Sicherung so eingesetzt, dass der Traktor sein volles Moment ausüben konnte, ohne dass die Sicherungskupplung auslösen konnte. Bei der veränderten Einbaulage blockierte die Kupplung und konnte rein konstruktiv nicht den Antrieb unterbrechen. Erst bei Auftreten von Momenten, die vom Rotor auf den Antriebsstrang übertragen wurden, konnte die Kupplung auslösen. Daher wurde die Einstellung der (ohnehin geschwächten) Kupplung soweit verändert, dass sie im Prinzip nur noch als Freilauf fungierten. Die Übertragung von Momenten zwischen den Rotoren konnte damit unterbunden werden, die Leistungsübertragung vom Traktor blieb davon jedoch unbeeinträchtigt. Dies führte dazu, dass der Häckselvorgang ohne nennenswerte Unterbrechungen durchgeführt werden konnte. Es ließ sich jedoch ein erhöhter Leistungsbedarf der Maschine beobachten. Da die unterstützenden Momente der Rotoren nicht mehr übertragen werden konnten, musste nun die gesamte Antriebsleistung vom Traktor übertragen werden.

Eine Untersuchung der Getriebekomponenten der Tritucap 1.3 hat ergeben, dass die Hauptwelle im Zentralgetriebe tordiert war. Diese Komponente ist demnach konstruktiv ebenfalls zu schwach ausgelegt worden.

Aus den genannten Gründen wurde der Antriebspfad der Version 2.0 vollständig

neu konzipiert. Jedoch auch hier zeigten sich schnell Schwachpunkte, die sich in der Beschädigung von Getriebekomponenten äußerten. Sowohl das Zentralgetriebe als auch ein Winkelgetriebe wurden vollständig zerstört. Leider war mit der vorhandenen Messtechnik keine Messung der Drehmomente der Einzelrotoren möglich, so dass keine Aussagen über die Interaktion zwischen den Rotoren getroffen werden können. Daher kann nur vermutet werden, dass diese Momente zur Zerstörung der Getriebekomponenten einen wesentlichen Beitrag geleistet haben. Erklärbar wird dieses Phänomen bei Betrachtung der Drehmomentaufzeichnungen in Kapitel 5.5. Die gemessene Leistung beim Häckselvorgang betrug kurzfristig ein vielfaches der maximalen Motorleistung des Traktors. Diese hohen Leistungsspitzen sind nur durch die Schwungmassen erklärbar, die eine hinreichend schnelle Abbremsung der trägen Masse (Motorschwungrad, Häckselrotor) verhindern. Bei einem normalen Häckselvorgang kann davon ausgegangen werden, dass die Häckselrotoren der Tritucap nicht gleichmäßig belastet werden. Wird nun ein Rotor belastet und der andere Rotor kann freilaufen, so wird er in dem Maße sein Drehmoment auf den belasteten Rotor übertragen, wie es die Massenträgheit des Rotors einerseits und die Sicherungskupplung im Antriebsstrang andererseits zulässt. Geht man nun von einer maximalen Drehzahl von 1.000 U/min aus und unterstellt ein maximal mögliches Drehmoment von 2.500 Nm, so ergibt sich daraus eine theoretische Leistung von ca. 260 kW. Bei einer maximalen Leistung des Traktors von 120 kW summieren sich diese Leistungen im Zentralgetriebe bzw. dem belasteten Winkelgetriebe zu 380 kW. Dieses hat offensichtlich zur Zerstörung der Getriebekomponenten geführt. Als weiterer Faktor der hohen Getriebebelastung können die in den Abbildungen der Drehmomentverläufe dargestellten Lastwechsel angeführt werden.

Eine hydraulische Dämpfungseinrichtung nach der Bauart einer Strömungskupplung könnte hier wirksam die übertragenen Drehmomentspitzen dämpfen und Überbelastung wirksam und verschleißfrei verhindern.

6.3.1.3 Einzugs- und Aufbereitungspfad

Aufgrund einer am Prototypen der Version 1.0 bis 1.3 beobachteten Verstopfungsneigung am Materialauswurf wurden, neben einer Querschnittsvergrößerung des Auswurfschachtes, statt drei Auswerfern nun fünf

vorgesehen. Das gehäckselte Material wird nun wesentlich aggressiver aus der Maschine transportiert und Verstopfungen am Auswurfkanal sind nicht mehr aufgetreten.

Der flüssige Ablauf des Häckselvorganges wurde häufig durch Verstopfungen am Häckselrotor behindert. Bei der Ansammlung von Pflanzenmaterial vor dem Häckselspalt konnte es dazu kommen, dass dieses schlagartig dem Rotor zugeführt wurde und diesen dann wegen Überbelastung verstopfte. Da die Verstopfungen hauptsächlich bei der Arbeit mit abgestumpften Häckselschnecken auftraten sollte zusätzlich die Installation eines aktiven Fördermechanismus in Erwägung gezogen werden, der abgesägtes Material in einem kontinuierlichen Gutstrom dem Häckselspalt zuführt und damit schlagartige Belastungen durch große Materialmengen vermeiden kann. Dazu könnte ein senkrecht stehendes „Förderband“ mit Gummi- oder Metallfingern in der Seitenwand der Maschine vorgesehen werden, das bei hydraulischem Antrieb mit einstellbarer Geschwindigkeit den Fördervorgang des Materials zum Rotor in den Häckselspalt unterstützen kann. Sollte es dennoch zu Verstopfungen kommen, so könnte zur Erleichterung des Fahrers und zur Steigerung der Arbeitsleistung ein System eingebaut werden, das diese durch Reversierung der Rotordrehrichtung schnell beseitigen hilft. Zusätzlich könnte eine hydraulisch betätigte, schwenkbare Gegenschneide hartnäckige Verstopfungen schnell beseitigen helfen indem diese vom Rotor weggeschwenkt wird und so die Blockade lösen hilft.

Verstopfungen am Hauptrotor traten auch im Bereich zwischen den Sägeblättern und dem unteren Maschinenrahmen auf. Material, das sich unter die Sägeblätter schiebt, kann nicht mehr aus eigener Kraft aus dem Bereich herausgefördert werden und verklemmt sich dort. Dies führt zu Erhitzung des Sägeblattes und zu erhöhtem Leistungsbedarf. Die Verstopfungsneigung in diesem Bereich hat sich nach der Anbringung von Stegen im Blatteinlauf erheblich erhöht. Diese Stege sollten die Sägezähne im Falle der Torsion des Blattes vor einem Anschlagen an der Gehäusekante schützen (vgl. S. 111). Tatsächlich sind keine Zähne mehr durch ein Anschlagen am Maschinengehäuse beschädigt worden. Grasiges und buschiges Material häuft sich jedoch in diesem Bereich verstärkt an. Auch kommt es zu Ablagerungen von Erde unter dem Sägeblatt. Dieses Material könnte durch die Anbringung von Mitnehmerplatten unter dem Sägeblatt aus der Maschine gefördert werden, wie sie sich im ersten Prototypen der Tritucap bereits bewährt

haben, Version 2 jedoch nicht mehr zum Einsatz kamen.
Der zum Auffangen der abgesägten Vegetation angebrachte Bügel auf der Maschinenoberseite sollte in einigen Fällen noch höher ausgelegt sein, da abgesägte größere Bäume mit einer ausgeprägten Krone über den Bügel hinweg auf den Traktor kippen konnten.

Es soll jedoch hier hervorgehoben werden, dass trotz dieser notwendigen Verbesserungen im Detail die Maschine in dieser Vegetation eingesetzt werden kann und eine gute Häckselleistung erbringen kann.

6.3.2 Forstmulcher FM 600

Die getestete Serienmaschine wurde für den europäischen Markt entwickelt und wies daher eine Reihe von Schwachpunkten für den Einsatz unter brasilianischen Bedingungen auf. Die mit ca. 2.700 kg relativ hohe Masse der Maschine machte eine Führung über der Bodenoberfläche durch die seitlich angebrachten Gleitkufen unmöglich, da sich auf dem relativ sandigen Untergrund sehr schnell Material vor den Kufen aufstaute, über die diese nicht mehr hinweggleiten konnte. Daher musste die Maschine aktiv durch den Fahrer mit der Hydraulik des Traktors flach über den Boden geführt werden. Das zu tiefe Absinken der Maschine führt zu einem Eingriff des Häckselrotors in den Oberboden, der neben erhöhtem Werkzeugverschleiß des Häckselrotors auch unerwünschte pflanzenbauliche Effekte nach sich zieht. Man kann davon ausgehen, dass das Wurzelsystem der Sekundärvegetation unter Umständen durch einen solchen Eingriff geschädigt wird. Experimente in Deutschland in Pappel- und Weidenplantagen haben bei beabsichtigter flachgründiger Bearbeitung (ca. 2- 5 cm) des Oberbodens zu einer vollständigen Zerstörung der Plantagenpflanzen geführt. Beobachtungen in brasilianischen Eukalyptusplantagen zeigen einen ähnlichen Effekt, wobei die Mortalität der Eukalyptuspflanzen nicht bei 100 % lag. Die Änderung der Pflanzengesellschaften von Sekundärwaldvegetation bei einem Eingriff durch die FM 600 wurde bislang nicht untersucht, jedoch kann man ähnliche Effekte vermuten. Zur Vermeidung dieses Eingriffes bedarf es daher eines gut trainierten und erfahrenen Fahrers.
Als unbedingt erforderlich hat sich die Ausstattung der Maschine mit einem

hydraulisch bedienbaren Drückebügel herausgestellt. Dieser leitet die Vegetation während des Bearbeitungsschrittes unter den Häckselrotor und vermeidet weitgehend das Überkippen von abgetrennter Vegetation auf die Maschine. Durch die Unterschiedlichkeit der Vegetation muss dieser Bügel schnell an die Gegebenheiten der zu bearbeitenden Vegetation angepasst werden können. Trotz des hydraulisch verstellbaren Bügels kam es, gerade in höherer Vegetation, häufiger zu diesem Überkippen von abgetrennten Pflanzen auf Maschine und Traktor. Auf der Maschine sind die zur Bedienung notwendigen Hydraulikleitungen verlegt, die des öfteren durch einen anschlagenden Ast zerstört wurden. Ein Ansatz zur Abhilfe war die Verlegung der Hydraulikleitungen in Schutzrohren, die sowohl die Schläuche wie auch die Verschraubungen der Leitungen abdeckten. Hier sollte herstellerseitig eine andere Verlegung der Hydraulikleitungen mit größerem Schutz vor äußeren Einflüssen erwogen werden.

Die Auslegung der Getriebekomponenten hat sich als nur bedingt geeignet für tropische Verhältnisse erwiesen. Schwächstes Glied im Antriebsstrang ist die in der Gelenkwelle eingebaute Reibscheibenkupplung, die bei längerer hoher Belastung durch ihre Erwärmung nicht mehr die vollen Drehmomente auf den Häckselrotor übertragen konnte. Der zunächst unbemerkt auftretende Schlupf an dieser Kupplung führt bei weiterer Belastung zu einem Verbrennen der Reibscheiben. Diese mussten während der Testphase mehrfach ersetzt werden. Ein nachträglich in die Versuchsmaschine eingebautes Warnsystem, das einen Drehzahlabfall am Häckselrotor bei Belastung registriert, konnte die Wartungsintervalle beträchtlich verlängern. Es muss jedoch hervorgehoben werden, dass dieses System ausschließlich eine Hilfestellung bei der Überwachung des Schlupfes der Reibscheibenkupplung darstellen konnte, jedoch keine Dauerlösung des eigentlichen Problems ist. Da größere Veränderungen an der Konzeption des Antriebsstranges nicht vorgenommen werden konnten, konnte mit Hilfe dieses Systems die Bearbeitung fortgesetzt werden. Eventuell auftretender Schlupf der Kupplung konnte rechtzeitig vor dem „Verbrennen“ der Kupplungsscheiben durch Überlastung erkannt werden. Voraussetzung zum Erhalt der Kupplungsscheiben in Verbindung mit dem installierten Warnsystem war das schnelle Reagieren des Fahrers der Maschine. Bei unterschreiten der Warndrehzahl des Rotors musste der Maschinenantrieb sofort unterbrochen

werden, da die Kupplungsscheiben bereits nach wenigen Sekunden des Durchrutschens vollständig unbrauchbar wurden. Im Fall des Ansprechens der Warneinrichtung musste die Kupplung zunächst abkühlen. Erst nach Erreichen einer normalen Betriebstemperatur von ca. 50-60°C konnte die Arbeit fortgesetzt werden.

Ein weiteres Problem war die starke Erwärmung der Riemenantriebe des Rotors. Die maximale gemessene Temperatur an den Riemenscheiben betrug bei 32° C Außentemperatur 113° C. Damit ist die Lebensdauer der Antriebsriemen sehr wahrscheinlich stark verkürzt. Der Einbau neuer Riemenscheiben mit verstärkter Belüftung hat hier bereits zu Verbesserungen geführt. Starke Erwärmung ist auch beim Zentralgetriebe der Maschine eine Hauptwartungsursache. Bei normaler Belastung und Außentemperaturen von ca. 32° wurden an diesem Getriebe Temperaturen von ca. 100° C gemessen. Die Ölfüllung des Getriebes musste aufgrund der hohen thermischen Belastung und der damit einhergehenden Verschlechterung der Schmiereigenschaften häufig gewechselt werden. Dieses Problem konnte jedoch durch den Einbau eines externen Ölkühlers behoben werden. Die Betriebstemperatur betrug danach etwa 60° C.

Verstopfungen von Maschinenelementen haben in der Regel einen großen Einfluss auf den Arbeitsablauf, sind bei dieser Maschine jedoch nur selten vorgekommen, welches einen erheblichen Vorteil dieses Maschinenkonzepts darstellt. Trotzdem muss erwähnt werden, dass gerade bei gehäuftem Auftreten von Lianen und *Phenakospermum guyanennse* der Rotor zur Verstopfung neigt. Diese faserigen und langen Pflanzen schlingen sich um den Rotor und können ihn dadurch blockieren, was in der Regel nur durch längere Reinigungsarbeiten behoben werden kann. Besonders die hohe Rotationsenergie des 1.400 kg schweren Rotors [PHILIPP 2001] führt dazu, dass verstopfendes Material besonders fest in der Maschine eingeklemmt wird. Die Beseitigung des Materials erfordert in der Regel lange Reinigungszeiten.

6.3.3 Leistungsdaten der Häckselmaschinen

Aufgrund der unterschiedlichen Arbeitsweise und der Unterschiedlichkeit der Datenbasis sollen die verschiedenen Häckselsystem hier zunächst getrennt voneinander diskutiert werden.

6.3.3.1 Doppelrotorhäcksler Tritucap 1 und Tritucap 2

Die geringe Breite der Datenbasis für die beiden Doppelrotorhäcksler lässt nur bedingt die Verbindung von Vegetationsmerkmalen mit Bearbeitungsdaten zu. Es hat sich jedoch für beide Maschinen gezeigt, dass die Arbeitsleistung der Maschinen stark durch die zu bearbeitende Vegetation beeinflusst wird. Die Auswertungsergebnisse für die beiden Tritucap-Häcksler lassen vermuten, dass mit abnehmender Stärke der Vegetation (abnehmender mittlerer Durchmesser der Pflanzen) die spezifische Bearbeitungsdauer abnimmt bzw. die Flächenleistung ansteigt. Dieser Anstieg ist durch das Erreichen einer maximal möglichen Fahrgeschwindigkeit begrenzt. Theoretisch ist also eine Fläche mit unendlich schwacher Vegetation mit derselben Flächenleistung zu bearbeiten, als wenn man dieselbe Fläche ohne Vegetation bearbeiten würde. Die maximal erreichbare Fahrgeschwindigkeit unter den Bedingungen in der Zona Bragantina betrug ca. 5,5- 6 km/h. Bei schnellerer Fahrweise hätte es leicht durch Unebenheiten oder Schlaglöcher in der Fläche zu Beschädigungen von Traktor oder Maschine kommen können. Diese maximale Fahrgeschwindigkeit hängt also wiederum von der Beschaffenheit der Bodenoberfläche ab.

Mit zunehmender Stärke der Vegetation nimmt die spezifische Bearbeitungsleistung ab. Ein direkter linearer Zusammenhang zwischen der Flächenleistung und den Merkmalen der Vegetation ist jedoch aufgrund des o.a. geringen Stichprobenumfangs nicht festzustellen. Es lässt sich auch kein direkter Zusammenhang zwischen der gehäckselten Pflanzenmasse je Zeiteinheit (Massenstrom) und der Stärke der Vegetation feststellen. Der Massenstrom kann bei schwächerer Vegetation sogar höher sein, als bei stärkerer Vegetation.

Für das konkrete Beispiel der in Kapitel 5.3.1.2 untersuchten Flächen ist der Massenstrom durch die Maschine auf Fläche 14 mit schwächerer Vegetation (geringerer mittlerer Pflanzendurchmesser in allen Durchmesserklassen, vgl. Tabelle 13) höher, als für die Bearbeitung der Fläche 1. Bei stärkerer Vegetation, wie auf Fläche 1 angetroffen, ist der Massenstrom durch die Maschine geringer.

Die Bearbeitungsdaten für die Tritucap 2 lassen auf eine höhere Maschinenleistung insgesamt schließen, da nicht nur die Flächenleistung im Vergleich zur Tritucap 1 wesentlich höher ist, sondern auch die Werte für den Massenstrom. Bei ähnlicher Vegetationsstruktur der beiden untersuchten Flächen

(Flächen 35 und 36), jedoch einer insgesamt höheren Phytomasse und eines höheren Pflanzenvolumens auf Fläche 36 wurde auf dieser die höchste Flächenleistung mit dem höchsten Volumen- und Massenstrom erreicht. Die Flächenleistungen der beiden bearbeiteten Flächen unterscheiden sich jedoch nur um 133 m²/ h, so dass man hier von fast gleichen Flächenleistungen sprechen kann. Die nicht erfassbaren Einflussfaktoren, wie z.B. Tagesform des Fahrers oder Witterungseinflüsse können diesen Unterschied bereits ausmachen.

Ein wesentlicher Faktor der im Vergleich zur Tritucap 1 gestiegenen Leistung wird die um ca. 46 kW höhere Motorleistung des Zugfahrzeuges im Vergleich zu dem der Tritucap 1 sein. Bei der Arbeit mit nur einem Häckselrotor, wird noch deutlicher, dass der Einfluss der Leistung des Zugfahrzeugs eine große Rolle spielt. Erwartungsgemäß ist mit der Halbierung der Arbeitsbreite die Flächenleistung sowie der Massen- und Volumenstrom zurückgegangen, jedoch nicht um den gleichen Betrag, wie die Verringerung der Arbeitsbreite, sondern nur um ca. 37,5 %. Diese relativ höhere Arbeitsleistung bezogen auf den Häckselrotor liegt offenbar darin begründet, dass für den verbliebenen Häckselrotor nahezu die volle Leistung des Traktors zur Verfügung steht. Die Steigerung der mittleren Fahrgeschwindigkeit um 47,6 % lässt sich nur durch die relativ höhere verfügbare Motorleistung je Häckselrotor erklären. Damit lässt sich ein Zusammenhang zwischen eingesetzter Motorleistung und erzielter Häckselleistung vermuten in dem mit steigender Motorleistung die Arbeitsleistung überproportional zunimmt.

Die nachfolgende Abbildung 34 stellt einen möglichen Kurvenverlauf zur Veranschaulichung der Hypothese dar. Der Schnittpunkt der Kurve mit der Abszisse liegt bei einem Betrag >> 0. Wenn die Motorleistung des Traktors gleich Null ist, so ist logischerweise die Häckselleistung ebenfalls gleich Null. Jedoch auch bei geringer Motorleistung ist die Häckselleistung solange gleich Null, wie die Leistung gerade ausreicht, um alle Komponenten des Traktors (Hydrauliksystem, Fahrantrieb) anzutreiben. Erst bei einer darüber hinausgehenden Leistung wird es möglich sein, die Häckselmaschine anzutreiben und bei weiterer Steigerung der Motorleistung wird sich eine theoretisch sehr geringe Häckselleistung einstellen.

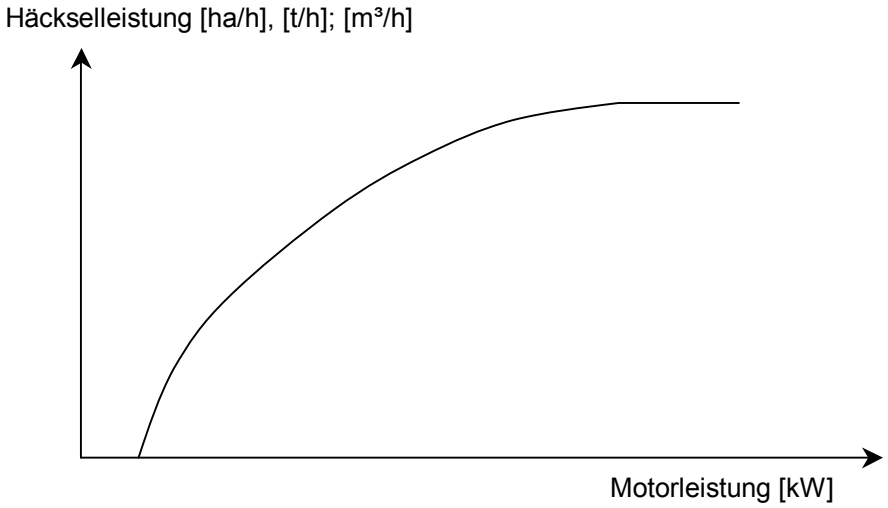


Abbildung 34: Hypothetischer Zusammenhang zwischen Motorleistung und Häckselleistung der Doppelrotormaschinen

Gerade bei geringen Werten der Häckselleistung auf der Ordinate wird eine geringe Leistungssteigerung der Traktorleistung zu einer sehr starken Steigerung der Häckselleistung führen, da die Steigerung der Motorleistung direkt dem Häckselvorgang zukommt. Der Grenznutzen der Steigerung der Motorleistung, oder auch die Steigung der Kurve, ist hoch. Der Einfluss der Steigerung der Motorleistung auf die Häckselleistung nimmt jedoch mit größer werdender Motorleistung ab, da dann andere Faktoren als die Motorleistung die Häckselleistung begrenzen, wie z.B. die Oberflächenbeschaffenheit der Fläche. Bei sehr hoher Motorleistung wird ihre Erhöhung irgendwann keinen Einfluss mehr auf die Häckselleistung haben, d.h. der Grenznutzen der Steigerung der Motorleistung ist gleich Null, ebenso wie die Steigung der Kurve. Die Steigung der Kurve stellt also den Grenznutzen der Steigerung der Motorleistung dar.
Wie genau eine solche Kurve aussieht, hängt von vielen Faktoren ab und kann hier nicht beantwortet werden. Im Prinzip wird sie aber einen ähnlichen Verlauf wie in Abbildung 34 haben.

Für die Betrachtung der Häckselleistung der Tritucap 2 lässt sich diese Kurve ebenfalls anwenden. Im vorliegenden Fall war eine relativ größere Steigerung der Häckselleistung durch die Steigerung der Motorleistung möglich. Der Grenznutzen der Steigerung der Motorleistung ist also größer als 1, oder anders ausgedrückt, die Steigung der Kurve ist noch sehr groß.

Für gleichbleibende Bedingungen könnte auf diese Weise die optimale Motorleistung des Schleppers durch die Anlage einer Versuchsreihe bestimmt werden, indem die Häckselleistung bei verschiedenen Motorleistungen gemessen würde. Für den Einzelfall könnte aus dieser so entstandenen Funktion abgewägt werden, ob eine zusätzliche Leistungssteigerung in einem wirtschaftlich vernünftigen Verhältnis zur gesteigerten Häckselleistung stünde. Dabei ist davon auszugehen, dass ein Traktor mit höherer Motorleistung sowohl höhere Anschaffungs- als auch Betriebskosten verursacht.
Es bleibt nun die Frage, ob die Steigerung der Motorleistung der alleinige Grund für die Leistungssteigerung der Tritucap 2 war. Die nachfolgende Tabelle 29 gibt eine Übersicht über die mit den doppelrotorigen Maschinen erzielten Arbeitsleistungen.

Tabelle 29: Vergleich der Leistungs- und Effizienzdaten der doppelrotorigen Häckselmaschinen Tritucap 1 und Tritucap 2

Bearbeitungsmaschine		**Tritucap 1.3**	**Tritucap 2**
mittlere Flächenleistung	[ha/h]	0,1617	0,2834
maximaler gemessener Massenstrom	[t/h]	9,18	17,16
minimaler gemessener volumenspezifischer Kraftstoffverbrauch	[l/m³]	0,55	0,39
minimaler gemessener massenspezifischer Kraftstoffverbrauch	[l/t]	3,29	2,27
minimaler gemessener flächenspezifischer Kraftstoffverbrauch	[l/ha]	106,27	109,12

Anhand der vorliegenden Tabelle 29 ist deutlich die gestiegene Leistung des zweiten Prototypen (Tritucap 2.0) gegenüber dem ersten zu erkennen. Die mittlere Flächenleistung ist bei der Tritucap 2 um 75 %, der maximale Massenstrom um 87 % im Vergleich zur Tritucap 1 gestiegen. Dem steht eine Leistungssteigerung des Zugfahrzeuges von 62 % (74 kW bei Tritucap 1 zu 120 kW bei Tritucap 2) gegenüber. Es war also eine zur Motorleistung überproportionale Leistungssteigerung möglich. Als Erklärungsansatz könnte man vermuten, dass entweder die in Abbildung 34 gezeigte Kurve für die Steigerung der Motorleistung eine hohe Steigung aufweist oder weitere, in der Abbildung nicht erfasste Faktoren die Leistung beeinflussen. Als solche wären neben der größeren Arbeitsbreite die bessere Bedienbarkeit des neuen Traktors sowie die verbesserte Sicht auf die Tritucap 2 durch den Heckanbau zu nennen. Auch konstruktive Verbesserungen können zur Leistungssteigerung beigetragen haben. Insgesamt kann man bei Betrachtung der reduzierten spezifischen Kraftstoffverbräuche in

Tabelle 29, mit Ausnahme des flächenspezifischen Kraftstoffverbrauchs, von einer Steigerung der Effizienz der Tritucap 2 sprechen. Es muss jedoch an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass jeweils für beide Maschinen nur zwei verschiedene Flächen bearbeitet wurden und damit die Datengrundlage sehr begrenzt war. Die Steigerung von Leistung und Effizienz ist dennoch deutlich.

6.3.3.2 Forstmulcher AHWI FM 600

Es wurden insgesamt 64 Flächen mit der FM 600 bearbeitet, die bei der statistischen Auswertung berücksichtigt wurden. Auf 33 der bearbeiteten Flächen wurde vor der Bearbeitung eine Erhebung der Merkmale der Flächen durchgeführt. Die statistische Auswertung der Merkmale und der Bearbeitungsdaten hat hohe Korrelationen zwischen der Stärke der Vegetation und der Bearbeitungsdauer ergeben. Die Korrelationskoeffizienten von 0,765 für den mittleren Durchmesser und 0,763 für die mittlere Masse der Einzelpflanze zeigen dies, wobei angemerkt sein muss, dass die mittlere Masse der Einzelpflanzen direkt von der Größe des Durchmessers abhängt. Die Korrelation zur Flächengröße ist jedoch mit ca. 0,85 (erster Bearbeitungsschritt) und 0,84 (zweiter Bearbeitungsschritt) noch höher. Die Flächengröße ist erwartungsgemäß immer praktisch linear mit der Bearbeitungsdauer korreliert, die Flächengröße hat rein statistisch schon deshalb hochsignifikant den größten Einfluss auf die Bearbeitungsdauer. Gerade bei stärkerer Vegetation beeinflusst jedoch diese die Bearbeitungsdauer ebenfalls. Bei der Bearbeitung von Flächen, die mit Pflanzen größerer Durchmesser bewachsen ist, muss in der Regel die Fahrgeschwindigkeit reduziert werden. Dieses wirkt sich direkt auf die Bearbeitungsdauer aus und schlägt sich so in der statistischen Auswertung nieder. Insofern decken sich diese statistisch abgesicherten Erkenntnisse mit den für die Doppelrotorhäcksler gemachten Beobachtungen (vgl. Kapitel 6.3.3.1).

Die folgende Tabelle 30 zeigt die hochsignifikanten Korrelationen ausgewählter Bearbeitungsmerkmale. Alle in der Tabelle aufgeführten Korrelations-koeffizienten sind hochsignifikant. Zunächst ist zu sehen, dass das Alter der Brachevegetation mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,59 mit dem mittleren Durchmesser der Pflanzen korreliert ist. Es ist also zu vermuten, dass ein damit ein Zusammenhang zwischen „Alter“ und „Bearbeitungsdauer“ besteht, der durch

den Korrelationskoeffizienten von 0,65 bestätigt wird.

Tabelle 30: Pearson'sche Korrelationskoeffizienten ausgewählter Bearbeitungsmerkmale (n=33)

Merkmale	Durchm.[1]	Größe[2]	Alter[3]	Bearb_1	Sprit_1	Bearb_2	Sprit_2
Durchm.[1]	1	-	0,59133***	0,76451***	0,78767***	0,66938***	0,63736***
Größe[2]		1	-	0,8498***	0,82692***	0,85199***	0,83739***
Alter[3]			1	0,6477***	0,6327***	0,51321***	0,46216***
Bearb_1				1	0,9733***	0,90694***	0,83267***
Sprit_1					1	0,88738***	0,86017***
Bearb_2						1	0,7969***
Sprit_2							1

Verwendete Abkürzungen:
***: statistisch hochsignifikantes Merkmal
[1]: mittlerer Durchmesser der Pflanzen der Fläche
[2]: Flächengröße
[3]: Alter der Fläche
Bearb_1: Bearbeitungsdauer während des ersten Schritts
Sprit_1: Kraftstoffverbrauch während des ersten Schritts
Bearb_2: Bearbeitungsdauer während des zweiten Schritts
Sprit_2: Kraftstoffverbrauch während des zweiten Schritts

Höher ist jedoch die Korrelation von „Durchmesser" und „Bearbeitungsdauer des ersten Schritts" mit einem Koeffizienten von 0,76. Daran ist abzulesen, dass das Alter der Brachevegetation zwar einen Anhaltspunkt der Flächenstruktur bieten kann, nicht jedoch die detaillierte Beschreibung der Flächen durch die Einzelmerkmale ersetzen kann.

Am stärksten ist die „Größe der Fläche" mit der „Bearbeitungsdauer des ersten Schritts" korreliert. Mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,85 tritt der Einfluss des mittleren Pflanzendurchmessers hinter den der Flächengröße zurück.

Dies deutet darauf hin, dass die untersuchten und gehäckselten Flächen (n=33) keine so starke Vegetation aufwiesen, dass die Stärke der Vegetation primär begrenzender Faktor der Flächenleistung gewesen wäre, wobei die Flächengröße natürlich in jedem Fall einen Einfluss hat.

Der „Kraftstoffverbrauch während des ersten Schritts" ist ebenfalls stark mit der Größe der Fläche korreliert. Dieses ist durch die sehr starke Korrelation des „Kraftstoffverbrauchs" mit der „Bearbeitungsdauer" (0,97) zu erklären. Durch die ebenfalls starke Korrelation der „Dauer des zweiten Bearbeitungsschritts" mit der des „ersten Bearbeitungsschritts" von 0,91 gelten die gleichen Zusammenhänge für die Bearbeitungsdaten des zweiten Bearbeitungsschritts insgesamt. Interessant ist dabei die Korrelation der Kraftstoffverbräuche des ersten und zweiten Schritts von 0,86. Diese Korrelation ist etwas stärker, als die des Kraftstoffverbrauchs des zweiten Schritts mit der Bearbeitungsdauer des ersten Schritts (0,83). Es liegt eine Parallelität der Kraftstoffverbräuche für beide Bearbeitungsschritte vor, die stärker ausgeprägt ist, als die Abhängigkeit der jeweiligen Kraftstoffverbräuche

von ihren Bearbeitungsdauern. Man kann damit auf einen Kraftstoffverbrauch schließen, der prinzipiell von der Flächengröße abhängt und zunächst einmal unabhängig von der bearbeiteten Vegetation ist, da die Korrelation zwischen der „Bearbeitungsdauer des zweiten Schritts“ mit dem „Kraftstoffverbrauch des zweiten Schritts“ nur einen Korrelationskoeffizienten von 0,796 aufweist.
Die Flächengröße hat damit hochsignifikant den größten Einfluss auf die Bearbeitungsdauer und den Kraftstoffverbrauch.

Es wurde zusätzlich eine Untersuchung des Beitrags der Einflussfaktoren („Hindernisse in der Fläche“, „Alter der Brachevegetation“ und „Lage der Fläche“) zur Erklärung der Streuung der Bearbeitungsdauern des ersten und zweiten Schritts und der jeweiligen Kraftstoffverbräuche durchgeführt. Dabei hat sich ergeben, dass diese Einflussfaktoren einen nur geringen Beitrag leisten können, selbst bei Einbeziehung der Merkmale „Phytomasse der Fläche“ und „Pflanzenzahl der Fläche“ in die Analyse. Den größten Einfluss auf die Streuung der „Bearbeitungsdauer“ hat in diesem Zusammenhang das Alter der Brachevegetation, in der viele Merkmale der Vegetationsstruktur stark vereinfacht ausgedrückt werden (s.o.). Somit könnte das Alter der Brachevegetation bereits vor der Bearbeitung der Fläche zu einer Abschätzung der Bearbeitungsdauer und damit der Kraftstoffverbräuche herangezogen werden. Um jedoch ein Regressionsmodell zur genaueren Abschätzung zu erstellen sind weitere Untersuchungen zur weiteren Datengewinnung notwendig.

Auffällig ist der in den Varianzanalysen ermittelte sehr starke Einfluss der „Erfahrung des Fahrers“. Die Analyse hat jedoch gezeigt, dass die Stärke der Brachevegetation mit zunehmender „Erfahrung“ abnimmt. Viele Korrelationskoeffizienten der die Flächenstruktur beschreibenden Merkmalen mit der „Erfahrung“ weisen darauf hin. Daraus lässt sich der enge Zusammenhang zwischen der „Erfahrung“ und der Bearbeitungsdauer erklären. Das Merkmal „Erfahrung“ ist also nicht direkt als Synonym der Fähigkeit des Fahrers als Maschinenführer zu bewerten, sondern eher als Ausdruck der schwächer werdenden Vegetation. Dieses jedoch kann sehr wohl als Ausdruck der „Erfahrung“ des Maschinenbedieners gewertet werden, da mit zunehmender Erfahrung schwächere Bestände zur Bearbeitung ausgewählt wurden.

Die statistische Betrachtung aller bearbeiteten und ausgewerteten Flächen (n=64) relativiert den starken Einfluss der Variablen „Erfahrung“. Den höchsten Einfluss hat hier die Variable „Alter der Brachevegetation“. Ein Einfluss der Struktur und Stärke der Brachevegetation auf die Bearbeitungsdauer ist also auch bei den nicht eingehend auf ihre Struktur untersuchten Flächen festzustellen (vgl. Anhang, Tabelle A- 43 – Tabelle A- 50)

6.3.3.3 Raupentraktor RT 350 und UZM 580

Der Einsatz dieser hochspezialisierten Häckselmaschine in Brachevegetation erscheint nur dann sinnvoll, wenn sehr alte und damit starke Vegetation gehäckselt werden muss. Dabei muss davon ausgegangen werden, dass das zu häckselnde Material keiner anderweitigen Nutzung und damit einer Verwertung zugeführt werden kann. Unter diesen Voraussetzungen relativiert sich der hohe absolute Kraftstoffverbrauch von ca. 40 l/h. Die massenspezifischen Kraftstoffverbräuche sind mit 0,9 l/t bis 1,4 l/t im Vergleich zu den anderen untersuchten Maschinen gering. Dem steht allerdings ein hohes Investitionsvolumen von ca. 370.000 Euro mit dem entsprechenden Kapitaldienst, sowie kaum abschätzbare Kosten für Transport und Wartung gegenüber. M.K.L ALVES (2001) hat für die Beseitigung von Baumstümpfen in beernteten Eukalyptusplantagen für den RT 370 mit 272 kW Motorleistung (RT 350: 257 kW) eine Flächenleistung von 0,16 ha/h bis 0,23 ha/h ermittelt. Die Kosten je Betriebsstunde wurden mit 942,40 R$/ha bei 0,16 ha/h und 633,60 R$/ha bei 0,23 ha/h ermittelt. Die erfassten Flächen waren 6,8 bzw. 9,5 ha groß und die Kosten für den Transport der Maschine von Fläche zu Fläche wurden nicht berücksichtigt. In kleinbäuerlichen Anbausystemen sind Flächengrößen von 0,3 ha bis 1 ha die Regel, was einen hohen Aufwand für den Transport der Maschine bedeuten würde. Da sie sich aus eigener Kraft nicht über längere Distanzen bewegen kann, ist ein Tieflader zum Transport nötig. Entscheidendes Argument gegen den Einsatz des RT 350 in kleinbäuerlichen Agroforstsystemen ist jedoch die relativ geringe zu häckselnde Phytomasse. Die Maschine würde überwiegend im Teillastbereich arbeiten und die Motorleistung des RT 350 könnte damit nicht effizient genutzt werden, was im Vergleich zu den anderen getesteten Systemen in höheren Betriebskosten resultieren würde. Die Maschine kann wirtschaftlich

deshalb wohl nur in großflächigen, stark bewachsenen Plantagen arbeiten, da sich in dem Fall der Aufwand für den Transport der Maschine verringert und die vorhandene Motorleistung effizient eingesetzt werden kann.

Ein Test in einer Ölpalmenplantage hat die o.g. Zahlen von M.K.L ALVES (2001) bestätigt. Man kann davon ausgehen, dass eine Ölpalmplantage eine Fläche mit hohem Phytomassebestand ist. Die ermittelte Flächenleistung von 0,167 ha/h liegt in einem ähnlichen Bereich, wie für den Einsatz der Maschine in Eukalyptusplantagen (s.o.). Die Räumung der alten Ölpalmen von den Plantagenflächen nach Ablauf der Nutzungsdauer ist ein derzeit nur unzureichend geklärtes Problem. Aktuell werden hierfür Raupentraktoren eingesetzt, die die Stämme am Feldrand aufhäufen, um sie dort verrotten zu lassen. Das Verfahren ist aufwändig, zeitraubend und aus Gesichtspunkten der Bodenfruchtbarkeit als nachteilig zu bewerten, da die Pflanzensubstanz dem Boden entzogen wird. Außerdem findet ein erheblicher Eingriff in die Bodenstruktur statt. Gespräche mit Plantagenbesitzern haben die Kosten für die Räumung einer alten Plantagefläche mit etwa 1.000 bis 3.000 US$ beziffert. Selbst wenn man annimmt, dass der Wechselkurs des Brasilianischen Real zum US-Dollar bei 1:1 liegt, kann bei ähnlicher Kostenstruktur der Bearbeitung einer solchen Plantage der RT 350 hier bereits eine Kostenersparnis bringen.

Die kleinstrukturierte kleinbäuerliche Familienlandwirtschaft birgt jedoch kein Einsatzpotenzial für diese Maschine.

6.3.4 Häckselqualität

Die Klassierung der Hackschnitzelproben konnte nicht durch in der Praxis übliche Siebverfahren vorgenommen werden. BÖHM & HARTMANN (2002) haben das Trommelsiebverfahren vergleichend mit dem Plansiebverfahren zur Größenklassierung von Brennstoffen untersucht und sind zu dem Ergebnis gekommen, dass das Trommelsiebverfahren Vorteile bei der Klassierung bietet. Da jedoch dieses Siebverfahren in der Untersuchungsregion nicht zur Verfügung stand musste auf ein manuelles Plansiebverfahren zurückgegriffen werden. Hierbei wurden auf Holzrahmen aufgespannte Maschendrahtzäune mit vier verschiedenen Maschenweiten verwendet. Die Holzrahmen zur Siebung manuell linear hin- und herbewegt, bis kein weiterer Holzpartikel durch das Sieb fiel. Es

waren also keine absolut homogenen Siebungsvorgänge zu realisieren, die kein motorischer Antrieb mit einer absolut gleichmäßigen Siebbewegung möglich war. Trotzdem hat sich in den Untersuchungen gezeigt, dass die so durchgeführten Siebungen eine eindeutige Trennung der Partikelgrößen gewährleisten konnte.
Da die Siebung allein jedoch keinen Rückschluss auf die Konsistenz der Hackschnitzel zulässt, wurden die Hackschnitzel einer subjektiven Klassierung nach dem Grad des Aufschlusses unterworfen. Um den Einfluss der Versuchsperson auf die Klassierung zu minimieren, führte immer dieselbe Person diese Klassierung durch. Aufgrund des aufwändigen Verfahrens konnten je Bearbeitungsmaschine nur jeweils die Hackschnitzel einer Fläche beprobt und klassiert werden. Damit ist kein Rückschluss auf den Einfluss der Vegetation der Flächen auf die Hackschnitzelkomposition möglich. Man kann jedoch vermuten, dass bei der Beprobung von Flächen unterschiedlicher Struktur verschiedene Hackschnitzelgrößen und –qualitäten gemessen worden wären.
Der Vergleich der Hackschnitzelgrößen und –qualitäten der jeweiligen Maschinen untereinander kann also nur eine Momentaufnahme darstellen, die mit der Beprobung von Flächen anders gearteter Struktur wieder anders ausfallen kann. Dennoch sind Tendenzen in den Größenklassen wie auch in den Qualitätsklassen zu erkennen, die die Maschinen vermutlich gegeneinander abgrenzen können.

Erst im Frühjahr 2003 sind Untersuchungen zur Ermittlung der optimalen Hackschnitzelstruktur begonnen worden. Dabei sollte die Zersetzungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Aufbereitungsgrad, der Partikelgröße und den äußeren Bedingungen (Bodenfeuchte, Bodenbedeckung, Lichteinfall, Aktivität der Mesofauna) ermittelt werden. Da diese Untersuchung noch nicht beendet wurde, kann eine Bewertung der durch die Maschinen produzierten Hackschnitzel zunächst noch nicht vorgenommen werden. Es erscheint jedoch sinnvoll, dass ein großer Teil des gehäckselten Materials schnell zersetzt wird, damit die gebundenen Nährstoffe freigesetzt werden. Ein weiterer Teil sollte als bodendeckende Schicht über die Nutzungsperiode verbleiben.
Inwieweit die getesteten Maschinen diese Kriterien erfüllen können, kann noch nicht gesagt werden.
Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem mittleren Hackschnitzelvolumen und der Rotordrehzahl der AHWI FM 600 konnte nachgewiesen werden. Je

größer die Drehzahl des Häckselrotors ist, umso kleiner sind die produzierten Hackschnitzel in allen untersuchten Qualitätsklassen. Inwieweit sich dieses Ergebnis jedoch auf die Doppelrotormaschinen Tritucap 1 und Tritucap 2 übertragen lässt, kann nicht gesagt werden.

6.3.5 Hackschnitzel der Tritucap 1, Tritucap 2 und AHWI FM 600 im Vergleich

Die folgende Abbildung 35 zeigt die Verteilung der Hackschnitzelgrößen auf die durch Siebung ermittelten Größenklassen für die drei verwendeten Maschinen.

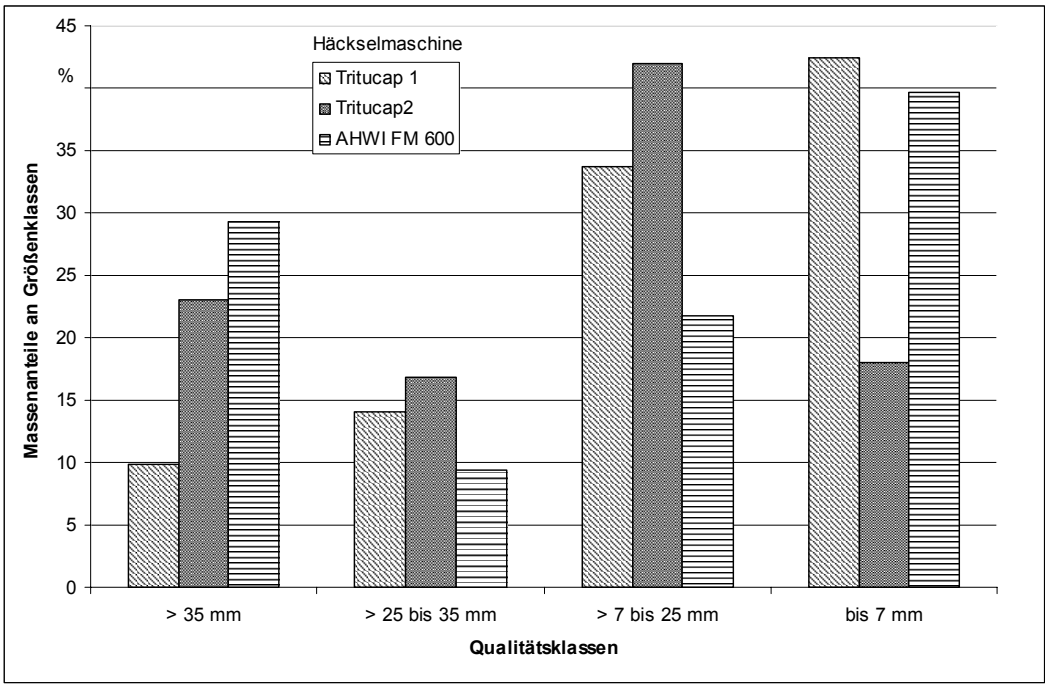


Abbildung 35: Verteilung der Hackschnitzelgrößen auf die Siebfraktionen in Abhängigkeit von der Bearbeitungsmaschine

Für die Tritucap 1 kann man eine Verteilung der Hackschnitzelgrößen mit Schwerpunkt bei der Siebfraktion „bis 7 mm“ Maschenweite sehen. Die Anteile an den größeren Siebfraktionen nehmen kontinuierlich ab. Diese Tendenz ist bei der Tritucap 2 hier nicht zu beobachten, der Schwerpunkt der Hackschnitzelgrößen liegt bei der Siebfraktion 3. Eine kontinuierliche Abnahme der Anteile an größeren Fraktionen ist ebenfalls nicht zu beobachten.

Ebenso ist die Verteilung der Hackschnitzelgrößen bei der AHWI FM 600 nicht kontinuierlich größer oder kleiner werdend.

Bei Betrachtung der Aufteilung auf die definierten Qualitätsklassen ergibt sich das in Abbildung 36 gezeigte Bild.

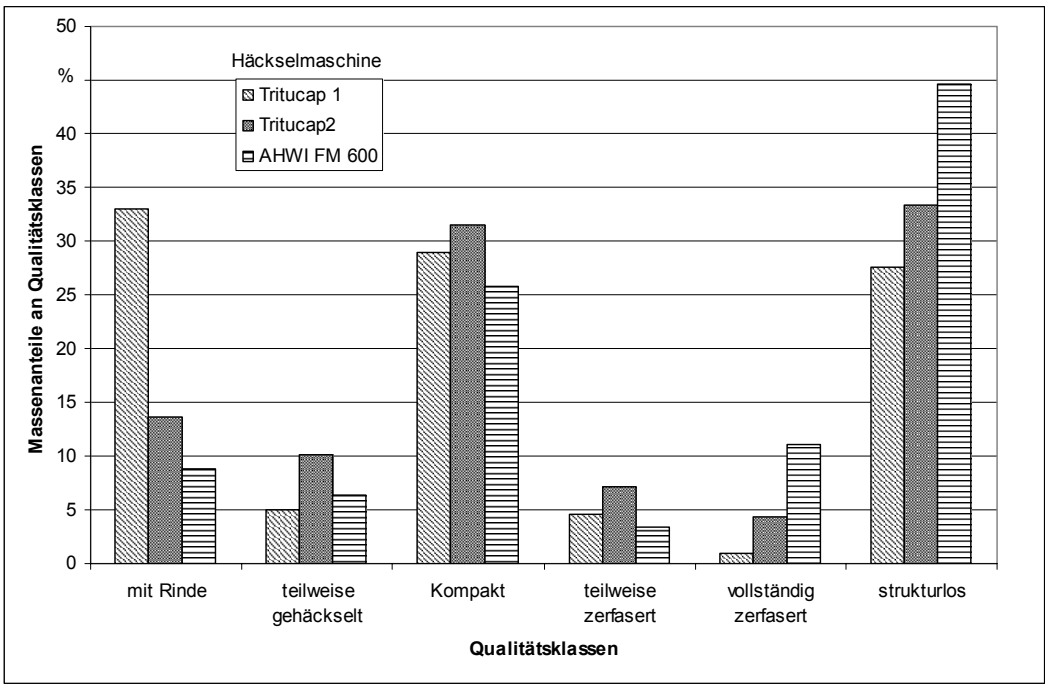


Abbildung 36: Verteilung der Hackschnitzelqualitäten auf die definierten Qualitätsklassen in Abhängigkeit von der Bearbeitungsmaschine

In dieser Abbildung ist zu sehen, dass die AHWI FM 600 überwiegend Hackschnitzel produziert, die vermutlich sehr schnell kompostieren werden, da sie praktisch keine Struktur mehr haben. Der zweithäufigste Anteil liegt jedoch bei der Klasse „Kompakt“, das heißt bei Hackschnitzeln, die vermutlich lange zur Zersetzung benötigen werden. Vor allem in der Klasse „Kompakt“ liegen die Anteile der drei Maschinen sehr nah beisammen.

Bei weiterer Auswertung der Daten und Aufteilung der Qualitätsklassen der Hackschnitzel innerhalb der Durchmesserklassen ergibt sich das in der Abbildung 37 gezeigte Bild. Auffällig ist hierbei für die FM 600 der hohe Anteil (32,8 %) der Hackschnitzel in der kleinsten Durchmesserklasse an der Qualitätsklasse „strukturlos“. Ein in die gleiche Richtung tendierender Wert ergibt sich für die Tritucap 2 in der Durchmesserklasse „>7 bis 25 mm“. Die Tritucap 1 liefert in allen Klassen den höchsten Anteil der Hackschnitzel „mit Rinde“.

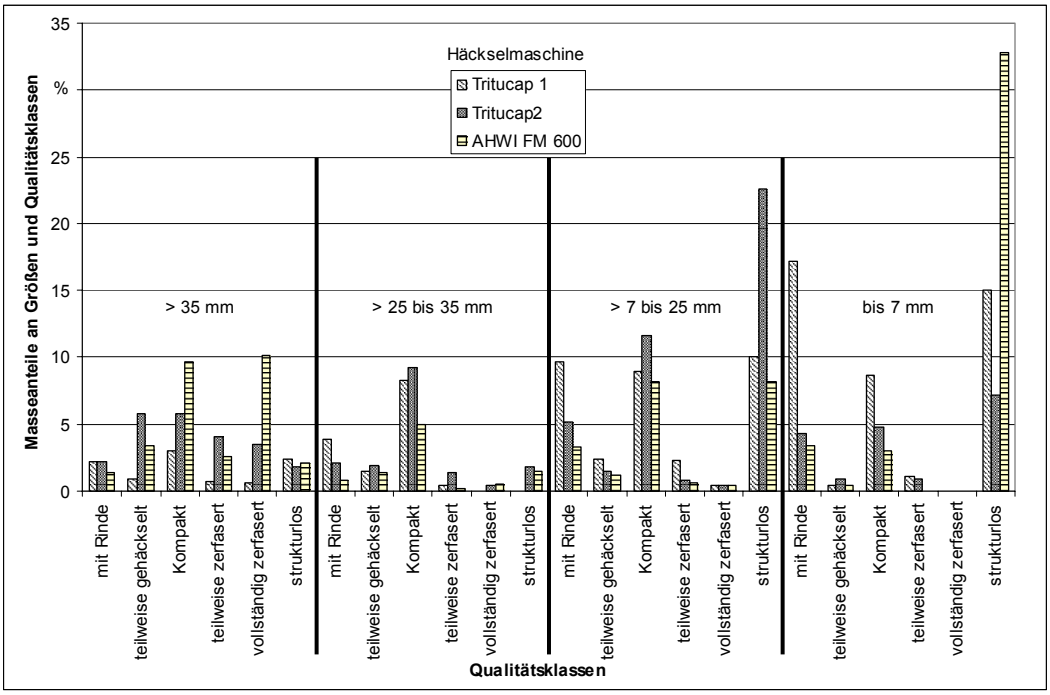


Abbildung 37: Verteilung der Hackschnitzelqualitäten auf die definierten Größen- und Qualitätsklassen in Abhängigkeit von der Bearbeitungsmaschine

Eine weitere Untersuchung der Hackschnitzelqualitäten und Größenklassen für die AHWI FM 600 könnte zeigen, inwieweit sich die Qualität und Größe der Partikel ändert, wenn dem ersten Bearbeitungsschritt „Fällen“ kein weiterer Bearbeitungsschritt zur „Nachzerkleinerung“ folgt. Damit könnte auch der Aufbereitungseffekt eines jeden einzelnen Bearbeitungsschrittes ermittelt werden. Nach Aussagen der lokalen Bauern war die Hackschnitzelqualität nach dem „Fällen“ noch so beschaffen, dass sie eine problemlose Bearbeitung durch den Bauern noch nicht ermöglicht hätte. Große Partikel und zum Teil nicht sauber vom Wurzelstock getrennte Äste behinderten die weitere Bearbeitung, so dass eine „Nachzerkleinerung“ nicht unterbleiben konnte.

Die Ergebnisse der o.a. eingehenden Untersuchung der Zusammenhänge zwischen maschinell produzierten Hackschnitzeln, ihrer Größen und Qualitäten und den Zersetzungseigenschaften steht noch aus. Daher kann bislang keine eindeutige Wertung der Ergebnisse vorgenommen werden. Es kann jedoch angenommen werden, dass der als „strukturlos“ klassierte Teil des Hackgutes schnell mikrobiell aufschließbar ist, ebenso wie die weiteren Teile der hoch aufgeschlossenen Hackschnitzel, z.B. die der Klassen „vollständig zerfasert“ und „teilweise

zerfasert“. Daneben sind die „kompakten“ und „teilweise gehäckselten“ Hackschnitzel wie auch diejenigen „mit Rinde“ einem länger dauerndem Zersetzungsprozess unterworfen. Diese gröberen Komponenten könnten die Bedeckung der Fläche sicherstellen. Eine Mischung aus Hackschnitzeln verschiedener Gruppen scheint also durchaus sinnvoll, wobei die idealen mengenmäßigen Anteile noch in weiteren Untersuchungen ermittelt werden müssen.

6.3.6 Drehmoment und Drehzahl

Aufgrund der anfallenden großen Datenmengen bei der Durchführung der Messungen muss sich diese Arbeit auf die exemplarische Betrachtung von typischen Häckselvorgängen beschränken. Es wurden zwei Bearbeitungsflächen ausgewählt, für die in Abhängigkeit von der Bearbeitungsmaschine Tritucap 2 und AHWI FM 600 die Bearbeitungsdaten gegenübergestellt wurden. Es wurde dabei vorausgesetzt, dass zur Erzielung eines vergleichbaren Häckselergebnisses mit der AHWI FM 600 die beiden Bearbeitungsschritte „Fällen“ und „Nachzerkleinerung“ notwendig waren. Auffälligster Unterschied zwischen den beiden Häckslersystemen ist die Flächenleistung und damit der Massenstrom, der für die AHWI FM 600 wesentlich höher liegt, als für die Tritucap 2. Die Notwendigkeit zu zwei Bearbeitungsschritten mit der AHWI FM 600 relativiert die relativ hohe Flächenleistung der beiden einzeln betrachteten Bearbeitungsschritte von 0,46 bzw. 0,72 ha/h und ergibt zusammen eine Flächenleistung von 0,28 ha/h, was nur geringfügig über der der Tritucap 2 liegt. Bedingt durch die zwei Bearbeitungsschritte ist der Energieaufwand zum Häckseln eines Hektars damit trotz des höheren Massenstroms und der geringeren Phytomasse der mit der FM 600 bearbeiteten Fläche für die FM 600 etwas ungünstiger. Der Gesamtenergieaufwand für die Bearbeitung einer Tonne Phytomasse mit der FM 600 betrug unter den gegebenen Bedingungen 6,41 kWh, wobei der für die Tritucap 2 bei 5,98 kWh lag.

Aus diesen Daten lässt sich ablesen, dass die Tritucap 2 in schwächerer Vegetation (geringerer mittlerer Durchmesser oder ersatzweise: geringeres Alter) Vorteile im Energiebedarf gegenüber der FM 600 hat. Dieser Effekt wird sich um so deutlicher zeigen, je schwächer die Vegetation ist, da die Flächenleistung der

Tritucap 2 dann wesentlich höher sein wird, als die der FM 600. Die AHWI FM 600 wird auf Flächen mit schwächerer Vegetation nicht in gleichem Maße die Flächenleistung steigern können, wie die Tritucap 2, da die Tritucap 2 bereits mit einem Bearbeitungsschritt eine zufriedenstellende Hackschnitzelgröße und –qualität bereitstellen kann.
Ebenso ist diesen Daten zu entnehmen, dass der flächenspezifische Energieaufwand für die FM 600 etwas geringer ist, als für die Tritucap 2, was auf die etwas höhere Flächenleistung zurückzuführen ist. Da die FM 600 stärkere Vegetation tendenziell schneller bearbeiten kann, als die Tritucap 2, bietet sich zur Minimierung des Energieaufwands die Bearbeitung dieser Flächen mit der FM 600 an.

Eine vergleichsweise Darstellung der Drehmomentverläufe während einer Belastungsphase der Tritucap 2 und der AHWI FM 600 zeigt die Unterschiedlichkeit der Arbeitsvorgänge. Die Betrachtung der grafisch dargestellten Drehmoment- und Drehzahlverläufe über einen Zeitraum von 7 Sekunden während einer Belastungsphase verdeutlicht die konstruktive Unterschiedlichkeit der beiden Maschinen. Der stark gezackte Verlauf der Drehmoment-. und Leistungskurve für die Tritucap 2 zeigt starke Lastwechsel in der Maschine an. Die beiden Häckselrotoren der Maschine werden in der Regel nicht gleichmäßig mit Pflanzenmaterial beschickt. Die beiden Rotoren der Tritucap werden während der Bearbeitung unterschiedlich stark belastet. Der Abfall der Drehzahl eines belasteten Rotors führt dazu, dass der unbelastete Rotor durch die formschlüssige Verbindung der Rotoren den belasteten Rotor mit seiner Schwungmasse unterstützt. Der alternierende Verlauf der Leistungskurve ist durch aus dem eigentlichen Häckselprozess resultierenden Drehmomenten überlagert. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei dem Zerkleinern des holzigen Materials Drehmomentspitzen auftreten. Da die Messung der Drehmomente an der Zapfwelle des Traktors erfolgt ist, werden jedoch nur die resultierenden Momente an der Traktorseite messbar. Der alternierende Verlauf der Leistungskurve deutet die in der Maschine stattfindenden Lastwechsel an. Zur genauen Analyse der Vorgänge in der Maschine und zur Ermittlung der zwischen den Rotoren stattfindenden Lastwechsel müsste die Drehmomentmessung an jedem der beiden Rotoren erfolgen. Daher kann eine Zuordnung der

Drehmomente zum Häckselprozess und den Lastwechseln nicht eindeutig erfolgen. Die durch die Schwungmasse übertragene Leistung zwischen den Rotoren kann mit der verwendeten Messmethode ebenfalls nur grob geschätzt werden.

Die Vergleichsdaten für die AHWI FM 600 wurden während des ersten Bearbeitungsschritts gemessen. Die FM 600 weist einen von der Tritucap 2 unterschiedlichen Verlauf der Leistungskurve während einer Belastungsphase auf. Der Verlauf der Drehmoment- und Leistungskurve der FM 600 ist wesentlich glatter als bei der Tritucap 2. Es werden kurzfristig wie bei der Tritucap 2 mit ca. 2.500 Nm sehr hohe Drehmomentspitzen gemessen. Der weitere Kurvenverlauf während des Häckselvorganges ist jedoch durch nur geringe Schwankungen im Drehmomentenverlauf gekennzeichnet. Die aufgezeichneten Schwankungen im Kurvenverlauf während der Belastungsphase können darauf zurückzuführen sein, dass die kardanische Gelenkwelle an beiden Enden (maschinenseitig und traktorseitig) unterschiedlich stark abgewinkelt war. Im normalen Betrieb lässt sich die Gelenkwelle nicht immer optimal einstellen, da während des Betriebes häufig der Winkel zwischen Maschine und Traktor variiert. Die vom Hersteller vorgesehene Nachführung des Zentralgetriebes des Forstmulchers gleicht einen Teil dieser Änderungen aus, kann jedoch nicht für jede Arbeitsposition der Maschine eine ideale Anpassung gewährleisten. Die aus dieser ungleichen Abwinklung der Gelenkwelle resultierenden Schwingungen sind wahrscheinlich ein Hauptgrund der registrierten alternierenden Kurvenverläufe. Auch bei der FM 600 wird dieses technisch bedingte Phänomen von auftretenden Drehmomentspitzen während des Häckselvorganges überlagert. Gerade im Anfangsstadium der Belastungsphase sind die beim Häckseln auftretenden Momente stark dominierend. Eine weitere mögliche Schwankung der Kurve ist dadurch möglich, dass die Häckselwerkzeuge nicht gleichmäßig auf dem Umfang des Häckselrotors verteilt sind. Der Rotor besteht vielmehr aus sechs axial verlaufenden Traversen, auf denen die Werkzeuge aufgeschraubt sind. Der tangentiale Eingriff des Häckselrotors in einen Baumstamm führt also dazu, dass bei einer Umdrehung des Häckselrotors sechs mal nacheinander die Werkzeuge in das Holz eingreifen, wobei sich jeder Eingriff als Drehmomentspitze im Kurvenverlauf abzeichnen müsste. Einer Rotordrehzahl von 1000 Umdrehungen pro Minute entsprächen 16,667 Rotorumdrehungen je Sekunde. Bei sechs

Werkzeugtraversen auf dem Umfang des Rotors kommt es damit zu 16,667* 6=100 Eingriffen der Werkzeuge je Sekunde. Da jedoch die Auflösung der Messwerte bei 55 Werten je Sekunde liegt, ist eine Darstellung dieser Drehmomentschwankungen nicht möglich. Die Schwankung der in der Abbildung 33 (Kapitel 5.5) gezeigten Kurve kann also eigentlich nur aus der Ungleichmäßigkeit der Gelenkwellenkonfiguration resultieren. Bei idealer Konfiguration der Gelenkwelle müsste bei gleichmäßiger Belastung des Häckselrotors ein relativ glatter Kurvenverlauf registriert werden.

Bemerkenswert für beide Maschinen ist die maximale gemessene Leistung an der Zapfwelle, die die maximale Leistung des Traktors weit übersteigt. Dieses kann nur daraus resultieren, dass die Verzögerung der Maschine durch das zu häckselnde Material schneller erfolgt ist, als die Trägheit des Motors des Traktors dieses zugelassen hätte. Die Trägheit des Motors wirkt also gewissermaßen als Schwungmasse zum Maschinenantrieb. Die maximale an der Gelenkwelle gemessene Leistung beträgt für die AHWI FM 600 bei einem Drehmoment von 2448 Nm 262,7 kW, für die Tritucap 2 244,7 kW bei 2483 Nm, was die verfügbare Leistung des Traktormotors von 122 kW um mehr als das doppelte übersteigt.

6.3.7 Antriebskonzeption der Häcksler

In der Tritucap 2 kamen statt der in der Version 1 verwendeten Riemenantriebe Wellenantriebe für die Rotoren zum Einsatz. Offensichtlich haben starke Lastwechsel (vgl. Abbildung 32, Kapitel **5.5**, Seite 105) in Verbindung mit dem Spiel von Wellen- und Getriebeverzahnung dazu geführt, dass das Zentralgetriebe überlastet wurde und zerstört wurde. Desgleichen ist ein Zapfen am Getriebeeingang eines Winkelgetriebes zum Rotorendantrieb abgedreht, was auf die gleiche Ursache zurückzuführen ist. Die hohen Drehmomente in Verbindung mit einer hohen Lastwechselzahl haben die Getriebekomponenten überlastet. Die Dauerfestigkeit ist nicht gegeben und daher ist in zukünftigen Versionen der Tritucap-Häcksler der Einbau von Dämpfungselementen unumgänglich. Die Erfassung der zwischen den Rotoren auftretenden Drehmomente würde die zur Auslegung dieser Komponenten nötigen Daten liefern können.

Bei Änderung der Konstruktion hin zu einem Riemenantrieb der Häckselrotoren

könnte durch die naturgemäß dämpfenden Eigenschaften dieser kraftschlüssigen Antriebsart eine Glättung der Drehmomentspitzen erreicht werden. Da die Energie aus den Drehmomenten bei Verwendung eines Riemenantriebs nur in Form von Schlupf und der daraus resultierenden Reibungswärme dem System entzogen werden kann, ist besonders sorgfältig abzuwägen, wie viel Schlupf toleriert werden kann, bevor die ohnehin hohen Umgebungstemperaturen am Einsatzort zu einer Überhitzung der Riemenantriebe führen könnten. Dieses Phänomen war mehrfach bei der Forstmulchfräse AHWI FM 600 an mehreren Komponenten des Antriebsstranges zu beobachten (vgl. Kapitel 6.3.2).

Die Einbringung hydraulisch arbeitender Dämpfungselemente (z. B. Strömungskupplungen) in die Antriebskonzeption der Tritucap-Häcksler erscheint daher als eine günstige Lösung da diese in der Regel verschleißfrei arbeiten. Die Abfuhr der durch die Dämpfung entstehenden Abwärme müsste durch entsprechende Lüftungseinrichtungen vorgenommen werden. Die Erfahrungen mit der Belüftung der Riemenscheiben und der Getriebekomponenten der Forstmulchfräse AHWI FM 600 (vgl. Kapitel 6.3.2) haben die hohe Effizienz dieses relativ einfachen Verfahrens gezeigt.

6.3.8 Weitere Aspekte des Maschineneinsatzes unter Bedingungen der Sekundärvegetation

Während des Einsatzes aller Häckselmaschinen zeigte sich schnell, dass eine Vielzahl von Faktoren die Arbeitsleistung beeinflussen. Neben der Beschreibung der Vegetationsstruktur einer jeden zu bearbeitenden Fläche wurde ein Teil der Eigenschaften der dort vorhandenen Spezies erhoben. Das daraus gewonnene Bild der bewachsenen Fläche gibt jedoch immer noch nur einen Teil der Einflussgrößen beim Häckseln wieder. Es sollen daher im Folgenden beispielhaft weitere Faktoren aufgezeigt werden, die die Arbeitsleistung der Maschinen beeinträchtigen können, jedoch nur qualitativ in die Datenstruktur aufgenommen wurden.

6.3.8.1 Naturräumliche Einflussfaktoren

Ein großer Faktor, dessen Einfluss auf die Arbeitsleistung der Maschinen nur unvollständig determiniert werden kann, ist die topographische Beschaffenheit der

Fläche. Sowohl Neigungen als auch Unebenheiten der Bodenoberfläche können die Arbeitsleistung beeinflussen. Verstopfungen durch das Einfahren in Erdaufhäufungen verzögern den normalen Arbeitsablauf und natürliche Anhäufungen von Erde oder Vertiefungen können, wenn sie nicht rechtzeitig vom Fahrer der Maschine erkannt werden, zu erheblichem Verschleiß der Werkzeuge führen, wenn diese mit hoher Geschwindigkeit in die Erde eingreifen.

Bestimmte Pflanzenarten können nicht oder nur mit großem Aufwand durch die Maschinen verarbeitet werden. Ein Beispiel hierfür ist die Palme *Attalea maripa*, die in kurzer Wuchszeit einen starken, faserigen Stamm bildet und in der Regel nicht maschinell beseitigt werden kann. Die in der Folge notwendigen Umfahrungen der auf der Fläche verbliebenen Stämme beeinträchtigen ebenfalls die Arbeitsleistung, da die Umfahrungen der Palme zwar in der Messdatei registriert werden, der Fahrer jedoch mit erhöhter Vorsicht agieren muss und damit die Arbeitsleistung geringer sein kann.

Neben diesen Faktoren, die im wesentlichen auf die Beschaffenheit der Fläche selbst zurückzuführen sind, kommt den klimatischen Bedingungen eine ebenfalls große Bedeutung zu. Die Verschlechterung der Sichtverhältnisse für den Fahrer ist schon bei feuchter Vegetation durch Spritzwasser aus dem Pflanzenmaterial erheblich. Es ist anzunehmen, dass diese Feuchtigkeit auch Einfluß auf die Zähigkeit des zu bearbeitenden Materials hat [HAKKILA 1989, SIMPSON 1993]. Auch die Befahrbarkeit des Bodens unter feuchten Bedingungen nimmt in der Regel ab. In Fluss- oder Bachniederungen gelegene Flächen werden besonders durch Staunässe schlecht befahrbar und die besonders feuchten Bereiche der Fläche müssen umfahren werden, was die Bearbeitung zusätzlich erschwert.

6.3.8.2 Einfluss der vorausgegangenen Flächennutzung und -bearbeitung

Die Jagd nach Gürteltieren auf den Bracheflächen ist in der Versuchsregion weit verbreitet. Die Jäger, die oft nicht die Eigentümer der Fläche sind, hinterlassen auf der Fläche tiefe Löcher, die gegraben wurden, um die Gürteltiere in ihren Bauten aufzuspüren. Die aufgeschüttete Erde wie auch die Löcher selbst stellen ein erhebliches Gefahrenpotenzial für die Bearbeitung mit der Maschine dar, da diese Löcher wie auch die Erdhaufen in der Regel in der geschlossenen Vegetation versteckt sind und meist nicht rechtzeitig durch den Fahrer beim Häckseln erkannt

werden können. Anders, als bei den im vorigen Kapitel angesprochenen Vertiefungen, bergen diese bis zu zwei Meter tiefen Gräben und Löcher nicht nur ein Risiko für erhöhten Werkzeugverschleiß, sondern das Risiko der Beschädigung von Maschinen- und Traktorkomponenten ist ebenfalls erheblich. Ein Traktor, der in solch ein tiefes Loch eingefahren ist, wird nur unter günstigen Bedingungen aus eigener Kraft aus einem solchen Hindernis wieder freikommen.

Die vorausgegangene Bearbeitung der Fläche mit Erdbewegungsmaschinen, wie z.B. Bulldozern oder der sog. *lamina,* einem an einen landwirtschaftlichen Traktor angebauten Planierschild, kann lokal zu Erdanhäufungen führen, die ebenfalls nur schwer in der dichten Vegetation zu erkennen sind und damit eine ähnliche Gefahr für die Maschine darstellen. In jedem Fall steigt der Anteil an notwendigen Wende- und Ausweichmanövern während der Bearbeitung, die zwar in die Dokumentation der Flächenbearbeitung einfließen und so in der statistischen Auswertung der Bearbeitungsleistung herausgerechnet werden können, jedoch in die Berechnung der Gesamtleistung inklusive aller Nebenzeiten sehr wohl eingehen.

Die durch die wiederholte Brandrodung entstandenen, ausgeglühten Wurzelstöcke können zum Teil erhebliche Dicken aufweisen, wodurch in der folgenden Bearbeitung diese die Häckselmaschine verstopfen oder überlasten können. Diese in der dichten Sekundärvegetation versteckten Baumstümpfe sind durch den Fahrer nicht unbedingt vorher zu erkennen. Die Bearbeitung einer solchen Fläche gebietet also eine Vorgehensweise mit erhöhter Vorsicht, was die Arbeitsleistung ebenfalls negativ beeinflussen wird.

6.3.8.3 Lage der Fläche

Gerade in Orten mit einer relativ kurzen Siedlungsgeschichte, wie z.B. die Flächen in der Gemeinde Vai-Quem-Quer im Munizip Barcarena, wiesen Residuen ungenutzten Starkholzes in den zu bearbeitenden Flächen auf.

Diese in der Fläche verbliebene Baumstämme, die teilweise seit mehreren Jahren dort liegen, entsprechend verrottet sind und damit von der Vegetation stark überwachsen sein können, haben eine erdige Farbe angenommen, was in der buschigen Vegetation ein rechtzeitiges Erkennen dieser Stämme vom Traktorsitz aus praktisch unmöglich macht, nicht zuletzt, weil die Vegetation selbst auch die Sicht auf den Boden vor der Maschine behindert.

Die notwendige Vorsicht bei der Bearbeitung begrenzte die Flächenleistung bis zu einem gewissen Maße. Diese Beeinträchtigungen konnten jedoch größtenteils in der Messdatei dokumentiert werden. Der Aufwand für die Maschinen- und Traktorwartung jedoch war um ein vielfaches höher, als dies beim Einsatz in den langjährig bewirtschafteten Flächen der Gemeinde Igarapé-Açú der Fall war. Die Beschädigung des Dieseltanks und einer Frontscheibe des Traktors durch einen eingedrungenen Ast ist dabei nur ein Beispiel von vielen.

Auch die eingesetzte Häckselmaschine wurde einer erhöhten Belastung ausgesetzt. Gerade beim Anfahren an einen in der Fläche verbliebenen Reststamm schlägt die Maschine teilweise hart an diesen an. Damit wird die gesamte Struktur der Maschine wie auch die des Traktors stark belastet. Vor allem aber sind die Antriebskomponenten einer erhöhten Belastung ausgesetzt, da das Auflaufen des Häckselrotors auf einen o.a. in der Fläche verbliebenen Stamm zum Blockieren des Rotors führen konnte.

Ein Zusammenhang zwischen der örtlichen Lage der Flächen und der Komposition der Pflanzengesellschaften wurde in dieser Arbeit nicht näher untersucht. Es lässt sich aufgrund des visuellen Eindrucks jedoch ein Zusammenhang vermuten. Gerade in der Gemeinde Nova Olinda, nördlich des Stadtgebietes von Igarapé-Açú, war der Anteil an Palmen der Art *Attalea maripa* wesentlich höher, als auf den Flächen der anderen Ortschaften. Die Bearbeitungsleistung kann dabei durch die in Kapitel 6.3.8.1 beschriebenen Zusammenhänge beeinflusst werden. Da diese Pflanzen aufgrund ihres enormen Durchmessers und der nicht gegebenen Bearbeitbarkeit jedoch aus der Erfassung der strukturellen Daten weitestgehend ausgeschlossen wurden, lässt sich der statistische Nachweis für diese Aussage nicht erbringen.

6.4 Vergleichende Betrachtungen

6.4.1 Einflussfaktoren auf die Bearbeitungsleistung

Die unterschiedliche Konzeption der beiden Häckselsysteme Tritucap und Forstmulcher bedingt die Unterschiedlichkeit der Arbeitsweise und Arbeitsergebnisse der Maschinen. Eine direkte Vergleichbarkeit kann nicht oder nur schwer hergestellt werden. Die Auswertung der Bearbeitungsdaten hat dies

belegt.

Die Flächenleistung der Tritucap 2 auf den untersuchten Flächen ist wesentlich stärker durch die Stärke der zu bearbeitenden Vegetation beeinflusst, als die der FM 600. Die Beeinflussung der FM 600 durch die Vegetation war ebenfalls nachzuweisen, der Effekt war bei den vorliegenden Flächen jedoch deutlich geringer ausgeprägt, als bei der Tritucap 2.

Es muss allerdings auf die geringe Breite der Datenbasis für die Tritucap-Häcksler hingewiesen werden. Da in die Auswertung der beiden Tritucap-Häcksler nur jeweils zwei Flächen einfließen konnten, ist das Ergebnis für den Forstmulcher AHWI FM 600 mit 33 ausgewerteten Flächen statistisch besser abgesichert.

6.4.2 Qualität der Flächenbearbeitung

Bei der subjektiven Bewertung aller bearbeiteter Flächen ließ sich die Tendenz beobachten, dass bei der Bearbeitung von Flächen mit geringer Phytomasse mit der FM 600 Hackschnitzel produziert wurden, die weniger aufbereitet waren, als dies bei Flächen mit höherer Phytomasse der Fall war. Längere dünnere Äste wurden praktisch nicht aufbereitet. Die Flächen mit höherer Phytomasse wiesen nach der Bearbeitung Hackschnitzel in der o.a. Form und Größe auf. Diese Beobachtungen können nicht durch eine statistische Auswertung der Bearbeitungsergebnisse gestützt werden, da nur für eine Fläche die Untersuchung der Hackschnitzelgrößen und –qualitäten durchgeführt wurde vgl. Kapitel 6.3.5). Die Beobachtung legt jedoch den Schluss nahe, dass zur Erreichung der beschriebenen Hackschnitzelqualitäten eine gewisse Masse an Pflanzenmaterial zur Verfügung stehen muss.

Die subjektive Bewertung des Arbeitsergebnisses der Tritucap-Häcksler hat diese Abhängigkeit von der Phytomasse nicht gezeigt. Auch bei Flächen mit geringer Phytomasse werden homogene Hackschnitzelqualitäten produziert, die sich nicht von den untersuchten unterscheiden. Diese Beobachtungen sind jedoch ebenfalls nicht durch erhobene Daten belegbar.

Eine Erklärung für die geschilderten Beobachtungen liefert die Arbeitsweise der unterschiedlichen Häckslersysteme. Die Aufbereitung des abgesägten Pflanzenmaterials im Tritucap-Häcksler findet im Innern der Maschine statt und jegliches Material passiert den Aufbereitungspfad. Bei der AHWI FM 600

befindet sich der Aufbereitungspfad für den ersten Schritt außerhalb der Maschine. Der Häckselrotor arbeitet im „freien Schnitt“, die zu trennenden Pflanzen werden nur durch die Verbindung mit dem Wurzelstock gegen den Rotor gestützt und letztendlich durch den Rotor überfahren und gegen den Boden gedrückt. Dabei zerkleinert der Rotor die gefällte Vegetation grob. Im zweiten Arbeitsschritt muss dieses Material durch den Häckselrotor aufgenommen werden und wird dann durch die in der Maschine eingebauten Gegenschneiden weiter aufbereitet. Bei Flächen geringer Phytomasse ist die auf dem Boden liegende Schicht des vorzerkleinerten Materials dünner und kann daher nur unvollständig aufgenommen werden. Der Rotor der manuell über der Bodenoberfläche geführten FM 600 wird also gerade bei geringerer Phytomasse der Fläche relativ weniger Pflanzenmaterial aufnehmen können und damit nimmt die Gefahr des Eingriffs des Rotors in den Oberboden zu. Bei stärkerer Bedeckung des Bodens mit vorgehäckseltem Pflanzenmaterial wird die Gefahr des Rotoreingriffs in den Boden gemindert, da die Maschine durch die auf der Pflanzendecke geführten Gleitkufen höher über die Bodenoberfläche gehalten wird. Das Pflanzenmaterial kann aufgrund der Dicke der Deckschicht leichter durch den Rotor aufgenommen und in der Maschine aufbereitet werden. Man kann vermuten, dass gerade bei Flächen mit geringerer Phytomasse daher die Hackschnitzelqualität näherungsweise derjenigen entspricht, wie sie nach dem ersten Bearbeitungsschritt vorliegt. An dieser Stelle sollte eine weitere Untersuchung ansetzen, die zum Einen die optimalen Hackschnitzelqualitäten und zum Anderen ihre Einflussfaktoren ermittelt.

6.4.3 Auswahlkriterien für eine Häckselmaschine

6.4.3.1 Trennverfahren der Häckslerkonzepte

Die Erhaltung des vitalen Wiederaustriebs der Sekundärvegetation aus den Wurzelstöcken nach der Flächenvorbereitung ist ein grundlegendes Element der nachhaltigen Bewirtschaftung der Ackerflächen im Projektgebiet. Die o.a. Beobachtungen bei der Bearbeitung von deutschen Weiden- und Pappelplantagen müssen in diesem Zusammenhang berücksichtigt werden. Während die mit der Tritucap bearbeiteten Plantagenflächen einen schnellen und vitalen

Wiederaustrieb zeigten, lag die Mortalität der mit dem Forstmulcher bearbeiteten Pflanzen bei 100 %. Diese in Deutschland durchgeführte Untersuchung lässt nicht unbedingt direkte Rückschlüsse auf die Reaktion der Pflanzen in tropischen Gebieten zu. Die Reaktion von Eukalyptuspflanzen auf die Bearbeitung mit dem Forstmulcher zeigte jedoch ähnliche Tendenzen. Man kann also durchaus eine schonendere Behandlung der Wurzelstöcke beim Einsatz der Doppelrotorhäcksler vermuten, die sich durch das Trennverfahren des Maschinenkonzepts begründen lässt. Der Rotor der FM 600 drückt gegen die zu trennenden Pflanzen und schlägt diese dann grob vom Wurzelstock ab, wobei gerade die Pflanzen mit kleinerem Durchmesser bereits vorher umgedrückt werden und durch die Überfahrung mit dem Rotor vom Wurzelstock getrennt werden. Dieses konnte in Flächen mit jüngerer Brachevegetation beobachtet werden, da hier noch eine Vielzahl von holzigen Pflanzen kleineren Durchmessers nicht oder nur teilweise abgetrennt war. Das muss vor allem dann gelten, wenn der Abstand des Rotors zur Bodenoberfläche größer ist, als der Durchmesser der Pflanzen. Bei der tendenziell großen Flexibilität der jungen Pflanzen werden diese umgebogen und richten sich nach der Überfahrt teilweise wieder auf. Im zweiten Bearbeitungsschritt mit der FM 600 werden diese kleineren Pflanzen teilweise noch erfasst und durch die neuerliche Bearbeitung vom Wurzelstock getrennt. Diese Hypothese wird durch die o.a. Beobachtungen (vgl. Kapitel 6.3.5)gestützt.

Das Sägen der Stämme stört das Wurzelsystem der Pflanzen offensichtlich weniger, als die eher reißende Bearbeitung mit den starren Werkzeugen auf dem Häckselrotor der FM 600. Eine längerfristige Untersuchung der mit den verschiedenen Häckslern bearbeiteten Flächen sollte daher die Änderung der Pflanzengesellschaften unter dem jeweiligen Eingriffsregime fokussieren. Ansätze hierzu sind bereits bei DENSLOW (1980) sowie UHL ET AL. (1990) zu finden, die jedoch nicht die mechanisierte Flächenbearbeitung betrachten. WIESENMÜLLER (1999) hat bereits eine Untersuchung der Beeinflussung des Wurzelsystems bei mechanischer Bearbeitung durchgeführt. Hier wurden jedoch hauptsächlich Verfahren zur wendenden Bodenbearbeitung untersucht.

6.4.3.2 Überschlägige Kostenkalkulation

Entscheidungskriterium für den praktischen Einsatz wird die Wirtschaftlichkeit des verwendeten Häckselsystems sein. Eine grob überschlägige Berechnung der

Kosten für den Einsatz der beiden Maschinentypen ist im Anhang aufgeführt. Dort ist auch die Herkunft der zur Kalkulation verwendeten Zahlen zur Ermittlung der variablen und fixen Kosten dargestellt.

Bei den Kalkulationen wird davon ausgegangen, dass die Dauer des Betriebs des Häckslers nicht identisch mit der Betriebsdauer des Traktors ist. Fahrten von und zu Flächen sowie Wartungsmaßnahmen sind aus den Bedingungen des Versuchbetriebes ermittelt worden. Die angenommene Lebensdauer der Maschinen und des Traktors gründet sich darauf, dass unter den harten Einsatzbedingungen in tropischer Brachevegetation die Maschinen einer hohen Abnutzung unterliegen. Damit ist für den verwendeten Traktor nur eine Lebensdauer von 6.000 Betriebsstunden angenommen worden. Die Lebensdauer der jeweiligen Häckselmaschine ist unter den Bedingungen rein spekulativ, jedoch wahrscheinlich eher niedrig angenommen. Die Kosten der Anschaffung der Maschinen gründen sich auf konkrete Angebote lokaler Firmen im Falle der Traktoren oder, im Falle der Maschinen auf Herstellerangaben und eigene Berechnungen. Die Reparaturkosten für den Traktor wurden pauschal mit 4 % der Anschaffungssumme jährlich veranschlagt, die der Maschinen wurden aus den vorliegenden Erfahrungen kalkuliert. Die durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchswerte für die einzelnen Phasen des Einsatzes („Häckseln“, „Fahrten“, „Wartung“) wurden im Versuchbetrieb ermittelt. Der Stundenlohn der Fahrers entspricht dem eines hochqualifizierten Facharbeiters oder Fahrers.

6.4.3.2.1 Annahmen

Zur Berechnung wurden für den jeweiligen Maschinentyp typische Einsatzflächen angenommen. Für die Tritucap 2 wurde in Anlehnung an die bereits in Kapitel 5.3.2 dargestellten Werte eine mittlere Flächenleistung von 0,3 ha/h angenommen. Die mittlere Flächenleistung der AHWI FM 600 wurde mit 0,35 ha/h angesetzt. Dieses resultiert aus der Betrachtung der mit dieser Maschine bearbeiteten Flächen, wobei Flächen mit einer Phytomasse von weniger als 40 t/ha oder einer Brachedauer von unter vier Jahren nicht berücksichtigt wurden, da sie als untypisch für die Bearbeitung mit der FM 600 angesehen wurden. Es wurden für beide Maschinen zwei Finanzierungsszenarios angenommen. Im ersten Szenario werden die Kosten für einen zu leistenden Kapitaldienst (Zinsen und Tilgung) nicht berücksichtigt.

Szenario 1:

Die sogenannten „patrulhas mecanizadas“ („mechanisierte Landtechnik-Einheiten“) stellen bereits für Kleinbauern eine Möglichkeit dar, ihre Flächen mechanisch bearbeiten zu lassen. Der Staat stellt einige zur Bearbeitung notwendige Maschinen auf Gemeindeebene organisierten Einheiten zur Verfügung und der Einsatz muss durch den Kleinbauern mit einem Beitrag für den Kraftstoff entlohnt werden. Unter der Maßgabe, dass die Regierung den bestehenden „patrulhas mecanizadas“ oder einer Genossenschaft einen Traktor mit der Maschine zur Verfügung stellte und von diesen nicht finanziert werden müsste, könnte man bei der Berechnung der Kosten den Kapitaldienst unberücksichtigt lassen.

Szenario 2:

Im zweiten Szenario muss sowohl der jeweilige Häcksler wie auch der zugehörige Traktor zu einem hohen Zinssatz zu 100 % fremdfinanziert werden. Der Zinsfuß ist dabei mit 20 % veranschlagt worden, was mit einem Sicherheitszuschlag in etwa den üblichen Zinssätzen für Agrarinvestitionsprogramme in Brasilien entspricht [BNDES 2004a, BNDES 2004b]. Spezielle Modalitäten der Finanzierung wie Förderhöchstbeträge, Tilgungsbedingungen oder Karenzzeiten wurden in der Rechnung nicht berücksichtigt. Dieses Szenario würde für Lohnunternehmer und Genossenschaften Gültigkeit haben, welche die Maschine finanzieren müssten und Zugriff auf die entsprechenden Kredite hätten. Die Vorbereitung der Flächen würde den Bauern als Dienstleistung angeboten.

6.4.3.2.2 Ergebnisse der Berechnung

Das Ergebnis der Berechnungen wird in der folgenden Tabelle 31 dargestellt. Die detaillierte Darstellung der Berechnungen ist im Anhang aufgeführt (vgl. Tabelle A- 1 – Tabelle A- 13).

Der Vergleich der Kosten der Bearbeitung mit der entsprechenden Maschine zeigt, dass die Tritucap etwas günstiger ist. Es wird die Annahme getroffen, dass mit beiden Maschinen derselbe Traktortyp verwendet wird und damit die variablen Kosten ähnlich sind. Allein die unterschiedlichen Kraftstoffverbräuche

je Betriebsstunde beim Betrieb mit der jeweiligen Maschine wirken sich aus.

Tabelle 31: Gegenüberstellung der Kosten der Flächenbearbeitung mit Tritucap 2 und AHWI FM 600

Szenario			Tritucap 2	AHWI FM 600
Szenario 1:	**Kosten je Betriebsstunde ohne Kapitaldienst**			
	variable Kosten	R$/h	53,96	57,93
	fixe Kosten	R$/h	82,60	114,35
	Gesamtkosten je Betriebsstunde	**R$/h**	**136,56**	**172,28**
Szenario 2:	**Kosten je Betriebsstunde mit Kapitaldienst**			
	variable Kosten	R$/h	53,96	57,93
	fixe Kosten	R$/h	162,27	209,85
	Gesamtkosten je Betriebsstunde	**R$/h**	**216,23**	**267,78**
Szenario 1:	**Kosten je Hektar ohne Kapitaldienst**			
	variable Kosten	R$/ha	179,88	165,50
	fixe Kosten	R$/ha	275,34	326,73
	Gesamtkosten je Hektar	**R$/ha**	**455,22**	**492,23**
Szenario 2:	**Kosten je Hektar mit Kapitaldienst**			
	variable Kosten	R$/ha	179,87	165,50
	fixe Kosten	R$/ha	540,89	599,56
	Gesamtkosten je Hektar	**R$/ha**	**720,76**	**765,06**

Hierzu muss angemerkt werden, dass eine Bearbeitung von Flächen mit kürzerer Brachedauer auch mit einem Traktor mit geringerer Leistung durchzuführen wäre, was die variablen wie auch die fixen Kosten für den Traktor erheblich senken könnte. Dieses würde die Gesamtkosten ohne Kapitaldienst auf ca. 395 R$/ha, die Gesamtkosten inklusive Kapitaldienst auf ca. 620 R$/ha reduzieren. Die Annahmen gelten für einen Traktor mit 75 kW Motorleistung, entsprechend geringeren Anschaffungskosten und einem geringeren Kraftstoffverbrauch.

Die Reparaturkosten werden den Fixkosten zugerechnet. Das höhere Investitionsvolumen für die AHWI FM 600 ist ausschlaggebend für die höheren Fixkosten, wodurch der Anteil für Abschreibungen (ohne Kapitaldienst), bzw. Tilgung und Zins (mit Kapitaldienst) und der prozentuale jährliche Reparaturkostenansatz entsprechend höher wird.

Es muss betont werden, dass diese Kalkulationen auf der Grundlage des während des Versuchsbetriebs ermittelten Daten erfolgt sind. Im gewerblichen Einsatz können die Rahmenbedingungen verschieden von den untersuchten sein, sei es im Bezug auf die räumliche Nähe der Flächen oder auch im Bezug auf die zu bearbeitenden Flächen. Des weiteren kann nicht davon ausgegangen werden, dass sofort ein qualifizierter Fahrer für die Maschine zur Verfügung steht. Damit wird, gerade in der Anfangsphase, die Flächenleistung geringer sein, u.U. in

Verbindung mit höheren Reparaturkosten, die durch Fehlbedienungen oder Fehleinschätzungen verursacht sein können.

Für die betroffenen Bauern der Region stellt sich die Frage der Kosten des Maschineneinsatzes bereits ganz zu Beginn der Flächenbearbeitung einer Brachefläche. Das bedeutet, dass der Maschineneinsatz zunächst eine mittelfristige Investition darstellt, die erst nach der nächsten Ernte einen Kapitalrückfluss bringen kann. Trotzdem gehen DENICH ET AL. [2004] in einer ersten Analyse davon aus, dass die positiven Effekte des Maschineneinsatzes die Kostensteigerung der Flächenvorbereitung bei weitem kompensieren und damit für die Kleinbauern eine ökonomisch vernünftige Option der Flächenbewirtschaftung darstellt. Dieses beruht hauptsächlich auf den positiven Effekten des Mulchens, die sich im wesentlichen folgendermaßen darstellen:

- Unterdrückung der Beikrautvegetation durch die Mulchdecke, dadurch geringerer Aufwand für Beikrautbeseitigung,
- Mögliche Verlängerung der Anbauphase durch steigende Bodenfruchtbarkeit,
- Änderung des Anbaukalenders möglich durch Unabhängigkeit von Trockenphase des Jahres zur Flächenvorbereitung, dadurch potentiell bessere Produktpreise erzielbar, höhere Anbauflexibilität,
- potentiell steigende Erträge durch steigende Bodenfruchtbarkeit, dadurch höhere Erlöse je Fläche realisierbar.

Die durch diese Effekte steigenden Erlöse und Einkommen könne die gestiegenen Kosten der Flächenvorbereitung überkompensieren [DENICH ET AL. 2004].

6.5 Fazit

Nach den vorliegenden Erkenntnissen scheinen die Vorteile der AHWI FM 600 in der Möglichkeit der Bearbeitung von stärkeren Brachevegetationen zu liegen, da diese durch die Tritucap aufgrund ihrer Konstruktion nicht bearbeitet werden können. Man kann jedoch davon ausgehen, dass die Tritucap 2 schwächere Bestände mit höheren Flächenleistungen, homogeneren Hackschnitzelqualitäten und geringerer Beeinflussung des Wurzelsystems bearbeiten kann als die FM 600.
Die Auswahl einer zur Vorbereitung einer Bracheflächе geeigneten Häckselmaschine richtet sich also zunächst nach der Struktur der zu bearbeitenden Vegetation bzw. der Brachedauer. Ist die Fläche von einer relativ schwachen Vegetation bewachsen, so ist der Einsatz der Tritucap, abgesehen von den o.a. Gründen schon aus Kostengründen dem der AHWI FM 600 vorzuziehen. Flächen mit stärkerer Vegetation bei längerer vorhergegangener Brachephase können ggf. nur durch die AHWI FM 600 bearbeitet werden. Selbst bei der Möglichkeit der Bearbeitung dieser Fläche durch die Tritucap 2 würde die Flächenleistung vermutlich soweit sinken, dass der Einsatz der AHWI FM 600 günstiger wäre. Ein Konzept zur Mechanisierung der Mulchwirtschaft sollte also beide Häckslertypen berücksichtigen, die dann entsprechend der Anforderungen eine nach den jeweiligen Verhältnissen nach ökonomischen Gesichtspunkten optimale Flächenvorbereitung liefern könnten. Mittelfristig könnte die Flächenleistung der Maschinen noch leicht ansteigen, da bei regelmäßiger Bearbeitung der Bracheflächen mit den Maschinen der Anteil an aus der Brandrodung verbliebenen Baumstümpfen und anderen Hindernissen abnehmen wird. Dies wirkt sich direkt auf die Kosten der Bearbeitung aus (vgl. Kapitel 6.3.8). Die AHWI FM 600 würde also vermutlich zur Räumung von Flächen mit einer Brachedauer von mindestens vier bis fünf Jahren eingesetzt. Die weitere regelmäßige Bearbeitung im Dreijahresrhythmus würde kostengünstiger von der Tritucap durchgeführt werden können.
Der Raupentraktor RT 350 kann im Einsatz in kleinstrukturierter Familienlandwirtschaft seine Vorteile nicht zur Geltung bringen. Er kann jedoch eine Option der nicht brennenden Flächenvorbereitung bzw. Flächenräumung auf großflächigen Plantagenflächen darstellen. Die hohe Motorleistung in Kombination mit einem Raupenkettenfahrwerk ermöglicht den Einsatz in stärkster

Vegetation unter widrigen Geländebedingungen. Selbst Hangneigungen bis zu 40° sind noch durch den RT 350 befahrbar [PHILIPP 2001]. Als Spezialmaschine ist er jedoch nicht sinnvoll in kleinstrukturierten Flächen einsetzbar.

Zur Umsetzung eines Gesamtkonzepts, das die AHWI FM 600 und die Tritucap 2 beinhaltet, müssen an beiden Maschinen noch Modifikationen vorgenommen werden, die dann den Einsatz der Maschinen in der gewerblichen Praxis möglich machen. Daher scheint die konsequente Fortführung der Forschungsarbeit an beiden Maschinen sehr empfehlenswert, nicht zuletzt daher, dass die Schwachpunkte der Maschinen ermittelt werden konnten und vermutlich durch die angesprochenen Modifikationen behoben werden können.

7 Zusammenfassung

In den feuchten Tropen des Bragantina-Gebietes in Nord-Ost-Amazonien Brasiliens basiert die kleinbäuerliche Landwirtschaft auf der Nutzung des regenerativen Potentials der Sekundärvegetation, die nach einer Brachedauer von mehreren Jahren zur Vorbereitung der Anbauphase geschlagen und verbrannt wird, wobei die auf der Fläche verbleibende Asche die Düngung für die folgenden Feldfrüchte darstellt. Die hohen Nährstoffverluste beim Brennen der Vegetation führen langfristig zu einem Verlust an Ertragspotential der Flächen und daher ist dieses System gerade bei verkürzten Brachephasen als nicht nachhaltig zu bewerten. Der Verzicht auf das Brennen bei der Flächenvorbereitung und die Umwandlung der Vegetation zu einer Mulchschicht stellt ein alternatives, nachhaltiges Flächennutzungssystem dar. Zu seiner Implementierung ist die Mechanisierung der Mulchgewinnung unabdingbar. Ein für diese Belange im Institut für Agrartechnik der Universität Göttingen entwickelter Prototyp des Gehölzmähhäckslers „Tritucap“ wurde in zwei Versionen vergleichend mit einem kommerziell verfügbaren Forstmulchgerät der Marke „AHWI“ vom Typ „FM 600“ in der Untersuchungsregion in Nord-Ost-Amazonien eingesetzt. Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, die Anwendbarkeit zu untersuchen und Charakteristika dieser Häckselsysteme in Abhängigkeit von der zu bearbeitenden Vegetation zu ermitteln.

Es wurden zunächst Merkmale untersucht, die geeignet sind die heterogene Vegetation zu charakterisieren. Auch wenn die Heterogenität der Vegetation keine umfassende Beschreibung mit vertretbarem Aufwand zulässt, konnten dennoch die Hauptcharakteristika ermittelt werden. Die Länge der Brachephasen der zu bearbeitenden Flächen stellt dabei ein wichtiges Merkmal zur einfachen Flächenbeschreibung dar. Als detailliertere Merkmale sind hier der mittlere Pflanzendurchmesser, die mittlere Höhe der Pflanzen sowie die Phytomasse der Fläche zu nennen.

Die beiden eingesetzten Prototypen des Tritucap-Häckslers haben ihre prinzipielle Funktionsfähigkeit unter Beweis gestellt und es konnten erste Betriebs- und Leistungsdaten erfasst werden. Die Flächenleistung der Maschinen hängt dabei im wesentlichen von der Struktur der Vegetation ab. Es wurden beim Einsatz des

zweiten, verbesserten Prototypen der Tritucap im Mittel 0,28 ha/h Sekundärvegetation gehäckselt.
Das Forstmulchgerät AHWI FM 600 ist als in Deutschland produzierte Serienmaschine unverändert in Nord-Ost-Amazonien eingesetzt worden und hat ebenfalls seine Funktion in der dortigen Vegetation unter Beweis stellen können. Die Flächenleistung für diese Maschine wird ebenfalls im wesentlichen von der Struktur der Vegetation bestimmt. Mit dieser Maschine konnten im Mittel 0,39 Hektar pro Stunde bearbeitet werden.
Zur Beschreibung der Qualität der produzierten Hackschnitzel wurde von der Annahme ausgegangen, dass diese, abhängig von Größe und Zerfaserungsgrad, unterschiedlich schnell zersetzt werden. Daher wurden die durch Siebung ermittelte Größe wie auch die Form und der Aufbereitungsgrad der Hackschnitzel als Parameter zur Beschreibung der Qualität herangezogen. Da die ideale Zusammensetzung einer Mulchdecke bislang nicht in klaren Vorgaben gefasst ist, konnte eine Wertung der Hackschnitzelqualität im Hinblick auf eine optimale Beschaffenheit bislang nicht vorgenommen werden.
Auch wenn sich während des Einsatzes der beiden Häckslerkonzepte vor allem an den Antriebskomponenten beider Systeme Schwächen gezeigt haben, ist das prinzipielle Funktionieren nachgewiesen.

Damit hat die Untersuchung gezeigt, dass die Mechanisierung der Mulchwirtschaft möglich ist. Ein Konzept zur praktischen Umsetzung sollte beide Maschinentypen vorsehen, da sowohl die Bearbeitungsleistung, die Qualität der Bearbeitung als auch die Kostenstruktur des Einsatzes der Tritucap den Einsatz vor allem in schwächerer Brachevegetation mit Brachedauern von bis zu vier Jahren sinnvoll macht, der Einsatz des Forstmulchgerätes hingegen in stärkerer Vegetation mit Brachedauern von über 4 Jahren sinnvoll ist. Flächen, auf denen noch keine mechanische Bearbeitung der Vegetation stattgefunden hat sollten ebenfalls zunächst mit dem Forstmulcher bearbeitet werden.
Die Maschinen sind keine konkurrierenden Konzepte, sondern können sich in einem System der nachhaltigen Landbewirtschaftung tropischer Ackerflächen gegenseitig sinnvoll ergänzen.

8 Literaturverzeichnis

ACKERMANN, F.L. (1964): Geologia e Fisiografia da Região Bragantina (Estado do Pará). INPA, Manaus, Cadernos da Amazônia 2, S. 1-90.

AGUIAR, O. (2002): mündliche Auskunft in der Embrapa Amazonia Oriental, Laboratório do Setor de Agroindústria, Belém, Juni 2002.

ALVES, D.S. (2001): Deforestation and Frontier Expansion in Brazilian Amazonia. Open Meeting of the Global Environmental Change Research Community, Rio de Janeiro, Oktober 2001.

ALVES, M. K. L. (2001): Avaliação do desempenho operacional de um equipamento triturador de resíduos da colheta florestal. Relatório Técnico. Guaíba 2001.

BAAR, R. (1997): Vegetationskundliche und –ökologische Untersuchungen der Buschbrache in der Feldumlagewirtschaft im östlichen Amazonasgebiet. Göttinger Beiträge zur Land- und Forstwirtschaft in den Tropen und Subtropen, 121.

BAENA, A.R.C.; FALESI, I.C.; DUTRA, S. (1998): Características fisio-químicas do solo em diferentes agroecossistemas na região bragantina do nordeste paraense. Embrapa-CPATU, Boletim de Pesquisa 185, Belém, Brasilien.

BÄRISCH, G. ET AL. (1982): Grundlagen der Forsttechnik. Fachwissen des Forstingenieurs. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag. Berlin

BEHN, W. (1998): mündliche Auskunft am 04.03.1998. Institut für Agrartechnik der Georg-August-Universität, Göttingen.

BEURLEN, K. (1970): Geologie von Brasilien. Beiträge zur regionalen Geologie der Erde. Bornträger, Berlin.

BLOCK, A.; LÜCKE, W.; DENICH, M.; VLEK, P.L.G. (1998): Newly developed bush-chopper to avoid burning of secondary forest in agricultural fallow systems in the tropics. In: Salokhe, V.M.; Jianxia Zhiang (Hrsg.): Proceedings of the International Agricultural Engineering Conference, Volume 1, S. 934-941, 07.-08.12.1998, Asian Institute of Technology, Bangkok, 1998, Thailand.

BLOCK, A. (1999): Entwicklung und Erprobung eines Doppelrotorhackers als Alternative zur Brandrodungswirtschaft in Nord-Ost-Amazonien. Diplomarbeit, 1999, 84 S., Göttingen.

BNDES (2004)A: Banco Nacional de Desenvolvimento, Programa de Modernização da Agricultura e Conservação de Recursos Naturais-MODERAGRO http://www.finame.com.br/produtos/agropecuario/moderagro.asp, 13.01.2004.

BNDES (2004)B: Banco Nacional de Desenvolvimento, Modernização da Frota de Tratores Agrícolas e Implementos Associados e Colhetadeiras-MODERFROTA http://www.finame.com.br/produtos/agropecuario/frotaag.asp, 13.01.2004.

BÖHM, T. & HARTMANN, H. (2002): Größenverteilung von Holzhackschnitzeln. Landtechnik 57, S. 152-153.

BRIENZA JÚNIOR, S. (1999): Biomass Dynamics of Fallow Vegetation Enriched with Leguminous Trees in the Eastern Amazon of Brazil. Göttinger Beiträge zur Land- und Forstwirtschaft in den Tropen und Subtropen, 134.

BRIENZA JÚNIOR, S.; DENICH, M.; FÖLSTER, H.; VLEK, P.L.G. (2000): Enriching fallow vegetation in the Eastern Amazon of Brazil: Towards improving land-use. Neotropical Ecosystems. Proceedings of the German-Brazilian Workshop, Hamburg 2000, S. 683-686.

BROWN, S.; LUGO, A.E. (1992): Biomass of Brazilian Amazonian forest: the need

for good science. Interciencia, Vol. 17, Issue 4, 1992, S. 201-203.

BRUSCHE, R. (1983): Hackschnitzel aus Schwachholz. Bergung, Lagerung und Trocknung. KTBL-Schrift, 290. Münster-Hiltrup.

CATTANEO, A. (2002): Balancing agricultural development and deforestation in the Brazilian Amazon. Research Report 129. International Food Policy Research Institute. Washington D.C., USA.

CATTANIO, J.H.; KÜHNE, R.F.; VLEK, P.L.G. (2000): Screening the resource quality of mulch derived from improved fallow systems in eastern Brazil. Neotropical Ecosystems. Proceedings of the German-Brazilian Workshop, Hamburg 2000, S. 907-912.

CATTANIO, J. H. (2002): Soil N mineralization dynamics as affected by pure and mixed application of leavy material from leguminous trees used in planted fallow in Brazil. Georg-August-Universität, Göttingen. Fakultät für Agrarwissenschaften. Dissertation. http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2002/cattanio/index.html.

CHABRIER, P; MARTIN, P. (1999): An overview of methods for monitoring circular saw blade preparation. Holz als Roh- und Werkstoff, Vol. 57, 1999, S. 157-163.

CHANCELLOR, W.J. (1987): Cutting of biological materials. In: Brown, R. (Hrsg.): Agr. Eng. Handbook, CRC Press Inc. 1987.

CLAUSING, G. (1994): Frühe Regeneration und Wiederbesiedelung auf Kulturflächen der Wald-Feld-Wechselwirtschaft im östlichen Amazonasgebiet. Göttinger Beiträge zur Land- und Forstwirtschaft in den Tropen und Subtropen, 97.

COCHRANE, M.A.; SCHULZE, M.D. (1999): Fire as a recurrent event in tropical forests of the eastern Amazon: effects on forest structure, biomass and species composition. Biotropica 31, 1999, S. 2-16.

COCHRANE, M.A. (2001): Synergistic interactions between habitat fragmentation and fire in Evergreen tropical forests. Conservation Biology 15, 2001, S. 1515-1521.

COCHRANE, M.A..; SKOLE, D.L.; MATRIARDI, E.A.T.; BARBER, C.; CHOMENTOWSKI, W. (2002): Interaction and synergy between selective logging, forest fragmentation and fire disturbance in tropical forests: Case study Mato Grosso, Brazil. CGCEO, Center for Global Change and Earth Observations, Report. 2002.

DA SILVA JR., M.L.; VIELHAUER, K.; DENICH, M.; VLEK, P.L.G. (1998): Can tree enrichment of secondary vegetation and fire-free land preparation by cutting, chopping and mulching improve the following crops? In: Proceedings of the Third SHIFT-Workshop Manaus, 15.-19. März 1998.

DENICH, M. (1989): Untersuchungen zur Bedeutung junger Sekundärvegetation für die Nutzungssystemproduktivität im östlichen Amazonasgebiet, Brasilien. Göttinger Beiträge zur Land- und Forstwirtschaft in den Tropen und Subtropen, 46.

DENICH, M.; KANASHIRO, M. (1993): Secondary vegetation in the agricultural landscape of Northeast Pará, Brazil. Proceedings of the First SHIFT-Workshop in Santarem, Brazil, 1993, S. 12-21.

DENICH, M. (1996): Ernährungssicherung in der Kleinbauernlandwirtschaft Ostamazoniens- Probleme und Lösungsansätze. Göttinger Beiträge zur Land- und Forstwirtschaft in den Tropen und Subtropen Nr. 115, S. 78-88, 1996.

DENICH, M.; BLOCK, A.; LÜCKE, W.; VLEK, P.L.G. (1998): A bush chopper for mulch production in fallow-based agriculture and resource conservation. In: Proceedings of the Third SHIFT-Workshop Manaus, 15.-19. März 1998.

DENICH, M.; KANASHIRO, M. (1998): Potential land-use and management of

altered and abandoned areas in the Brazilian Amazon region. In: Studies on Human Impact of Forest and Floodplains in the Tropics-SHIFT. CNPq/ MCT.

DENICH, M., VLEK, P.L.G.; SÁ, T.D. DE A.; VIELHAUER, K.; LÜCKE, W. (2000): A research concept for the development of Alternatives to Slash-and-Burn agriculture in the eastern Amazon region. Neotropical Ecosystems. Proceedings of the German-Brazilian Workshop, Hamburg 2000, S. 689-696.

DENICH, M.; VIELHAUER, K.; KATO, M.S.A.; BLOCK, A.; KATO, O.R.; SÁ, T.D. DE A.; LÜCKE, W.; VLEK, P.L.G. (2004): Mechanized land preparation in forest-based fallow systems: The experience from Eastern Amazonia. In: NAIR, P.K.R; RAO, M.R.; BUCK L.E. (Hrsg.): New Vistas in Agroforestry: A compendium for the 1st World Congress of Agroforestry. Kluwer, Dordrecht, Niederlande, 2004. Ebenso in: Agroforestry Systems 61, 2004.

DE ROUW, A. (1995): The fallow period as a weed-break in shifting cultivation. Agriculture, Ecosystems & Environment 54, 1995, S. 31-43.

DENSLOW, J.S. (1980): Patterns of plant species diversity during succession under different disturbance regimes. Oecologia 46, 1980, S. 18-21.

DEWALT, S.J.; SCHNITZER, S.A.; DENSLOW, J.S. (2000): Density and diversity of lianas along a chronosequence in a central Panamaian lowland forest. Journal of Tropical Ecology, Vol. 16, S. 1-19, 2000.

DIEKMANN, U. (1997): Biologische und chemische Bodencharakteristika zur Beurteilung der nachhaltigen Produktivität von Landnutzungssystemen in der Zona Bragantina, Ost-Amazonien. Georg-August-Universität, Göttingen. Fakultät für Agrarwissenschaften. Dissertation.
http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/1998/diekmann/inhalt.htm

DOBLER, K. (1972): Der freie Schnitt beim Mähen von Halmgut. Hohenheimer Arbeiten, 62. Schriftenreihe der Universität Hohenheim. Eugen Ulmer; Stuttgart.

DOS SANTOS, J.M. (1987): Climate, natural vegetation, and soils in Amazonia: an overview. In: The Geophysiology of Amazonia: Vegetation and Climate Interactions. Robert ED (Hrsg.). Wiley, New York, S. 25-36.

DUBOIS, J.C.L. (1990): Secondary forests as a land-use resource in frontier zones of Amazonia. In: Anderson, A.B. (Hrsg.): Alternatives to deforestation: steps toward sustainable use of the amazon rain forest. 1990. Columbia University Press, New York, USA, S. 183-194.

EGLER, E.G. (1961): A Zona Bragantina no Estado do Pará. Revista Brasileira de Geografia 23, S. 527-555.

EMBRAPA (1999): Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Brasilien.

ETTELT, B. (1997): Sägen, Fräsen, Hobeln, Bohren. Die Spanung von Holz und ihre Werkzeuge. DRW-Verlag, Stuttgart 1997.

EWEL, J. (1980): Tropical Succession: Manifold Routes to Maturity. Biotropica 12, 1980, S.2-7.

EWEL, J.J. (1986): Designing agricultural ecosystems for the humid tropics. Annual Review of Ecology and Systematics, Vol. 17, 1986, S. 245-271.

FAMINOW, M.D. (1998): Cattle, deforestation, and development in the Amazon: an economic, agronomic, and environmental perspective. Cab International, Wallington, Oxon, UK, 1998.

FAO (1999): State of the world´s forests 1999. Rom 1999.

FEARNSIDE, P.M. (1986): Human Carrying Capacity of the Brazilian Rainforest. New York, Columbia University Press, USA.

FEARNSIDE, P.M. (1992): Human Carrying Capacity Estimation in Brazil´s

Amazonian Settlements as a Guide to Development Policy. Paper presented at the IUSSP-ABEP Conference on Population and Deforestation in the Humid Tropics, Campinas, Brazil, 30.11.1992-03.12.1992.

FEARNSIDE, P.M. (1993): Deforestation in Brazilian Amazonia: The Effect of Population and Land Tenure. Ambio, Vol. 22, No. 8.

FEARNSIDE, P.M. (1997): Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. Forest Ecology and Management, Volume 90, Issue 1, January 1997, S. 59-87.

FELDE, J. (1980): Einsatz von Sägeblättern und Sägeblattbehandlung im Sägewerk. In: Katz, C.; Blume, K. (Hrsg.) Handbuch Holzwirtschaft, II, Produktion. 37 Seiten. Deutscher Betriebswirte-Verlag-GmbH, Gernsbach.

FUJISAKA, S.; BELL, W.; THOMAS, N.; HURTADO, L.; CRAWFORD, E. (1996): Slash-and-burn agriculture in two Brazilian Amazon colonies. Agriculture, Ecosystems and Environment 59, S. 115-130. Elsevier Verlag.

GEHRING, C.; DENICH, M.; KANASHIRO, M.; VLEK, P.L.G. (1999): Response of secondary vegetation in Eastern Amazonia to relaxed nutrient availability constraints. Biogeochemistry 45 (1999), S. 223-241.

GERICKE, S. (2000): Landwirtschaftliche Verwertung von Biomasseaschen. Diplomarbeit, Institut für Geographie und Geoökologie, 88 S., Potsdam, 2000.

GUSTAFSSON, S.-I. (1999): Solid mechanics for ash wood. Holz als Roh- und Werkstoff, Vol. 57, 1999, S. 373-377.

HAKKILA, P. (1989): Utilization of Residual Forest Biomass. Springer; Berlin, Heidelberg, New York.

HARZMANN, L.J. (1988): Kurzer Grundriss der allgemeinen Tropenholzkunde. S. Hirzel, Leipzig 1988.

HASLER, P. & NUSSBAUMER, T. (1996): Landwirtschaftliche Verwertung von Aschen aus der Verbrennung von Gras, Chinaschilf, Hanf, Stroh und Holz. Schlussbericht des Forschungsprogramms Biomasse, Projekt Energiegras und Feldholz im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Bern. Ingenieurbüro Verenum, Zürich, 1996.

HIGUCHI, N.; DOS SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; MINETTE, L.; BIOT, Y. (1998): Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra firme da Amazônia Brasileira. Acta Amazonica 28(2), S. 153-166.

HÖLSCHER, D. (1995): Wasser- und Stoffhaushalt eines Agrarökosystems mit Waldbrache im östlichen Amazonasgebiet. Göttinger Beiträge zur Land- und Forstwirtschaft in den Tropen und Subtropen, 106.

HÖLSCHER, D.; MÖLLER, M.R.F.; DENICH, M.; FÖLSTER, H. (1997): Nutrient input-output budget of Shifting Cultivation in Eastern Amazonia. Nutrient Cycl. Agroecosyst. 47, S. 49-57.

HOUGHTON, R.A.; SKOLE, D.L.; NOBRE, C.A.; HACKLER, J.L.; LAWRENCE, K.T.; CHOMENTOWSKI, W.H. (2000): Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. Nature 403, S. 301-304, 2000.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA) (1997):Censo Agropecuário 1995-1996. Nr. 5, Pará, Rio de Janeiro, Brasilien, 1997.

INPE (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS) (2001): Monitoring of the Brazilian Amazon forest by satellite: 1999-2000, *Separata*, Instituto Nacional de Pesquisas Esapaciais, Brazil.

INPE (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS) (2002): Monitoring of the Brazilian Amazon forest by satellite: 2000-2001. São José dos Campos, Brazil.

IORAS, H.; NICHOLLS, T.; PERKINS, M.C.; MÜNZ, U.V.; LARMANN, A. (2002): A

review for cutting forces and stresses in circular saws. Holz als Roh- und Werkstoff, Vol. 60, 2002, S. 55-59.

JALOTA, S.K.; PRIHAR, S.S. (1998): Reducing soil water evaporation with tillage and straw mulching. Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA, 1998.

JÖNSSON, A.; VIELHAUER, K.; DENICH, M.; VLEK, P.L.G. (1998): Energy balance of traditional and modified land-use systems in the Eastern Amazon basin, Brazil, as a case study. In: Proceedings of the Third SHIFT-Workshop Manaus, 15.-19. März 1998.

JÖNSSON, A. (2000): Energy balance of a traditional and a modified land-use system in the Eastern Amazon basin, Brazil, as a case study. Magisterarbeit Göttingen 2000.

JOOSTEN, J.H.L. (1962): Wirtschaftliche und agrarpolitische Aspekte tropischer Landbausysteme. Institut für landwirtschaftliche Betriebslehre, Göttingen.

JORDAN, C. F. (1987): Amazonian Rain Forests. Ecosystem Disturbance and Recovery, Case Studies on Ecosystem Dynamics Under a Spectrum of Land Use-Intensities. Ecological Studies, 60.

JORDAN, C. F. (1989): An Amazonian Rain Forest. The Structure and Function of a Nutrient Stressed Ecosystem and the Impact of Slash-and-Burn Agriculture. Man and the Biosphere Series, Volume 2.

KATO, M.S.A. (1998): Fire-free Land Preparation as an Alternative to Slash-and-burn Agriculture in the Bragantina Region, Eastern Amazon: Crop Performance and Phosphorus Dynamics. Dissertation. Georg-August-Universität, Göttingen. Fakultät für Agrarwissenschaften.

KATO, O.R. (1998): Fire-free Land Preparation as an Alternative to Slash-and-burn Agriculture in the Bragantina Region, Eastern Amazon: Crop Performance and Nitrogen Dynamics. Dissertation. Georg-August-Universität, Göttingen.

Fakultät für Agrarwissenschaften.

KATO, M.S.A.; KATO, O.R.; DENICH, M.; VLEK, P.L.G. (1999): Fire-free alternatives to slash-and-burn for shifting cultivation in the Eastern Amazon region: The role of fertilizers. Field Crops Research, Vol. 62, 1999, S. 225-237.

KATO, M.S.A.; KATO, O.R; DENICH, M.; VLEK, P.L.G. (2000):Phosphorus Availability in a Mulch System in Eastern Amazonia.

KATO, O.R.; KATO, M.S.A.; VIELHAUER, K.; BLOCK, A.; DE JESUS, C.C. (2003): Cultivo do milho em sistema de corte e trituração da capoeira na região nordeste do Pará- Efeito da época do preparo de área. Embrapa Amazônia Oriental, Belém, 18 S., Boletim de Pesquisa 19.

KAUFFMAN, J.B. (1991): Survival by sprouting following fire in tropical forests of the eastern Amazon. Biotropica 23 (3), 1991, S. 219-224.

KAYA, B.; NAIR, P.K.R. (2001): Soil fertility under improved fallow-systems in southern Mali. Agroforestry Systems 52, 2001, S. 1-11.

KOIFFMANN BECKER, B. (2001): Amazonian Frontiers in the Beginning of the 21st Century. Presentation at the Open Meeting of the Global Environment Change Research Community, Rio de Janeiro, 6.-8. Oktober 2001.

KORMAWA, P.M.; KAMARA, A.Y.; JUTZI, S.C.; SANGINGA, N. (1999): Economic Evaluation of Using Mulch From Multi-Purpose Trees in Maize-Based Production Systems in South-Western Nigeria. Experimental Agriculture (1999) Volume 35, S. 101-109.

KUNKEL, G. (1998): Asche aus Bioheizwerken für die Grünlanddüngung. Neue Landwirtschaft 12/ 1998, S. 56-57, 1998.

KUTZ, C. (2003): mündliche Auskunft auf der Agritechnica 2003, Hannover, 11.11.2003.

LANLY, J.P. (1985): Defining shifting cultivation. Contribution to the IX. World Forestry Congress Mexico 1985. Unasylva No. 147.

LAVELLE, P. (1987): Biological processes and productivity of soils in the humid tropics. The Geophysiology of Amazonia: Vegetation and Climate Interactions. Robert ED (Hrsg.). Wiley, New York, S. 175-222.

LEAL, E.C. (2002): Potencial de regeneração da capoeira após preparo de área com queima e sem queima na região bragantina. UFPA/ Centro Agropecuário/ Embrapa Amazônia Oriental, Belém, Brasilien, 2002, 122 Seiten, Masterarbeit.

LELE, U.; VIANA, V.; VERISSIMO, A.; VOSTI, S.; PERKINS, K.; HUSAIN, S.A. (2000): Brazil- Forests in the Balance: Challenges of Conservation with Development. Evaluation Country Case Studie Series. The World Bank, Washington D.C., USA.

LIMA, J.T.; BREESE, M.C.; CAHALAN, C.M. (2000): Genotype-environment interaction in wood basic density of Eucalyptus clones. Wood Science and Technology 34, S. 197-206.

LU, D.; MORAN, E.; MAUSEL, P. (2002): Linking Amazonian Secondary Succession Forest Growth to Soil properties. Land Degradation and Development 13, 2002, S. 331-343.

MERTINS, G. (1991): Ausmaß und Verursacher der Regenwaldrodung in Amazonien – ein vorläufiges Fazit. In: Tropischer Regenwald als Ökosystem. Giessener Beiträge zur Entwicklungsforschung, Reihe I. Band 19.

MERTZ, O. (2002): The relationship between length of fallow and crop yields in shifting cultivation: a rethinking. Agroforestry Systems 55, 2002, S. 149-159.

METZGER, J.P.W. (1997): Dinâmica da paisagem, tempo de pousio e estrutura espacial da vegetação secundária numa área de agricultura de corte e queima

(Igarapé-Açú). Relatório de Atividades. Unveröffentlichter, interner Bericht der Embrapa Amazônia Oriental.

MYERS, N. (1983): Conversion rates in tropical forests. In: Golley, F.B. (Hrsg.): Tropical rainforest Ecosystems 14A/ Structure and Function. Elsevier 1983, S. 289-300.

NELSON, B. W.; MESQUITA, R.; PERERIRA, J. L. G.; DE SOUZA, S. G. A.; BATISTA, G. T.; COUTO, L. B. (1999): Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. Forest Ecology and Management 117, 149-167.

NEPSTAD, D.; UHL, C.; SERRÃO, E.A. (1990): Surmounting barriers to forest regeneration in abandoned, highly degraded pastures: a case study from Paragominas, Pará, Brazil. In: Anderson, A.B. (Hrsg.) 1990: Alternatives to deforestation. S. 215-229.

NEPSTAD, D.; VERÍSSIMO, A.; ALENCAR, A.; NOBRE, C.; LIMA, E.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P.; POTTER, C.; MOUTINHO, P.; MENDOZA, E.; COCHRANE, M.; BROOKS, V. (1999): Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. Nature, Vol. 398, April 1999, S. 505-508.

NEPSTAD, D.; CARVALHO, G.; BARROS, A.C.; ALENCAR, A.; CAPOBIANCO, J.P.; BISHOP, J.; MOUTINHO, P.; LEFEBVRE, P.; LOPES SILVA JR., U.; PRINS, E. (2001): Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests. Forest Ecology and Management, Volume 154, Issue 3, Dezember 2001, S. 395-407.

NYE, P.H.; GRENNLAND, D.J. (1960): The soil under Shifting Cultivation. Technical Communication No. 51, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, Farnham Royal, Bucks, UK.

OBERNBERGER, I. (1997): Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente. Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung, Technische Universität Graz, Band

1, Graz, 1997.

OLIVEIRA, M.S.S.; KATO, M.S.A.; KATO, O.R. (2000): Agricultura sem queima: Validação e adaptação através de pesquisa participativa. In: PROJETO TIPITAMBA. Produzir sem queimar. Belém, Embrapa Amazônia Oriental. 2000.

OVERMAN, J.P.M.; WITTE, H.J.L.; SALDARRIAGA, J.G. (1994): Evaluation of regression modes for above-ground biomass determination in Amazon rainforest. Journal of Tropical Ecology 10, 207-218.

PERRINGS, C. (2001): The Economics of Biodiversity Loss and Agricultural Development in Low Income Countries. In: Lee D.R. & Barret, C.B. (Hrsg.) Tradeoffs or Synergies? Agricultural Intensification, Economic Development and the Environment, Wallingford, CAB International, S. 57-72.

PERSSON, S. (1987): Mechanics of Cutting Plant Material. ASAE Monograph No.7, St. Joseph, Michigan, USA.

PHILIPP, A. (2001): mündliche Auskunft, AHWI do Brasil Ltda., Belém, 14.11.2001.

PICHÓN, F.J. (1996): The forest conversion process: A Discussion of the sustainability of predominant land uses associated with frontier expansion in the Amazon. Agriculture and Human Values, Vol. 13, No. 1, 1996, S. 30-51.

POHLANDT, K. (1995): Zusammensetzung, Verwertung und Entsorgung von Holzaschen. Holz-Zentralblatt Nr. 79, 121. Jahrgang, S. 1305-1315, Stuttgart, 1995.

PUTZER, H. (1968): Überblick über die geologische Entwicklung Südamerikas. In: FITTKAU, E.J.; ILLIES, J.; KLINGE, H.; SCHWABE, G.H.; SIOLI, H. [EDS.] 1968: Biogeography and Ecology in South America. Vol. 1, Den Haag, Niederlande, S. 1-24.

RAYMOND, C.A.; MUNERI, A. (2001): Nondestructive sampling of Eucalyptus globulus and E. nitens for wood properties. I. Basic density. Wood Science and Technology 35, S. 27-39, 2001.

REGO, R.S.; DA SILVA, B.N.R.; JUNIOR, R.S.O. (1993): Detailed soil survey in an area in the municipality of Igarapé-Açú. In: Summaries and Lectures, vorgestellt im 1. SHIFT Workshop, Belém, Brasilien.

ROSEMEYER, M.E. (2000): Improving agroecosystem sustainability using organic (plant- based) mulch. In: Gliessman, S.R. (Hrsg.): Agroecosystem sustainability developing practical strategies. CRC Press, Washington D.C., USA, S. 67-90, 2000.

RUTHENBERG, H. (1980): Farming systems in the tropics. Dritte Ausgabe, Clarendon Press, Oxford, UK.

SÁ, T.D. DE A.; OLIVEIRA, V.C. DE; COIMBRA, H.M.; CARVALHO, C.J.R. DE; DIAS-FILHO, M.B.; VIELHAUER, K. (1998a): Diurnal and seasonal patterns of leaf water relations in spontaneous and enriched secondary vegetation components: tools to understand water vapor exchange and water stress behaviour. In: Proceedings of the Third SHIFT-Workshop Manaus, 15.-19. März 1998.

SÁ, T.D. DE A.; VIELHAUER, K.; KANASHIRO, M.; VLEK, P.L.G. (1998b): Towards improving natural resources use in Eastern Amazonia through a modified sequential agroforestry system. Painel no II. Congresso Brasileiro em Sistemas Florestais, 25.11.1998, Belém, Pará, Brasilien.

SCHÖNINGH, E. (1985): Die Wirkung von Mulch auf Ertrag und Faktoren der Bodenfruchtbarkeit im östlichen Amazonasgebiet Brasiliens. Giessener Beiträge zur Entwicklungsforschung. Reihe II. Band 6.

SCHOLZ, U. (1991): Überlegungen zum Agrarpotential und zur Tragfähigkeit tropischer Regenwaldgebiete. In: Tropischer Regenwald als Ökosystem. Giessener Beiträge zur Entwicklungsforschung, Reihe I. Band 19.

SIMPSON, W.T. (1993): Specific Gravity, Moisture Content, and Density Relationship for Wood. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, WI, USA.

SKOLE, D.; TUCKER, C.J. (1993): Tropical Deforestation and habitat fragmentation in the Amazon; satellite data from 1978 to 1988, Science 260, S. 1905-1910.

SOMMER, R. (2000): Water and nutrient balance in deep soils under shifting cultivation with and without burnig in the Eastern Amazon. George-August-University, Göttingen. Faculty of Agricultural Sciences. Doctoral Dissertation.

SOMMER, R.; SÁ, T.D. DE A.; VIELHAUER, K.; VLEK, P.L.G.; FÖLSTER, H. (2000): Deep rooting of secondary vegetation- an indispensable component of shifting cultivation. Neotropical Ecosystems. Proceedings of the German-Brazilian Workshop, Hamburg 2000, S. 755-757.

STÅHL, E.G. (1988): Transfer effects and variations in basic density and tracheid length of Pinus sylvestris L. populations. Studia Forestalia Suecica No. 180, Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Forestry, Uppsala, Schweden.

STAVER, C. (1991): The role of weeds in the productivity of Amazonian bush fallow agriculture. Experimental Agriculture 1991, Vol. 27, S. 287-304.

STEININGER, M.K. (2000): Secondary Forest Structure and Biomass following short and extended land-use in central and southern Amazonia. Journal of Tropical Ecology 16, 2000, S. 689-708.

THURSTON, H. D. (1994): Slash/Mulch systems: Neglected Sustainable Tropical Agroecosystems. S. 29-42. In: THURSTON, H.D.; SMITH, M.; ABAWI, G.; KEARL, S. (EDS.) Slash/Mulch: How Farmers Use It, and What Researchers Know About It. CIIFAD and CATIE, Cornell Univ. Ithaca, NY.

THURSTON, H.D. (1997): Slash/Mulch Systems – Sustainable methods for tropical agriculture. Westview Press, Boulder, CO, 196 p.

TUCK, C.R. (1976): The effect of various design and operation parameters of rotary mowers on cutting performance. –Phase 1975. NIAE Departmental Note No. DN/FC/666/1355.

UHL, C.; CLARK, K.; CLARK, H.; MURPHY, P. (1981): Early Plant Succession After Cutting and Burning in the Upper Rio Negro Region of the Amazon Basin. Journal of Ecology, Vol. 69, S. 631-649.

UHL, C.; CLARK, H.; CLARK, K.; MAQUIRINO, P. (1982): Successional Patterns associated with slash-and-burn agriculture in the upper Rio Negro region of the Amazon Basin. Biotropica, Vol. 14, S. 249-254.

UHL, C.; JORDAN, C.F. (1984): Succesion and nutrient dynamics following forest cutting and burning in Amazonia. Ecology 65 (5), 194, S. 1476-1490.

UHL, C.; BUSCHBACHER R. (1985): A disturbing synergism between cattle ranch burning practices and selective tree harvesting in the eastern amazon. Biotropica 17, 1985, S. 265-268.

UHL, C. (1987): Factors Controlling Succession Following Slash-and-Burn Agriculture in Amazonia. Journal of Ecology, Vol. 75, Issue 2, S. 377-407.

UHL, C.; BUSCHBACHER, R.; SERRÃO, E.A.S. (1988): Abandoned Pastures in Eastern Amazonia. I. Patterns of Plant Succession. Journal of Ecology, Vol. 76, Issue 3, S. 663-681.

UHL, C.; KAUFFMANN, J.B. (1990): Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern Amazon. Ecology 71, 1990, S. 437-449.

UHL, C.; NEPSTAD, D.; BUSCHBACHER, R.; CLARK, C.; KAUFFMAN, B.; SUBLER, S. (1990): Studies of Ecosystem Response to Natural and Anthropogenic Disturbances Provide Guidelines for Designing Sustainable Land-Use Systems in Amazonia. In: Anderson, A.B. (Hrsg.): Alternatives to deforestation: steps toward sustainable use of the amazon rain forest. Columbia University Press, New York, 1990, S. 24-42.

UHL, C.; BARRETO, P.; VERÍSSIMO, A.; VIDAL, E.; AMARAL, P.; BARROS, A.C.; SOUZA JR., C.; JOHNS, J.; GERWING, J. (1997): Natural Resource Management in the Brazilian Amazon. An integrated research approach. Bio Science, Vol. 47, No. 3, 1997, S. 160-168.

UHL, C. (1998): Perspectives on Wildfires in the humid tropics. Conservation Biology 12, No. 5, 1998, S. 942-943.

UNO (2000): Report of the United Nations Conference on Environment and Development (Rio de Janeiro, 3-14 June 1992). Annex III: Non-legally binding authoritative statement of principles for a global consensus on the management, conservation and sustainable development of all types of forests. United Nations, General Assembly, 14. August 1992. Internetadresse: letzte Aktualisierung 14.01.2000; http://www.un.org/documents/ga/conf151/aconf15126-3annex3.htm

VETTER, A.; KERSCHBERGER, M.; REINHOLD, G. (1996): Sekundärrohstoffe im Stoffkreislauf der Landwirtschaft. Kongressband Vorträge zum Generalthema des 108. VDLUFA-Kongresses vom 16.-21.9.1996 in Trier, S. 537-540, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

VETTER, A.; KERSCHBERGER, M.; REINHOLD, G. (1997): Standpunkt zur umweltgerechten Verwertung von Aschen aus Biomasseheizanlagen. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. 8 S., Jena, 1997.

VERÍSSIMO, A.; BARRETO, M.; MATTOS, M.; TARIFA, R.; UHL, C. (1992): Logging impacts and prospects for sustainable forest management in an old Amazonian frontier: the case of Paragominas. Forest Ecology and Management 55, 1992, S. 169-199.

VIELHAUER, K.; KANASHIRO, M.; SÁ, T.D. DE A.; DENICH, M. (1998): Technology development of slash-and-mulch and fallow enrichment in shifting cultivation systems of the Eastern Amazon. In: Proceedings of the Third SHIFT-Workshop Manaus, 15.-19. März 1998.

VIELHAUER, K.; SÁ, T.D. DE A.; DENICH, M. (2000): Modification of a Traditional Crop-Fallow System Towards Ecologically and Economically Sound Options in the Eastern Amazon. Proceedings German Brazilian Workshop on Neotropical Ecosystems- Achievements and Prospects of Cooperative Research. Hamburg, September 3-8, 2000, S. 549-555.

VIEIRA, I. C. G. (1996): Forest Succession After Shifting Cultivation en Eastern Amazonia. University of Stirling. Dissertation. University of Stirling, Schottland, 1996. 205 S.

VIERA, L.S.; DOS SANTOS, W.H., FALESI, I.C.; FILHO, J.P.S.O. (1967): Levantamento do reconhecimento dos solos da região Bragantina, Estado do Pará. Pesquisa Agropecuária Brasileira 2, SS. 1-63.

VOCKEL, J.; DENICH, M. (2000): Effect of Fire-Free Land Preparation on the Vegetative Regeneration of Woody Fallow Vegetation in the Eastern Amazon. Proceedings German Brazilian Workshop on Neotropical Ecosystems-

Achievements and Prospects of Cooperative Research. Hamburg, September 3-8, 2000. S. 955-958.

VOSTI, S.A.; WITCOVER, J.; CARPENTIER, C.L. (2002): Agricultural Intensification by Smallholders in the Western Brazilian Amazon: From Deforestation to Sustainable Land-Use.
International Food Policy Research Institute, Washington D.C.. Research Report 130.

WATRIN, O. DOS S. (1994): Estudo da dinâmica na paisagem da Amazônia Oriental através de técnicas de geoprocessamento. Master-Arbeit. Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), São José de Campos, São Paulo, 156 S., 1994.

WATTERS, R.F. (1971): Shifting Cultivation in Latin America. FAO Forestry Development Paper, 17.

WEAVER, P. (1979): Agri-Silviculture in Latin-America. Unasylva, Vol. 31, Issue 126. FAO Homepage. www.fao.org/docrep/n6845e/n6845e01.htm

WETZEL, S. (1997): Auswirkungen von Anreicherungspflanzungen mit Baumleguminosen auf die Spontanvegetation im östlichen Amazonasgebiet, Brasilien. Diplomarbeit Universität Hohenheim/ Universität Göttingen.

WICKEL, B. (2003): Data Report preliminary weather data Igarapé-Açú, Cumarú Watershed. ZEF Bonn 2003.

WIENEKE, F. (1957): Untersuchungen zur Erklärung und Beseitigung von Wickelerscheinungen an umlaufenden Maschinenteilen. Landtechnische Forschung 1957, S. 1-8.

WIESENMÜLLER, J. (1999): Einfluß landwirtschaftlicher Flächenvorbereitung auf die Dynamik des Wurzelsystems und die oberirdische Regeneration der Sekundärvegetation Ostamazoniens, Pará, Brasilien. George-August-Universität,

Göttingen. Fakultät für Agrarwissenschaften. Dissertation.

WILSON, G.F.; APAKA, K.L. (1983): Providing mulches for no-tillage in the tropics. In: Akobundu, I.O. & Deutsch, A.E. (Hrsg.): No-tillage Crop production in the Tropics. Symposium, Monrovia, Liberia, August 1981. IPPC, Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA.

9 Anhang

Tabelle A- 1: Grundannahmen zur Kostenkalkulation des Häckslereinsatzes

- Bezugsgröße für die Einsatzdauer der Häcksler ist die Betriebsstundenzahl des Traktors
- Die Werte sind im Versuchseinsatz mit einem Einsatzradius von ca. 20 km um den Traktorstützpunkt ermittelt worden.
- Lebensdauer von Maschinen und Traktoren sind Schätzungen, da keine Daten zu einem Dauereinsatz vorliegen.
- Lebensdauer von Maschinen und Traktor wird verhältnismäßig niedrig angesetzt, um die Kosten des Einsatzes nicht zu unterschätzen. Aus diesem Grunde ist der Restwert nach Ablauf der Lebensdauer gleich Null gesetzt.
- Anschaffungskosten des Traktors sind 180.000 R$ für den Betrieb mit der FM 600 (130 kW Motorleistung) und 140.000 R$ für den Betrieb mit der Tritucap 2 (100 kW Motorleistung) laut Angebot von Cobrás Tratores, Belém).
- Anschaffungskosten des Forstmulchers FM 600 sind 110.000 R$ (laut Angebot von AHWI do Brasil Ltda., São Paulo, Brasilien)
- Anschaffungskosten der Tritucap 2 sind nach Kostenschätzung einer Produktion in Brasilien ermittelt worden

Tabelle A- 2: Annahmen zur Kostenkalkulation des Häckslereinsatzes; Tritucap 2

Annahmen		***Einheit***	***Wert***
Betriebsdaueranteile des Traktors			
Häckseln		%	73,84
Zuwegung/ Fahrten		%	17,76
Wartung		%	8,40
Leistung und Betriebsdauer			
Tritucap 2	Flächenleistung	ha/h	0,30
Jahresbetriebsdauer	Traktor	h/a	1.500
	Tritucap 2	h/a	1.095
Jahresflächenleistung		ha/a	328,5
Lebensdauer der Maschinen			
Traktor (130 kW)	Lebensleistung	h	6.000
Tritucap 2		h	3.000
Anschaffungskosten			
Traktor (130 kW)	Kaufpreis	R$	140.000
Tritucap 2	Kaufpreis	R$	50.000

Tabelle A- 3: Kalkulation der Fixkosten ohne Kapitaldienst für den Einsatz des Häckslers Tritucap 2

Fixkostenkalkulation		***Einheit***	***Wert***
Traktor			
Lebensdauer		a	4,0
Abschreibung/ Tilgung		R$/a	35.000
Prozentualer Reparaturkostenansatz	(jährlich in % vom Anschaffungspreis)	%	4
Reparaturkosten	jährliche Reparaturkosten	R$/a	5.600
Fixkosten Traktor	**Summe**	**R$/a**	**40.600**
Tritucap 2			
Lebensdauer		a	2,74
Abschreibung/ Tilgung		R$/a	18.250
Prozentualer Reparaturkostenansatz	(jährlich in % vom Anschaffungspreis)	%	40
Reparaturkosten	jährliche Reparaturkosten	R$/a	20.000
Fixkosten Tritucap 2	**Summe**	**R$/a**	**38.250**

Tabelle A- 4: Kalkulation des Kapitaldienstes für den Einsatz der Tritucap 2

Kapitaldienst (Annuitätendarlehen)		***Einheit***	***Wert***
Traktor			
Fremdfinanzierungsanteil		%	100
	Laufzeit des Darlehens	Monate	48
	jährlicher Realzins	%	20
Darlehensbetrag		R$	140.000
monatliche Rate		R$/Monat	4.139,72
jährliche Rate		**R$/a**	**49.676,61**
Tritucap 2			
Fremdfinanzierungsanteil		%	100
	Laufzeit des Darlehens	Monate	32,88
	jährlicher Realzins	%	20
Darlehensbetrag		R$	50.000
monatliche Rate		R$/Monat	1.946,91
jährliche Rate		**R$/a**	**32.362,97**

Tabelle A- 5: Kalkulation der variablen Kosten für den Einsatz der Tritucap 2

Variable Kosten		***Einheit***	***Wert***
Traktor			
Stundenlohn Fahrer		R$/h	10
Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch	Häckseln	l/h	22,0
je Betriebsstunde des Traktors	Fahrten	l/h	13,0
	Wartung	l/h	1,5
Kraftstoffpreis		R$/l	1,10
Jahresbetriebsdauer des Traktors		h/a	1.500
jährlicher Kraftstoffverbrauch	Häckseln	l/a	24.367,20
	Fahrten	l/a	3.463,20
	Wartung	l/a	189,00
Gesamtkraftstoffverbrauch		l/a	28.019,40
jährliche Kosten			
Kraftstoffkosten		R$/a	30.821,34
Arbeitslohn Fahrer		R$/a	15.000
Schmierstoffe	pauschal	R$/a	4.500
jährliche variable Kosten gesamt		**R$/a**	**50.321,34**

Tabelle A- 6: Gesamte jährliche Kosten des Einsatzes der Tritucap 2

Jährliche Kosten		***Einheit***	***Wert***
jährliche variable Kosten		R$/a	50.321,34
jährliche fixe Kosten ohne Kapitaldienst		R$/a	78.850,00
Summe der jährlichen Kosten	**ohne Kapitaldienst**	**R$/a**	**129.171,34**
jährliche variable Kosten		R$/a	50.321,34
jährliche fixe Kosten mit Kapitaldienst		R$/a	151.889,58
Summe der jährlichen Kosten	**mit Kapitaldienst**	**R$/a**	**202.210,92**

Tabelle A- 7: Betriebsstunden- und flächenspezifische Kosten des Einsatzes der Tritucap 2

Spezifische Kosten		***Einheit***	***Wert***
Betriebsstundenspezifische Kosten	**ohne Kapitaldienst**		
variable Kosten je Betriebsstunde		R$/h	45,96
fixe Kosten je Betriebsstunde	ohne Kapitaldienst	R$/h	72,01
Summe		**R$/h**	**117,97**
Betriebsstundenspezifische Kosten	**mit Kapitaldienst**		
variable Kosten je Betriebsstunde		R$/h	45,96
fixe Kosten je Betriebsstunde	mit Kapitaldienst	R$/h	138,71
Summe		**R$/h**	**184,67**
Flächenspezifische Kosten	**ohne Kapitaldienst**		
variable Kosten je Hektar		R$/ha	153,20
fixe Kosten je Hektar	ohne Kapitaldienst	R$/ha	240,04
Summe		**R$/ha**	**393,24**
Flächenspezifische Kosten	**mit Kapitaldienst**		
variable Kosten je Hektar		R$/ha	153,20
fixe Kosten je Hektar	mit Kapitaldienst	R$/ha	462,37
Summe		**R$/ha**	**615,57**

Tabelle A- 8: Annahmen zur Kostenkalkulation des Häckslereinsatzes; FM 600

Annahmen		***Einheit***	***Wert***
Betriebsdaueranteile des Traktors			
Häckseln		%	73,84
Zuwegung/ Fahrten		%	17,76
Wartung		%	8,40
Leistung und Betriebsdauer			
FM 600	Flächenleistung	ha/h	0,35
Jahresbetriebsdauer	Traktor	h/a	1.500
	FM 600	h/a	1.095
Jahresflächenleistung		ha/a	383,25
Lebensdauer der Maschinen			
Traktor (130 kW)	Lebensleistung	h	6.000
FM 600		h	4.000
Anschaffungskosten			
Traktor (130 kW)	Kaufpreis	R$	180.000
FM 600	Kaufpreis	R$	110.000

Tabelle A- 9: Kalkulation der Fixkosten ohne Kapitaldienst für den Einsatz des Häckslers FM 600

Fixkostenkalkulation		***Einheit***	***Wert***
Traktor			
Lebensdauer		a	4,0
Abschreibung/ Tilgung		R$/a	45.000
Prozentualer Reparaturkostenansatz	(jährlich in % vom Anschaffungspreis)	%	4
Reparaturkosten	jährliche Reparaturkosten	R$/a	7.200
Fixkosten Traktor	**Summe**	**R$/a**	**52.200**
FM 600			
Lebensdauer		a	3,65
Abschreibung/ Tilgung		R$/a	30.112,50
Prozentualer Reparaturkostenansatz	(jährlich in % vom Anschaffungspreis)	%	40
Reparaturkosten	jährliche Reparaturkosten	R$/a	44.000
Fixkosten FM 600	**Summe**	**R$/a**	**74.112,50**

Tabelle A- 10: Kalkulation des Kapitaldienstes für den Einsatz der FM 600

Kapitaldienst (Annuitätendarlehen)		***Einheit***	***Wert***
Traktor			
Fremdfinanzierungsanteil		%	100
	Laufzeit des Darlehens	Monate	48
	jährlicher Realzins	%	20
Darlehensbetrag		R$	180.000
monatliche Rate		R$/Monat	5.322,49
jährliche Rate		**R$/a**	**63.869,92**
FM 600			
Fremdfinanzierungsanteil		%	100
	Laufzeit des Darlehens	Monate	43,84
	jährlicher Realzins	%	20
Darlehensbetrag		R$	110.000
monatliche Rate		R$/Monat	3.463,34
jährliche Rate		**R$/a**	**41.560,06**

Tabelle A- 11: Kalkulation der variablen Kosten für den Einsatz der FM 600

Variable Kosten		***Einheit***	***Wert***
Traktor			
Stundenlohn Fahrer		R$/h	10
Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch	Häckseln	l/h	32,1
je Betriebsstunde des Traktors	Fahrten	l/h	16,12
	Wartung	l/h	2,26
Kraftstoffpreis		R$/l	1,10
Jahresbetriebsdauer des Traktors		h/a	1.500
jährlicher Kraftstoffverbrauch	Häckseln	l/a	35.565,04
	Fahrten	l/a	4.294,37
	Wartung	l/a	284,76
Gesamtkraftstoffverbrauch		l/a	40.144,16
jährliche Kosten			
Kraftstoffkosten		R$/a	44.158,58
Arbeitslohn Fahrer		R$/a	15.000
Schmierstoffe	pauschal	R$/a	5.000
jährliche variable Kosten gesamt		**R$/a**	**64.158,58**

Tabelle A- 12: Gesamte jährliche Kosten des Einsatzes der FM 600

Jährliche Kosten		***Einheit***	***Wert***
jährliche variable Kosten		R$/a	64.158,58
jährliche fixe Kosten ohne Kapitaldienst		R$/a	126.312,50
Summe der jährlichen Kosten	**ohne Kapitaldienst**	**R$/a**	**190.471,08**
jährliche variable Kosten		R$/a	64.158,58
jährliche fixe Kosten mit Kapitaldienst		R$/a	231.742,49
Summe der jährlichen Kosten	**mit Kapitaldienst**	**R$/a**	**295.901,07**

Tabelle A- 13: Betriebsstunden- und flächenspezifische Kosten des Einsatzes der FM 600

Spezifische Kosten		***Einheit***	***Wert***
Betriebsstundenspezifische Kosten	**ohne Kapitaldienst**		
variable Kosten je Betriebsstunde		R$/h	58,59
fixe Kosten je Betriebsstunde	ohne Kapitaldienst	R$/h	115,35
Summe		**R$/h**	**173,94**
Betriebsstundenspezifische Kosten	**mit Kapitaldienst**		
variable Kosten je Betriebsstunde		R$/h	58,59
fixe Kosten je Betriebsstunde	mit Kapitaldienst	R$/h	211,64
Summe		**R$/h**	**270,23**
Flächenspezifische Kosten	**ohne Kapitaldienst**		
variable Kosten je Hektar		R$/ha	167,41
fixe Kosten je Hektar	ohne Kapitaldienst	R$/ha	329,58
Summe		**R$/ha**	**496,99**
Flächenspezifische Kosten	**mit Kapitaldienst**		
variable Kosten je Hektar		R$/ha	167,41
fixe Kosten je Hektar	mit Kapitaldienst	R$/ha	604,68
Summe		**R$/ha**	**772,09**

Tabelle A- 14: Mittelwerte und ausgewählte Extrema der Einzelpflanzencharakteristika in Abhängigkeit von der Versuchsfläche, Flächen 1- 10

Flächennummer		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Stichprobengröße		304	642	775	714	528	372	331	439	308	11.635
diam_1	[cm]	2,15	2,16	2,19	2,05	1,44	1,95	1,72	1,41	1,61	3,37
n		304	531	720	714	528	372	331	439	308	11.633
Min	[cm]	0,30	0,20	0,40	0,40	0,40	0,20	0,50	0,40	0,40	0,10
Max	[cm]	9,30	34,00	12,00	21,00	8,30	14,50	11,60	11,50	10,00	83,00
Std.-Abw.		1,74	2,68	1,64	1,67	0,91	1,86	1,33	1,08	1,14	3,21
diam_2	[cm]	5,25	7,91	5,09	5,83	3,35	3,75	3,30	.	5,13	6,19
n		71	14	24	63	73	54	5	0	3	1.411
Min	[cm]	1,30	2,40	1,70	1,20	1,30	1,00	2,00	.	2,50	0,10
Max	[cm]	11,70	15,30	10,00	12,00	11,50	9,80	4,10	.	7,90	20,00
Std.-Abw.		2,14	4,14	2,23	2,72	1,61	2,33	0,80	.	2,70	3,67
avg_diam	[cm]	2,32	2,21	2,23	2,16	1,56	2,07	1,73	1,41	1,62	3,61
Max	[cm]	9,65	34,00	12,00	21,00	9,00	14,50	11,60	11,50	10,00	83,00
Std.-Abw.		1,85	2,75	1,67	1,81	1,02	1,94	1,34	1,08	1,16	3,25
hoehe	[cm]	267,2	281,4	343,1	310,9	231,1	329,8	322,8	234,3	293,1	430,2
Min	[cm]	60,0	11,0	60,0	15,0	50,0	30,0	100,0	80,0	100,0	17,0
Max	[cm]	800,0	340,0	1.260,0	1.050,0	640,0	1.230,0	1.230,0	1.180,0	700,0	1.870,0
Std.-Abw.		136,6	165,9	168,7	143,5	112,9	205,4	148,8	125,9	94,1	258,8
Volumen	[cm³]	8.277,8	4.291,7	3.414,8	5.052,9	1.451,7	5.072,5	2.028,8	1.021,1	1.297,5	17.139,7
Max	[cm³]	159.229,7	134.585,8	80.448,0	167.878,9	75.146,9	203.109,9	87.683,1	88.288,6	36.284,8	63.033.577,5
Std.-Abw.		20.343,4	15.402,9	8.746,1	17.885,5	4.420,4	16.183,1	8.053,3	5.375,5	3.921,3	233.283,8
A_Schni	[cm²]	18,9	12,2	7,3	11,3	4,6	9,8	4,0	2,5	3,4	23,1
Max	[cm²]	279,4	907,9	164,2	346,4	234,8	215,5	105,7	103,9	84,4	5.410,6
Std.-Abw.		40,4	58,3	15,9	35,9	12,6	25,3	10,7	7,6	8,2	94,5
Einz_Mas	[g]	2.458,2	1.769,3	1.758,1	1.621,6	506,4	2.172,9	1.239,3	580,8	719,3	8.298,6
Max	[g]	64.472,6	73.177,7	56.216,7	62.377,6	17.913,2	119.794,2	58.027,3	40.874,1	20.988,7	39.667.476,6
Std.-Abw.		7.390,2	6.065,1	4.500,7	5.085,7	1.372,8	8.242,8	5.062,6	2.832,5	2.071,7	89.559,5

diam_1: mittlerer Durchmesser 1; diam_2: mittlerer Durchmesser 2; avg_diam: mittlerer Gesamtdurchmesser; hoehe: mittlere Wuchshöhe der Pflanzen;

Volumen: mittleres Volumen der Einzelpflanze (errechnet); A_Schni: mittlere Schnittfläche der Einzelpflanze (errechnet); Einz_Mas: mittlere Masse der Einzelpflanze (errechnet)

Tabelle A- 15: Mittelwerte und ausgewählte Extrema der Einzelpflanzencharakteristika în Abhängigkeit von der Versuchsfläche, Flächen 11- 20

Flächennummer		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Stichprobengröße		568	221	426	278	355	253	157	526	489	401
diam_1	[cm]	0,86	1,00	1,09	0,97	1,38	0,89	1,28	1,11	0,96	1,12
n		568	221	426	278	355	253	157	526	489	401
Min	[cm]	0,10	0,20	0,20	0,20	0,30	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Max	[cm]	10,10	3,90	9,80	8,20	6,80	14,10	9,30	8,70	4,80	6,50
Std.-Abw.		0,71	0,67	0,95	0,82	1,07	0,98	1,19	0,78	0,66	0,81
diam_2	[cm]	3,39	.	2,96	.	6,05	.	3,34	4,32	2,33	.
n		15	0	15	0	2	0	8	11	19	0
Min	[cm]	1,50	.	1,40	.	4,30	.	1,40	2,00	1,00	.
Max	[cm]	6,60	.	9,80	.	7,80	.	6,20	7,00	4,60	.
Std.-Abw.		1,52	.	2,15	.	2,47	.	1,62	1,76	1,05	.
avg_diam	[cm]	0,89	1,00	1,11	0,97	1,39	0,89	1,33	1,13	0,98	1,12
Max	[cm]	10,10	3,90	9,80	8,20	6,80	14,10	9,30	8,70	4,80	6,50
Std.-Abw.		0,76	0,67	0,97	0,82	1,09	0,98	1,23	0,83	0,68	0,81
hoehe	[cm]	156,7	190,5	233,6	175,5	270,7	159,6	297,0	265,0	177,1	280,7
Min	[cm]	35,0	40,0	40,0	30,0	55,0	40,0	75,0	50,0	10,0	45,0
Max	[cm]	620,0	515,0	770,0	710,0	650,0	400,0	1.870,0	1.030,0	620,0	1.230,0
Std.-Abw.		79,7	97,8	128,6	107,4	122,9	68,1	219,0	129,6	104,7	151,2
Volumen	[cm³]	362,3	315,9	961,8	426,9	1.056,6	291,4	1.488,1	716,9	363,8	584,2
Max	[cm³]	49.673,5	4.240,8	146.333,5	35.382,8	36.879,2	32.009,7	56.381,1	31.667,3	8.866,8	15.264,2
Std.-Abw.		2.257,0	570,8	7.373,6	2.213,0	2.979,3	2.024,6	5.418,8	2.467,0	922,7	1.340,2
A_Schni	[cm²]	1,4	1,1	2,5	1,3	2,7	1,4	3,3	2,0	1,4	1,5
Max	[cm²]	80,1	11,9	301,7	52,8	85,8	156,1	67,9	66,0	28,9	33,2
Std.-Abw.		4,9	1,6	15,1	3,6	6,5	9,8	8,8	6,2	3,0	2,8
Einz_Mas	[g]	138,5	162,1	379,4	275,5	549,6	169,5	735,6	318,7	190,6	330,8
Max	[g]	14.434,1	2.399,3	24.464,0	27.672,9	10.959,0	19.264,4	16.383,2	16.273,6	7.057,4	9.335,4
Std.-Abw.		655,8	294,5	1.678,8	1.699,7	1.337,7	1.216,2	2.321,9	905,1	567,9	774,0

diam_1: mittlerer Durchmesser 1; diam_2: mittlerer Durchmesser 2; avg_diam: mittlerer Gesamtdurchmesser; hoehe: mittlere Wuchshöhe der Pflanzen;

Volumen: mittleres Volumen der Einzelpflanze (errechnet); A_Schni: mittlere Schnittfläche der Einzelpflanze (errechnet); Einz_Mas: mittlere Masse der Einzelpflanze (errechnet)

Tabelle A- 16: Mittelwerte und ausgewählte Extrema der Einzelpflanzencharakteristika în Abhängigkeit von der Versuchsfläche, Flächen 21- 30

Flächennummer		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Stichprobengröße		346	385	318	305	377	473	410	513	644	295
diam_1	[cm]	1,18	0,90	1,11	0,99	0,78	0,95	1,16	0,95	1,12	1,05
n		346	385	318	305	377	473	410	513	644	295
Min	[cm]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Max	[cm]	9,80	4,20	6,80	5,30	4,00	3,80	7,60	5,30	7,20	5,20
Std.-Abw.		1,08	0,64	0,85	0,75	0,57	0,67	1,00	0,63	0,92	0,77
diam_2	[cm]	4,14	2,00	.	.	4,60	1,70	2,73	.	1,40	1,80
n		19	1	0	0	1	5	7	0	6	1
Min	[cm]	1,00	2,00	.	.	4,60	1,30	1,50	.	0,80	1,80
Max	[cm]	9,80	2,00	.	.	4,60	2,20	5,80	.	1,80	1,80
Std.-Abw.		2,62	.	.	.	.	0,39	1,56	.	0,45	.
avg_diam	[cm]	1,23	0,90	1,11	0,99	0,78	0,96	1,17	0,95	1,12	1,05
Max	[cm]	9,80	4,20	6,80	5,30	4,00	3,80	7,60	5,30	7,20	5,20
Std.-Abw.		1,14	0,64	0,85	0,75	0,58	0,67	1,01	0,63	0,92	0,77
hoehe	[cm]	231,8	218,6	212,0	193,1	146,4	150,0	233,0	206,6	222,8	230,4
Min	[cm]	45,0	40,0	14,0	30,0	35,0	30,0	20,0	40,0	40,0	40,0
Max	[cm]	735,0	900,0	795,0	565,0	870,0	610,0	980,0	620,0	700,0	655,0
Std.-Abw.		137,2	126,1	141,2	104,9	91,7	85,4	129,3	111,8	125,0	109,7
Volumen	[cm³]	1.515,8	350,2	541,5	358,1	189,0	254,3	790,2	300,4	575,9	441,9
Max	[cm³]	144.824,9	9.074,7	19.580,5	9.266,0	8.324,0	4.173,3	24.723,7	10.589,7	16.896,7	9.875,3
Std.-Abw.		9.658,7	891,4	1.775,4	1.009,9	617,1	506,0	2.580,4	719,5	1.349,2	1.190,2
A_Schni	[cm²]	4,2	1,0	1,5	1,2	0,8	1,1	2,1	1,0	1,7	1,3
Max	[cm²]	301,7	13,9	36,3	22,1	34,7	11,3	45,6	22,1	40,7	21,2
Std.-Abw.		23,8	1,7	3,4	2,5	2,2	1,7	5,1	1,7	3,2	2,7
Einz_Mas	[g]	455,3	212,8	308,0	215,9	105,0	166,9	427,7	178,9	353,8	272,0
Max	[g]	24.211,8	6.537,5	14.106,0	6.691,5	3.159,1	2.814,2	17.811,2	7.628,9	5.688,9	6.993,4
Std.-Abw.		1.739,1	594,6	1.042,3	672,4	296,6	342,3	1.444,8	466,0	801,3	830,4

diam_1: mittlerer Durchmesser 1; diam_2: mittlerer Durchmesser 2; avg_diam: mittlerer Gesamtdurchmesser; hoehe: mittlere Wuchshöhe der Pflanzen;

Volumen: mittleres Volumen der Einzelpflanze (errechnet); A_Schni: mittlere Schnittfläche der Einzelpflanze (errechnet); Einz_Mas: mittlere Masse der Einzelpflanze (errechnet)

Tabelle A- 17: Mittelwerte und ausgewählte Extrema der Einzelpflanzencharakteristika în Abhängigkeit von der Versuchsfläche, Flächen 31- 42

Flächennummer	31	32	33	34	35	36	38	39	40	41	42
Stichprobengröße	538	526	150	176	180	1.149	569	756	429	497	640
diam_1 [cm]	1,09	0,93	1,41	1,64	1,20	1,36	1,03	1,12	1,55	1,14	1,61
n	538	526	150	176	180	1.149	569	756	429	497	640
Min [cm]	0,20	0,10	0,20	0,30	0,20	0,20	0,20	0,20	0,30	0,20	0,10
Max [cm]	6,90	6,40	12,20	5,20	5,70	11,20	17,40	8,40	9,50	9,60	10,30
Std.-Abw.	0,78	0,78	1,30	0,95	0,87	1,40	0,97	0,97	1,23	0,96	1,39
diam_2 [cm]	2,38	.	8,67	3,12	11,00	5,54	0,92	4,10	5,64	.	4,77
n	61	0	3	49	1	68	6	30	12	0	84
Min [cm]	1,00	.	5,00	1,40	11,00	1,20	0,80	0,60	1,40	.	0,80
Max [cm]	6,80	.	11,70	7,80	11,00	12,70	1,00	13,20	12,90	.	12,50
Std.-Abw.	1,30	.	3,39	1,44	.	3,11	0,10	3,19	4,04	.	2,68
avg_diam [cm]	1,15	0,93	1,45	1,84	1,22	1,41	1,03	1,16	1,57	1,14	1,71
Max [cm]	6,90	6,40	12,20	6,25	7,75	11,20	17,40	10,80	10,80	9,60	11,40
Std.-Abw.	0,83	0,78	1,43	1,08	0,96	1,50	0,97	1,08	1,32	0,96	1,56
hoehe [cm]	188,4	169,8	205,3	291,5	231,7	231,2	191,4	185,1	265,3	190,7	221,0
Min [cm]	30,0	30,0	35,0	60,0	40,0	15,0	20,0	30,0	22,0	30,0	30,0
Max [cm]	550,0	695,0	830,0	700,0	700,0	1.035,0	935,0	580,0	750,0	1.034,0	740,0
Std.-Abw.	87,6	95,2	115,3	104,5	124,4	146,2	111,7	104,3	147,9	132,8	126,1
Volumen [cm³]	670,0	320,2	1.827,6	2.427,9	852,7	2.696,2	731,2	943,4	2.361,1	606,1	3.342,3
Max [cm³]	54.475,2	13.189,7	97.025,9	38.877,2	55.205,6	137.928,5	222.331,0	107.985,3	200.738,4	46.686,6	179.993,6
Std.-Abw.	2.863,9	978,5	10.184,7	5.185,8	4.308,0	12.828,7	9.346,2	5.382,2	14.022,5	2.589,4	12.499,0
A_Schni [cm²]	2,7	1,2	5,4	7,6	2,5	7,4	1,6	3,2	5,3	1,7	10,7
Max [cm²]	145,3	32,2	279,4	117,8	155,5	394,1	237,8	348,3	352,6	72,4	404,5
Std.-Abw.	8,7	2,7	26,5	14,7	11,9	33,5	10,1	18,0	26,1	4,6	35,9
Einz_Mas [g]	235,7	198,9	563,8	754,7	365,4	760,0	449,4	333,7	819,9	343,0	820,0
Max [g]	9.107,2	9.216,5	28.193,8	6.499,5	9.229,3	27.410,0	139.915,1	18.053,0	33.559,4	22.345,6	30.091,3
Std.-Abw.	692,4	627,2	2.572,1	1.159,4	1.093,8	2.641,6	5.878,9	1.160,1	2.711,5	1.398,7	2.213,5

diam_1: mittlerer Durchmesser 1; diam_2: mittlerer Durchmesser 2; avg_diam: mittlerer Gesamtdurchmesser; hoehe: mittlere Wuchshöhe der Pflanzen;

Volumen: mittleres Volumen der Einzelpflanze (errechnet); A_Schni: mittlere Schnittfläche der Einzelpflanze (errechnet); Einz_Mas: mittlere Masse der Einzelpflanze (errechnet)

Tabelle A- 18: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Durchmesser 1 der Einzelpflanze“ (DIAM_1), Datengrundlage: pflanzenindividueller Datensatz (n=29.398)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	737	7402637.03	10044.28	27.42	<.0001
Error	25732	9425315.20	366.29		
Corrected Total	26469	16827952.23			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	DIAM 1 Mean
0.439901	88.14143	19.13864	21.71356

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLAECHE	40	978828.564	24470.714	66.81	<.0001
PARZELLE(FLAECHE)	442	820272.094	1855.819	5.07	<.0001
WUCHS	5	95852.152	19170.430	52.34	<.0001
SPEZIES(WUCHS)	250	2043143.110	8172.572	22.31	<.0001

Tabelle A- 19: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Durchmesser 2 der Einzelpflanze“ (DIAM_2), Datengrundlage: pflanzenindividueller Datensatz (n=29.398)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	203	1326152.207	6532.769	9.88	<.0001
Error	1934	1279356.212	661.508		
Corrected Total	2137	2605508.419			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	DIAM 2 Mean
0.508980	46.51013	25.71980	55.29935

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLAECHE	30	207255.1949	6908.5065	10.44	<.0001
PARZELLE(FLAECHE)	164	421182.8241	2568.1880	3.88	<.0001
WUCHS	2	2685.1989	1342.5994	2.03	0.1317
SPEZIES(WUCHS)	7	198579.9426	28368.5632	42.88	<.0001

Tabelle A- 20: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Höhe der Einzelpflanze“ (HOEHE), Datengrundlage: pflanzenindividueller Datensatz (n=29.398)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	737	664014310	900969	36.18	<.0001
Error	25874	644343309	24903		
Corrected Total	26611	1308357619			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	HOEHE Mean
0.507517	50.12707	157.8072	314.8144

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLAECHE	40	146342410.4	3658560.3	146.91	<.0001
PARZELLE(FLAECHE)	442	136472646.3	308761.6	12.40	<.0001
WUCHS	5	2395689.3	479137.9	19.24	<.0001
SPEZIES(WUCHS)	250	118779958.6	475119.8	19.08	<.0001

Tabelle A- 21: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Volumen der Einzelpflanze“ (volumen), Datengrundlage: pflanzenindividueller Datensatz (n=29.398)

Source	DF	Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	737	5.233306E13	71008222029	3.13	<.0001
Error	25706	5.8332137E14	22692031792		
Corrected Total	26443	6.3565443E14			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	volumen Mean
0.082329	1800.984	150638.7	8364.249

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
FLAECHE	40	912317544487	22807938612	1.01	0.4613
PARZELLE(FLAECHE)	442	1.5033131E13	34011607835	1.50	<.0001
WUCHS	5	561899733791	112379946758	4.95	0.0002
SPEZIES(WUCHS)	250	2.6515282E13	106061128064	4.67	<.0001

Tabelle A- 22: Beschreibung des zu häckselnden Pflanzenbestandes in Abhängigkeit von der Versuchsfläche, Fläche 1 – 10

Flächennummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Phytomasse[1,2] [t/ ha]	66,31	74,41	70,02	66,99	38,78	90,62	69,63	39,65	33,88	110,76
Blatt[1] [t/ ha]	23,16	11,88	9,15	13,76	10,48	11,14	9,99	6,50	8,18	12,17
Ast[1] [t/ ha]	0,00	14,83	13,20	13,11	6,23	17,70	14,55	8,60	5,28	24,39
Stamm[1] [t/ ha]	42,85	42,73	40,40	35,80	20,76	58,06	35,23	19,18	16,68	69,83
Liane[1] [t/ ha]	0,30	4,98	7,27	4,32	1,31	3,72	9,86	5,37	3,75	4,37
Litter[1] [t/ ha]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
mittl. Pflanzenzahl[3] [1/ ha]	50.667	44.583	40.789	47.600	66.000	46.500	41.375	54.875	38.500	11.497

[1] Datengrundlage: 1 Beobachtung je Parzelle
[2] Phytomasse = Blatt + Ast + Stamm + Liane
[3] Datengrundlage: Zählung bei Erfassung der Einzelpflanzencharakteristika

Tabelle A- 23: Beschreibung des zu häckselnden Pflanzenbestandes in Abhängigkeit von der Versuchsfläche, Fläche 11 – 20

Flächennummer	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Phytomasse[1,2] [t/ ha]	30,89	41,03	51,59	44,44	63,15	20,06	62,41	39,59	35,59	47,27
Blatt[1] [t/ ha]	8,63	11,18	6,37	5,69	9,75	3,00	7,83	7,28	9,88	6,25
Ast[1] [t/ ha]	5,71	5,60	10,42	12,83	19,81	4,34	8,67	8,46	8,84	6,24
Stamm[1] [t/ ha]	14,28	13,14	28,04	22,17	30,14	10,26	33,97	16,61	10,59	26,95
Liane[1] [t/ ha]	2,27	11,11	6,76	3,74	3,45	2,47	11,94	7,23	6,29	7,83
Litter[1] [t/ ha]	0,58	1,21	0,66	0,00	0,00	0,00	1,36	0,53	0,51	0,00
mittl. Pflanzenzahl[3] [1/ ha]	157.778	122.778	118.333	154.444	98.611	140.556	87.222	97.407	135.833	111.389

[1] Datengrundlage: 1 Beobachtung je Parzelle
[2] Phytomasse = Blatt + Ast + Stamm + Liane
[3] Datengrundlage: Zählung bei Erfassung der Einzelpflanzencharakteristika

Tabelle A- 24: Beschreibung des zu häckselnden Pflanzenbestandes in Abhängigkeit von der Versuchsfläche, Fläche 21 – 30

Flächennummer	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Phytomasse[1,2] [t/ ha]	53,02	42,18	35,46	49,68	35,68	32,01	54,76	32,77	51,68	54,67
Blatt[1] [t/ ha]	10,90	6,36	7,85	9,53	6,97	6,59	9,74	5,67	8,86	9,72
Ast[1] [t/ ha]	7,12	8,57	4,98	12,08	9,23	11,26	13,76	9,10	11,77	10,50
Stamm[1] [t/ ha]	27,58	21,84	16,62	24,24	14,50	11,49	25,47	12,84	27,00	26,78
Liane[1] [t/ ha]	7,41	5,41	6,00	3,82	4,97	2,66	5,80	5,16	4,04	7,67
Litter[1] [t/ ha]	0,00	1,39	0,47	1,03	0,00	0,66	0,51	0,61	0,00	1,13
mittl. Pflanzenzahl[3] [1/ ha]	96.111	160.417	88.333	169.444	209.444	157.667	113.889	142.500	134.167	163.889

[1] Datengrundlage: 1 Beobachtung je Parzelle
[2] Phytomasse = Blatt + Ast + Stamm + Liane
[3] Datengrundlage: Zählung bei Erfassung der Einzelpflanzencharakteristika

Tabelle A- 25: Beschreibung des zu häckselnden Pflanzenbestandes in Abhängigkeit von der Versuchsfläche, Fläche 31 – 41

Flächennummer	31	32	33	34	35	36	38	39	40	41
Phytomasse[1,2] [t/ ha]	38,62	46,04	48,85	69,78	41,58	59,07	43,78	42,66	57,93	49,39
Blatt[1] [t/ ha]	10,06	12,69	11,06	19,50	7,91	12,59	10,30	11,63	9,80	11,25
Ast[1] [t/ ha]	7,36	10,64	8,00	13,00	7,72	10,95	8,35	7,00	10,72	9,92
Stamm[1] [t/ ha]	16,92	17,89	23,39	30,67	15,83	28,31	20,76	19,26	31,98	21,56
Liane[1] [t/ ha]	4,29	4,82	6,41	6,61	10,11	7,21	4,38	4,77	5,43	6,67
Litter[1] [t/ ha]	0,48	0,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
mittl. Pflanzenzahl[3] [1/ ha]	149.444	146.111	83.333	97.778	100.000	106.389	105.370	140.000	79.444	138.056

[1] Datengrundlage: 1 Beobachtung je Parzelle
[2] Phytomasse = Blatt + Ast + Stamm + Liane
[3] Datengrundlage: Zählung bei Erfassung der Einzelpflanzencharakteristika

Tabelle A- 26: Beschreibung des zu häckselnden Pflanzenbestandes in Abhängigkeit von der Versuchsfläche, Fläche 42 und 58

Flächennummer		42	58
Phytomasse[1,2]	[t/ ha]	60,11	154,00
Blatt[1]	[t/ ha]	13,92	54,93
Ast[1]	[t/ ha]	7,07	37,85
Stamm[1]	[t/ ha]	33,02	40,72
Liane[1]	[t/ ha]	6,11	20,50
Litter[1]	[t/ ha]	0,00	0,00
Mittl. Pflanzenzahl[3]	[1/ ha]	106.667	63.000
mittl. Volumen[3]	[m³ /ha]	356,5	22266,6

[1] Datengrundlage: 1 Beobachtung je Parzelle

[2] Phytomasse = Blatt + Ast + Stamm + Liane

[3] Datengrundlage: Zählung bei Erfassung der Einzelpflanzencharakteristika

Tabelle A- 27: Varianzanalyse der abhängigen Variable „mittlerer Durchmesser 1“ (DIAM_1), Datengrundlage: flächenbezogener Datensatz (n=41)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	9	786.979259	87.442140	12.29	<.0001
Error	31	220.626961	7.116999		
Corrected Total	40	1007.606220			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	DIAM 1 Mean
0.781039	19.90185	2.667770	13.40463

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
alter2	3	281.4746247	93.8248749	13.18	<.0001
ort3	6	255.9232383	42.6538730	5.99	0.0003

Tabelle A- 28: Varianzanalyse der abhängigen Variable „mittlerer Pflanzendurchmesser“ (AVGDIAM), Datengrundlage: flächenbezogener Datensatz (n=41)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	9	936.168780	104.018753	12.14	<.0001
Error	31	265.721771	8.571670		
Corrected Total	40	1201.890551			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	AVGDIAM Mean
0.778914	21.20577	2.927741	13.80634

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
alter2	3	321.8932455	107.2977485	12.52	<.0001
ort3	6	323.5097425	53.9182904	6.29	0.0002

Tabelle A- 29: Varianzanalyse der abhängigen Variable „mittlere Pflanzenhöhe“ (HOEHE), Datengrundlage: flächenbezogener Datensatz (n=41)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	9	98405.3332	10933.9259	7.57	<.0001
Error	31	44781.4959	1444.5644		
Corrected Total	40	143186.8292			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	HOEHE Mean
0.687251	16.13178	38.00743	235.6059

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
alter2	3	53099.34270	17699.78090	12.25	<.0001
ort3	6	33540.82929	5590.13821	3.87	0.0054

Tabelle A- 30: Varianzanalyse der abhängigen Variable „mittleres Pflanzenvolumen“ (VOL), Datengrundlage: flächenbezogener Datensatz (n=41)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	9	295229455.0	32803272.8	18.18	<.0001
Error	31	55925266.8	1804040.9		
Corrected Total	40	351154721.8			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	VOL Mean
0.840739	70.89210	1343.146	1894.634

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
alter2	3	42591361.6	14197120.5	7.87	0.0005
ort3	6	137128260.3	22854710.1	12.67	<.0001

Tabelle A- 31: Varianzanalyse der abhängigen Variable „mittlere Einzelpflanzenmasse“ (EINZ_MAS), Datengrundlage: flächenbezogener Datensatz (n=41)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	9	65716649.03	7301849.89	45.46	<.0001
Error	31	4979596.33	160632.14		
Corrected Total	40	70696245.36			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	EINZ MAS Mean
0.929563	50.24338	400.7894	797.6959

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
alter2	3	6332863.75	2110954.58	13.14	<.0001
ort3	6	32568727.26	5428121.21	33.79	<.0001

Tabelle A- 32: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Phytomasse je Hektar“ (PHYTOM), Datengrundlage: flächenbezogener Datensatz (n=41)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	9	7195.46520	799.49613	5.33	0.0002
Error	31	4651.92644	150.06214		
Corrected Total	40	11847.39164			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	PHYTOM Mean
0.607346	23.95325	12.24999	51.14122

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
alter2	3	3171.408812	1057.136271	7.04	0.0010
ort3	6	2696.718574	449.453096	3.00	0.0200

Tabelle A- 33: Raumdichte untersuchter Pflanzenspezies (Abarema cochleata – Byrsonima spicata)

Pflanzenspezies	*[g/ cm³]*	*Bemerkung, Quelle*
Abarema cochleata	0,5658	
Abarema jupunba	0,6293	
Abarema racemosa	0,8100	Fearnside, P.M., 1997
Aegiphila racemosa	0,3936	
Aliberta myrciifolia	0,6993	
Amazonia campestris	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Ambelania acida	0,4253	
Annona montana	0,4405	
Annona paludosa	0,4962	
Artocarpus heterophyllus	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Astrocaryum aculeatum	0,3366	
Astrocaryum mumbaca	0,3366	
Attalea maripa	0,3366	Mittelwert Astrocaryum
Bactris sp.	0,3366	Mittelwert Bactris balanophora
Banara guianensis	0,5965	
Batesia floribunda	0,7082	
Bauhinia coronata	0,6118	
Bauhinia guianensis	0,6151	
Bauhinia macrostachya	0,6979	
Bauhinia macrostachya var. Tenuifolia	0,6979	nach macrostachya
Bernardinia fluminensis	0,4797	
Bombax aquaticum	0,3184	
Bombax globosum	0,6181	
Bombax longipedicellatum	0,4683	Mittelwert Bombax
Borreria latifolia	0,5810	Mittelwert Borreria
Borreria verticillata	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Byrsonima aerugo	0,5925	0,62 nach Fearnside 1997
Byrsonima crassiflora	0,5123	
Byrsonima deusa	0,6176	
Byrsonima spicata	0,6220	0,61 nach Fearnside 1997

Tabelle A- 34: Raumdichte untersuchter Pflanzenspezies (Calantha divaricata – Cordia exaltata)

Pflanzenspezies	*[g/ cm³]*	*Bemerkung, Quelle*
Calantha divaricata	0,0890	
Calathea lutea	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Calathea sp.	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Calliandra surinamensis	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Casearia arborea	0,6719	
Casearia decandra	0,7335	
Casearia javitensis	0,5841	
Casearia rubiginosa	0,6488	Mittelwert Casearia
Casearia sylvestris	0,6055	
Cassia apoucouita	0,7959	
Cassia chrysocarpa	0,5156	
Cassia fastuosa	0,6326	Mittelwert Cassia
Cassia hoffmannseggii	0,5927	
Cassia latifolia	0,6326	Mittelwert Cassia
Cassia leiandra	0,6260	
Cassipourea guianensis	0,6388	
Cecropia obtusa	0,3600	
Cecropia palmata	0,2906	
Chrysophyllum auratum	0,5000	
Chrysophyllum riparium	0,6728	
Clarisia ilicifolia	0,5765	
Clarisia racemosa	0,5900	nach Fearnside 1997
Clidemia hirta	0,6175	
Coccolaba sp.	0,4968	
Combretum rotundifolium	0,5676	
Conceveiba guianensis	0,5980	
Conepia robusta	0,7504	
Connarus angustifolium	0,6616	
Connarus perrottetii	0,6988	
Cordia exaltata	0,4100	

Tabelle A- 35: Raumdichte untersuchter Pflanzenspezies (Cordia multispicata – Duguetia flagellaris)

Pflanzenspezies	*[g/ cm³]*	*Bemerkung, Quelle*
Cordia multispicata	0,4107	
Cordia nodosa	0,4113	
Costus arabicus	0,1484	
Couma guianensis	0,5916	
Couratari guianensis	0,5957	0,54 nach Fearnside 1997
Couratari oblongifolia	0,4900	nach Fearnside 1997
Couratari stellata	0,6300	nach Fearnside 1997
Coutoubea spicata	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Croton matourensis	0,4688	
Croton palanostigma	0,5300	
Cupania diphylla	0,7914	
Cupania diphylla	0,8089	
Cupania scrobiculata	0,7787	
Cybianthus sp.	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Dalbergia subcymosa	1,0200	
Davilla kunthii	0,6667	
Davilla rugosa	0,5049	
Derris spruceanum	0,6674	
Desmoncus polycanthus	0,4120	
Dialium guianense	0,8750	0,88 nach Fearnside 1997
Dichapetalum pedunculatum	0,5956	
Dichapetalum rugosum	0,6023	
Dioclea sp.	0,3012	Mittelwert Dioclea
Dioclea virgata	0,3012	
Dioscorea sp.	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Diplotropis purpurea	0,7750	0,78 nach Fearnside 1997
Dipteryx odorata	0,8248	0,93 nach Fearnside 1997
Doliocarpus brevipedicellatus	0,3258	
Dracontium asperum	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Duguetia flagellaris	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen

Tabelle A- 36: Raumdichte untersuchter Pflanzenspezies (Enterolobium schomburgkii – Hymatanthus sucuuba)

Pflanzenspezies	*[g/ cm³]*	*Bemerkung, Quelle*
Enterolobium schomburgkii	0,7502	0,78 nach Fearnside 1997
Erechtites hieracifolia	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Erythroxyllum leptoneurum	0,5910	
Eschweilera coriacea	0,7235	0,78 nach Fearnside 1997
Eschweilera ovata	0,6234	0,81 nach Fearnside 1997
Eugenia belemitana	0,6515	Mittelwert Eugenia
Eugenia biflora	0,6515	Mittelwert Eugenia
Eugenia flavescens	0,6606	
Eugenia parviflora	0,6515	Mittelwert Eugenia
Eugenia patrizii	0,6423	
Eugenia sp.	0,6515	Mittelwert Eugenia
Euxylophora paraensis	0,7000	nach Fearnside 1997
Geissospermum vellosii	0,5473	
Genipa oblongifolia	0,5700	nach Fearnside 1997
Gouania cornifolia	0,3836	
Guarea guidonia	0,4999	0,52 nach Fearnside 1997
Guarea macrophylla	0,5570	
Guatteria poeppigiana	0,4786	0,52 nach Fearnside 1997
Gustavia augusta	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Heisteria acuminata	0,6564	
Heisteria densifrons	0,6788	
Heliconia psittacorum	0,1707	
Heliconia sp.	0,1707	
Hevea brasiliensis	0,4037	
Hirtella bicornis	0,7129	
Hirtella glandulosa	0,8433	
Hirtella racemosa	0,7913	
Homalium guianensis	0,7150	Homalium longifolium
Humiria balsamifera	0,6302	0,66 nach Fearnside 1997
Hymatanthus sucuuba	0,5331	

Tabelle A- 37: Raumdichte untersuchter Pflanzenspezies (Hymenaea parviflora – Machaerium madeirense)

Pflanzenspezies	*[g/ cm³]*	*Bemerkung, Quelle*
Hymenaea parviflora	0,7963	0,95 nach Fearnside 1997
Inga alba	0,5100	0,62 nach Fearnside 1997
Inga auristellae	0,7821	
Inga cayennensis	0,5217	
Inga edulis	0,6813	Mittelwert Inga
Inga flagelliformis	0,7222	
Inga heterophylla	0,6018	
Inga luschnathiana	0,6813	Mittelwert Inga
Inga macrophylla	0,6813	Mittelwert Inga
Inga nitida	0,7813	
Inga rubiginosa	0,7150	
Inga sp.	0,6813	Mittelwert Inga
Inga thibaudiana	0,8160	
Ischnosiphon puberulus	0,2944	
Lacistema agregatum	0,4630	Mittelwert Lacistema
Lacistema pubescens	0,4630	
Lacmellea aculeata	0,6275	
Lecythis lurida	0,6776	0,83 nach Fearnside 1997
Lecythis pisonis	0,6181	0,84 nach Fearnside 1997
Licania canescens	0,7931	
Licania kunthiana	0,7488	
Licania macrophylla	0,7710	Mittelwert Licania
Licaria canella	1,0400	nach Fearnside 1997
Lindackeria paraensis	0,6551	
Losoqueria latifolis	0,5535	
Lutheopsis duckeana	0,6208	0,62 nach Fearnside 1997
Mabea angustifolia	0,7712	
Machaerium amazonense	0,5736	
Machaerium froesii	0,3499	
Machaerium madeirense	0,5472	

Tabelle A- 38: Raumdichte untersuchter Pflanzenspezies (Machaerium quinata – Myrciaria tenella)

Pflanzenspezies	*[g/ cm³]*	*Bemerkung, Quelle*
Machaerium quinata	0,4484	
Machaerium sp.	0,4798	Mittelwert Machaerium
Magaratia nobilis	0,5713	
Mansoa dificilis	0,3300	
Maprounea guianensis	0,5994	
Maquira guianensis	0,5547	
Marantha divaricata	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Maripa luceus	0,4915	
Maytenus myricoides	0,7493	
Memora allamandiflora	0,6391	
Memora flavida	0,5857	
Memora magnifica	0,5895	
Miconia alata	0,6400	
Miconia ceramycarpa	0,6055	Mittelwert Miconia
Miconia ciliata	0,5862	
Miconia eriodonta	0,6317	
Miconia guianensis	0,6055	Mittelwert Miconia
Miconia minutiflora	0,5643	
Miconia sp.	0,6055	Mittelwert Miconia
Miconia surinamense	0,6055	Mittelwert Miconia
Mora gonggrijpii	0,8000	nach Fearnside 1997
Moutabea guianensis	0,6041	
Myrcia bracteata	0,6190	
Myrcia cuprea	0,7297	
Myrcia deflexa	0,7453	
Myrcia fallax	0,6846	Mittelwert Myrcia
Myrcia sp.	0,6846	Mittelwert Myrcia
Myrcia sylvatica	0,6445	
Myrciaria floribunda	0,7130	
Myrciaria tenella	0,7086	

Tabelle A- 39: Raumdichte untersuchter Pflanzenspezies (Nectandra cuspidata – Poecilanthe effusa)

Pflanzenspezies	*[g/ cm³]*	*Bemerkung, Quelle*
Nectandra cuspidata	0,5257	
Nectandra spp.	0,5200	nach Fearnside 1997
Neea floribunda	0,4652	
Neea oppositifolia	0,4655	
Neea sp.	0,4441	
Nepsera aquatica	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Ocotea glomerata	0,5086	Mittelwert Ocotea
Ocotea guianensis	0,4874	0,52 nach Fearnside
Ocotea longifolia	0,5086	Mittelwert Ocotea
Ocotea opifera	0,5285	0,70 nach Fearnside 1997
Ocotea sp.	0,5100	
Ormosia nobilis	0,5990	0,59 nach Fearnside 1997
Ormosia paraensis	0,6700	nach Fearnside 1997
Ormosia sp.	0,6300	Mittelwert Ormosia
Ouratea cataneaeformis	0,5583	
Pagamea guianensis	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Palicourea crocea	0,4957	
Palicourea guianensis	0,4741	
Pariana campestris	0,2353	
Parkia paraensis	0,4400	nach Fearnside 1997
Parkia ulei	0,7316	0,40 nach Fearnside 1997
Passiflora araujoi	0,6726	Mittelwert Passiflora
Passiflora nitida	0,6726	
Pavonia malacophylla	0,5089	
Phenakospermum guyanense	0,1672	
Phyllostylon brasiliensis	0,7700	nach Fearnside 1997
Pithecellobium sp.	0,5618	
Platonia insignis	0,6794	
Platymiscium filipes	0,8400	
Poecilanthe effusa	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen

Tabelle A- 40: Raumdichte untersuchter Pflanzenspezies (Pogonophora schomburgkiana – Serjania paucidentata)

Pflanzenspezies	*[g/ cm³]*	*Bemerkung, Quelle*
Pogonophora schomburgkiana	0,6743	
Posoqueria latifolia	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Pouratea catanaeformis	0,5583	
Prionostemma aspera	0,5808	
Pseudima frutescens	0,5197	
Psidium acutangulum	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Psidium guajava	0,7500	
Psychotria colorata	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Quiina paraensis	0,7769	
Raudia spinosa	0,5688	
Rauvolfia paraensis	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Rheedia macrophylla	0,4447	
Rhenia armata	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Richardella macrophylla	0,6408	
Rollinia exsucca	0,5898	0,52 nach Fearnside 1997
Rourea doniana	0,5465	
Rourea ligulata	0,5465	Mittelwert Rourea
Ryania acuminata	0,5687	
Sabicea aspera	0,3434	
Sacoglottis guianensis	0,7928	0,77 nach Fearnside 1997
Salacia sp.	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Sapindus saponaria	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Sapium lanceolatum	0,3656	
Sapium prunifolium	0,3656	Mittelwert Sapium
Schefflera morototoni	0,4273	0,41 nach Fearnside 1997
Scleria cyperina	0,3380	
Scleria pterota	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Sclerolobium chrysophyllum	0,6200	nach Fearnside 1997
Senna chrysocarpa	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Serjania paucidentata	0,4804	

Tabelle A- 41: Raumdichte untersuchter Pflanzenspezies (Sida sp. – Trattinnickia rhoifolia)

Pflanzenspezies	*[g/ cm³]*	*Bemerkung, Quelle*
Sida sp.	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Simaba cedron	0,5017	
Siparuna guianensis	0,5685	
Sloanea garceana	0,7274	
Sloanea guianensis	0,8036	
Smilax aequatorialis	0,8391	
Smilax syphilitica	0,8391	Mittelwert Smilax
Solanum caavurana	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Spondias mombin	0,3124	0,38 nach Fearnside
Strychnos tomentosa	0,6824	
Stryphnodendron pulcherrimum	0,4035	
Stygmaphyllon mart	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Swartzia arborescens	0,7604	
Swartzia brachyrhachis	0,7295	
Swartzia racemosa	0,6986	
Symphonia globulifera	0,5800	nach Fearnside 1997
Tabebuia caraiba	0,6420	
Tabebuia serratifolia	0,8800	nach Fearnside 1997
Tabernaemontana angulata	0,3584	
Tabernaemontana flavicans	0,5977	
Tabernaemontana sp.	0,4781	Mittelwert Tabernaemontana
Talisia carinata	0,8615	
Talisia retusa	0,7420	
Tapirira guianensis	0,6116	0,50 nach Fearnside 1997
Tapura amazonica	0,4705	
Terminalia amazonia	0,7500	nach Fearnside 1997
Tetracera willdenowiana	0,6667	
Theobroma subincanum	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Thyrsodium paraense	0,6231	
Trattinnickia rhoifolia	0,5382	

Tabelle A- 42: Raumdichte untersuchter Pflanzenspezies (Trema micrantha – Zanthoxylum rhoifolium)

Pflanzenspezies	*[g/ cm³]*	*Bemerkung, Quelle*
Trema micrantha	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Trigonia sp.	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Urena lobata	0,5810	Mittelwert aller Pflanzen
Vanila sp.	0,0921	
Virola calophylla	0,5292	
Virola sebifera	0,4800	
Virola surinamense	0,4000	
Vismia guianensis	0,7204	
Vitex triflora	0,5605	
Wulffia baccata	0,3710	
Xylopia amazonica	0,4830	
Xylopia calycina	0,4700	nach Fearnside 1997
Xylopia frutescens	0,6400	
Xylopia nitida	0,5700	nach Fearnside 1997
Zanthoxylum rhoifolium	0,7439	

Tabelle A- 43: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Dauer des ersten Bearbeitungsschrittes“ (BEARB_1), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen mit Phytomasse-Bestimmung (n=36) , Kovariable: Phytomasse der Fläche (PHYTOM2)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	107.6491802	8.9707650	43.33	<.0001
Error	23	4.7615754	0.2070250		
Corrected Total	35	112.4107556			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	BEARB 1 Mean
0.957641	26.94079	0.455000	1.688889

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	2.26837013	2.26837013	10.96	0.0031
alter2	3	3.12416814	1.04138938	5.03	0.0080
ort3	5	0.21932535	0.04386507	0.21	0.9540
erfa2	2	3.19742481	1.59871241	7.72	0.0027
phytom2	1	1.05444074	1.05444074	5.09	0.0338

Tabelle A- 44: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Dauer des Wendevorganges während des ersten Bearbeitungsschrittes“ (WENDE_1), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen mit Phytomasse-Bestimmung (n=36) , Kovariable: Phytomasse der Fläche (PHYTOM2)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	3.72035604	0.31002967	19.38	<.0001
Error	23	0.36791896	0.01599648		
Corrected Total	35	4.08827500			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	WENDE 1 Mean
0.910006	33.50389	0.126477	0.377500

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	0.03660016	0.03660016	2.29	0.1440
alter2	3	1.27788735	0.42596245	26.63	<.0001
ort3	5	0.18533007	0.03706601	2.32	0.0764
erfa2	2	0.22196795	0.11098398	6.94	0.0044
phytom2	1	0.07910218	0.07910218	4.94	0.0363

Tabelle A- 45: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Dauer der Verstopfung der Maschine während des ersten Bearbeitungsschrittes“ (VERST_1), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen mit Phytomasse-Bestimmung (n=36) , Kovariable: Phytomasse der Fläche (PHYTOM2)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	1.23870463	0.10322539	7.69	<.0001
Error	23	0.30861759	0.01341816		
Corrected Total	35	1.54732222			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	VERST 1 Mean
0.800547	132.8065	0.115837	0.087222

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	0.01415947	0.01415947	1.06	0.3150
alter2	3	0.50429313	0.16809771	12.53	<.0001
ort3	5	0.04028116	0.00805623	0.60	0.7001
erfa2	2	0.25404702	0.12702351	9.47	0.0010
phytom2	1	0.06429227	0.06429227	4.79	0.0390

Tabelle A- 46: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Kraftstoffverbrauch während des ersten Bearbeitungsschrittes“ (SPRIT_1), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen mit Phytomasse-Bestimmung (n=36) , Kovariable: Phytomasse der Fläche (PHYTOM2)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	120583.6184	10048.6349	35.01	<.0001
Error	23	6601.4644	287.0202		
Corrected Total	35	127185.0827			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	SPRIT 1 Mean
0.948096	30.02098	16.94167	56.43278

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	2279.616365	2279.616365	7.94	0.0098
alter2	3	4826.371963	1608.790654	5.61	0.0049
ort3	5	603.520866	120.704173	0.42	0.8296
erfa2	2	2280.562388	1140.281194	3.97	0.0330
phytom2	1	2447.651123	2447.651123	8.53	0.0077

Tabelle A- 47: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Dauer des zweiten Bearbeitungsschrittes“ (BEARB_2), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen mit Phytomasse-Bestimmung (n=36) , Kovariable: Phytomasse der Fläche (PHYTOM2)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	39.59386265	3.29948855	41.65	<.0001
Error	22	1.74276592	0.07921663		
Corrected Total	34	41.33662857			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	BEARB_2 Mean
0.957840	24.44394	0.281454	1.151429

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	0.23109970	0.23109970	2.92	0.1017
alter2	3	1.83077601	0.61025867	7.70	0.0011
ort3	5	0.47591609	0.09518322	1.20	0.3410
erfa2	2	0.97287604	0.48643802	6.14	0.0076
phytom2	1	0.22698261	0.22698261	2.87	0.1046

Tabelle A- 48: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Dauer des Wendevorganges während des zweiten Bearbeitungsschrittes“ (WENDE_2), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen mit Phytomasse-Bestimmung (n=36) , Kovariable: Phytomasse der Fläche (PHYTOM2)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	1.30425995	0.10868833	38.97	<.0001
Error	22	0.06135719	0.00278896		
Corrected Total	34	1.36561714			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	WENDE_2 Mean
0.955070	27.46467	0.052811	0.192286

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	0.00130224	0.00130224	0.47	0.5015
alter2	3	0.09726643	0.03242214	11.63	<.0001
ort3	5	0.04268206	0.00853641	3.06	0.0302
erfa2	2	0.14919634	0.07459817	26.75	<.0001
phytom2	1	0.00161199	0.00161199	0.58	0.4552

Tabelle A- 49: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Dauer der Verstopfung der Maschine während des zweiten Bearbeitungsschrittes“ (VERST_2), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen mit Phytomasse-Bestimmung (n=36) , Kovariable: Phytomasse der Fläche (PHYTOM2)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	0.02605133	0.00217094	2.93	0.0139
Error	22	0.01630296	0.00074104		
Corrected Total	34	0.04235429			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	VERST 2 Mean
0.615081	161.4871	0.027222	0.016857

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	0.00007333	0.00007333	0.10	0.7561
alter2	3	0.00440409	0.00146803	1.98	0.1463
ort3	5	0.00412339	0.00082468	1.11	0.3822
erfa2	2	0.00377013	0.00188506	2.54	0.1014
phytom2	1	0.00192757	0.00192757	2.60	0.1210

Tabelle A- 50: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Kraftstoffverbrauch während des ersten Bearbeitungsschrittes“ (SPRIT_1), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen mit Phytomasse-Bestimmung (n=36) , Kovariable: Phytomasse der Fläche (PHYTOM2)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	46322.17372	3860.18114	45.49	<.0001
Error	22	1867.05236	84.86602		
Corrected Total	34	48189.22607			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	SPRIT 1 Mean
0.961256	26.33218	9.212275	34.98486

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	224.455080	224.455080	2.64	0.1181
alter2	3	7664.421635	2554.807212	30.10	<.0001
ort3	5	421.858271	84.371654	0.99	0.4440
erfa2	2	5843.291218	2921.645609	34.43	<.0001
phytom2	1	296.540985	296.540985	3.49	0.0750

Tabelle A- 51: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Dauer des ersten Bearbeitungsschrittes“ (BEARB_1), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen (n= 64)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	125.1660988	10.4305082	10.16	<.0001
Error	51	52.3655997	1.0267765		
Corrected Total	63	177.5316984			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	BEARB 1 Mean
0.705035	56.60399	1.013300	1.790156

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	0.05589792	0.05589792	0.05	0.8164
alter2	3	49.66492803	16.55497601	16.12	<.0001
ort3	5	11.37408648	2.27481730	2.22	0.0669
erfa2	3	12.68141098	4.22713699	4.12	0.0109

Tabelle A- 52: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Dauer des Wendevorganges während des ersten Bearbeitungsschrittes“ (WENDE_1), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen (n= 64)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	4.14645364	0.34553780	11.23	<.0001
Error	51	1.56900729	0.03076485		
Corrected Total	63	5.71546094			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	WENDE 1 Mean
0.725480	45.06440	0.175399	0.389219

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	0.01290499	0.01290499	0.42	0.5201
alter2	3	1.98892891	0.66297630	21.55	<.0001
ort3	5	0.34805916	0.06961183	2.26	0.0620
erfa2	3	0.28245656	0.09415219	3.06	0.0364

Tabelle A- 53: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Dauer der Verstopfung der Maschine während des ersten Bearbeitungsschrittes“ (VERST_1), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen (n= 64)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	1.93578899	0.16131575	5.93	<.0001
Error	51	1.38655476	0.02718735		
Corrected Total	63	3.32234375			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	VERST 1 Mean
0.582658	142.2196	0.164886	0.115938

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	0.00997820	0.00997820	0.37	0.5473
alter2	3	1.07832789	0.35944263	13.22	<.0001
ort3	5	0.04722889	0.00944578	0.35	0.8815
erfa2	3	0.07617098	0.02539033	0.93	0.4312

Tabelle A- 54: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Kraftstoffverbrauch während des ersten Bearbeitungsschrittes“ (SPRIT_1), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen (n= 64)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	142347.5946	11862.2996	9.85	<.0001
Error	51	61412.1573	1204.1599		
Corrected Total	63	203759.7519			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Sprit 1 Mean
0.698605	60.37287	34.70101	57.47781

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	513.62577	513.62577	0.43	0.5166
alter2	3	54216.38713	18072.12904	15.01	<.0001
ort3	5	12941.05802	2588.21160	2.15	0.0744
erfa2	3	12941.43794	4313.81265	3.58	0.0199

Tabelle A- 55: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Dauer des zweiten Bearbeitungsschrittes“ (BEARB_2), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen (n= 64)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	46.80861756	3.90071813	7.26	<.0001
Error	49	26.32835019	0.53731327		
Corrected Total	61	73.13696774			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	BEARB 2 Mean
0.640013	59.02211	0.733017	1.241935

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	513.62577	513.62577	0.43	0.5166
alter2	3	54216.38713	18072.12904	15.01	<.0001
ort3	5	12941.05802	2588.21160	2.15	0.0744
erfa2	3	12941.43794	4313.81265	3.58	0.0199

Tabelle A- 56: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Dauer des Wendevorganges während des zweiten Bearbeitungsschrittes“ (WENDE_2), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen (n= 64)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	1.23533119	0.10294427	4.68	<.0001
Error	49	1.07835268	0.02200720		
Corrected Total	61	2.31368387			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	WENDE 2 Mean
0.533924	77.16099	0.148348	0.192258

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	0.02031569	0.02031569	0.92	0.3414
alter2	3	0.51833256	0.17277752	7.85	0.0002
ort3	5	0.21357226	0.04271445	1.94	0.1044
erfa2	3	0.18170134	0.06056711	2.75	0.0525

Tabelle A- 57: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Dauer der Verstopfung der Maschine während des zweiten Bearbeitungsschrittes“ (VERST_2), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen (n= 64)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	0.04617084	0.00384757	3.64	0.0006
Error	49	0.05182270	0.00105761		
Corrected Total	61	0.09799355			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	VERST 2 Mean
0.471162	160.0233	0.032521	0.020323

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	0.00009341	0.00009341	0.09	0.7676
alter2	3	0.01092093	0.00364031	3.44	0.0237
ort3	5	0.00768405	0.00153681	1.45	0.2223
erfa2	3	0.00189263	0.00063088	0.60	0.6203

Tabelle A- 58: Varianzanalyse der abhängigen Variable „Kraftstoffverbrauch während des zweiten Bearbeitungsschrittes“ (SPRIT_2), Datengrundlage: mit AHWI FM 600 bearbeitete Flächen (n= 64)

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	39067.08263	3255.59022	4.95	<.0001
Error	49	32216.66741	657.48301		
Corrected Total	61	71283.75004			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	SPRIT 2 Mean
0.548050	67.01608	25.64143	38.26161

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
HINDERN	1	37.17085	37.17085	0.06	0.8131
alter2	3	12358.33601	4119.44534	6.27	0.0011
ort3	5	4599.66957	919.93391	1.40	0.2411
erfa2	3	8208.41106	2736.13702	4.16	0.0101

Danksagungen

Mein Dank geht an

Prof. Dr. Wolfgang Lücke, der mir die notwendigen Freiräume zur Realisierung dieser Arbeit geschaffen hat und mit seiner Begeisterung für das Thema unersetzliche Impulse geliefert hat,

Prof. Dr. P.L.G. Vlek für die Unterstützung als Projektleiter und das Interesse am Thema,

Dr. Dieter von Hörsten für seine wertvolle Kritik und detaillierte Hinweise zur redaktionellen Bearbeitung,

Dr. Konrad Vielhauer für die vielen fruchtbaren Diskussionen zur Durchführung und die wertvolle Unterstützung in allen Fragen des tropischen Alltags, Dr. Manfred Denich für wertvolle Hinweise zur Bearbeitung botanischer Fragestellungen sowie für die administrative Unterstützung, Dr. Tatiana Deane de Abreu Sá, Dr. Maria Socorro de Andrade Kato und Dr. Osvaldo Ryohei Kato für interessante Gespräche, schmackhafte Mittagessen, die Begeisterung für das Thema, sowie für die kompetente Leitung und enthusiastische Promotion des Häcksler-Projekts, Dr. Osmar Aguiar für die Unterstützung in allen Fragen der Holztechnologie und die Bereitstellung der Analysekapazitäten, Dipl. Ing. Walter Behn für die Unterstützung in technischen Fragen und die reibungslose Logistik zur Überbrückung der großen Distanzen, sowie Hartwig Marten, Uwe Wiese und Siegfried Opolka für die Realisierung technischer Unmöglichkeiten, Uwe Wiese für die Erstellung zahlloser technischer Zeichnungen, Paulinho Edson Negrão für die Vollbringung von Wundern an irreparabel erscheinenden Traktoren und Maschinen, Clóvis Moises Priebe Bervald für die systematische und akribische Arbeit bei der Auswertung großer Hackschnitzelberge, Ednaldo A. P. Nascimento für hervorragende, akribische Arbeit und ausdauernde Leistungen unter widrigen Verhältnissen im Busch, Sr. Manoel dos Reis Cordeiro für die Bereitstellung seiner unschätzbaren Kenntnisse der Flora der Sekundärvegetation, Marcelo Urbano Felipe Marques für die Unterstützung im täglichen technischen und organisatorischen Kleinkrieg, Bernhard Urich für die Hilfe und Arbeit im Busch, die Firma AHWI do Brasil Ltda. mit Frau Dr. Betina Stehmann und Dipl.-Ing. Alois Philipp für die Unterstützung in technischen Fragen bezüglich des

Forstmulchers, die Firma Felde, hier insbesondere an Herrn Dipl.-Ing. Jörg Felde und Herrn Lang für die Unterstützung in allen Fragen bezüglich der Sägeblätter, Dr. Hinrich Snell für seine aufopferungsvolle Einführung in die Geheimnisse der Statistik, und die Embrapa Amazônia Oriental-CPATU für die Bereitstellung der Infrastruktur und Laborkapazitäten sowie an Sr. Gonzaga und Sr. Malá, die mit unermüdlichem Einsatz im Feld und auf der Straße zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein ganz besonderer Dank geht an meine Frau Natalie Block für ihr Verständnis und die unschätzbare Unterstützung, an meine Eltern Gisela und Diethart Block für ihre Ermunterungen und regelmäßige Berichte aus der Heimat, außerdem an meine Schwestern mit ihren Familien für Korrekturlesungen, die Versorgung mit Nachrichten und Digitalfotos,

sowie an alle, die ich hier nicht aufgeführt habe und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Deutsch-Brasilianischen Forschungsprojektes SHIFT-Capoeira durchgeführt, das von Deutscher Seite durch das BMB+F (Bundesministerium für Bildung und Forschung) und von Brasilianischer Seite durch das CNPq (Conselho Nacional de Tecnologia e Pesquisa) finanziell gefördert wurde.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Andreas Block
Geburtsdatum:	03.01.1969
Geburtsort:	Bielefeld
Staatsangehörigkeit:	deutsch

Ausbildung

Schulbildung:

1975 – 1979	Grundschule Volmerdingsen
1979 – 1988	Immanuel-Kant-Gymnasium Bad Oeynhausen Abschluss: Allgemeine Hochschulreife
1988 – 1990	Wehrdienst und Ausbildung im Fernmeldebataillon 120 Rotenburg/ Wümme, Ausbildung zum Reserveoffizier, Dienstgrad Leutnant d. R.

Studium:

1990 – 1991	Grundstudium Maschinenbau, TU Braunschweig
1991 – 1992	Landwirtschaftliches Praktikum, Abschluss: Praktikantenprüfung
1992 – 1996	Studium der Agrarwissenschaften, Georg-August-Universität Göttingen, Schwerpunkt: Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus
1996 – 1999	Diplomarbeit im Institut für Agrartechnik, Universität Göttingen: „Entwicklung und Erprobung eines Doppelrotorhackers als Alternative zur Brandrodungswirtschaft in Nord-Ost-Amazonien.“ Abschluss: Dipl.-Ing. agr.
1999 – 2004	Promotionsstudium, Georg-August- Universität Göttingen

Tätigkeiten während und nach dem Studium:

1985 – 1999	Mitarbeit in einem landwirtschaftlichen Lohnunternehmen
1993 – 1999	Mitarbeit in einem Landhandelsunternehmen
1996 – 1997	Wissenschaftliche Hilfskraft im Institut für Agrartechnik
1996 – heute	selbständiger Landwirt
1997 – 1999	Freie Mitarbeit in einem Ingenieurbüro der Entsorgungswirtschaft
1999 – heute	Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Agrartechnik