

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Holzkunde und Holztechnik

Bewirtschaftung und Ökobilanzierung  
von Kurzumtriebsplantagen

Frank Joachim Burger

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

Doktors der Forstwissenschaft

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. R. Mosandl

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. G. Wegener (i. R.)

2. Univ.-Prof. Dr. Walter Warkotsch

Die Dissertation wurde am 12.07.2010 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 07.12.2010 angenommen.



## **Vorwort**

Seit 1992 beschäftigt sich die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft in einem praxisorientierten Projekt mit dem Anbau von Kurzumtriebsplantagen auf ehemals landwirtschaftlich genutzten Flächen. Einer Phase der Begründung von Versuchsstandorten in ganz Bayern folgten Jahre mit Ernteeinsätzen, die von forstlichen Arbeitsstudien begleitet wurden. Ertragskundliche Aufnahmen und ökologische Begleituntersuchungen rundeten das Wissen über diese neue Art der Landnutzung ab. Zunächst als Projektbearbeiter, später als Projektleiter des langfristigen Projekts eingesetzt, entstand bei mir fast zwangsläufig die Idee einer Promotion über die Bewirtschaftung und Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr. Dr. habil. Drs. h.c. Gerd Wegener, Inhaber des Lehrstuhls für Holzkunde und Holztechnik und Vorstand der Holzforschung München, der die Idee von der Arbeit offen aufnahm und stets ein Ansprechpartner für schwierige Fragen war. Seine motivierende Art hat mir sehr geholfen.

Herrn Prof. Dr. Warkotsch, dem Leiter des Lehrstuhls für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik möchte ich für die Bereitschaft danken, die Zweitkorrektur der Arbeit zu übernehmen.

Auch die Leitung der LWF hat durch die wohlwollende Aufnahme meiner Absicht zur Promotion und die Bereitschaft, mir zur Abfassung der Arbeit Teilzeit zu gewähren, zum Gelingen des Projekts beigetragen. Dafür sei ihr herzlich gedankt.

Meinen früheren Kollegen, Herrn Kay Ponitz, Herrn Wilfried Sommer und Herrn Daniel Dabizzi danke ich für die Durchführung der forstlichen Arbeitsstudien auf den Versuchsflächen. Auf diesen Zeitstudien basiert die vorliegende Ökobilanz wesentlich.

Herrn Holger Holland-Moritz sei für seine Unterstützung bei der Statistik in Kapitel 4 gedankt.

Nicht zu vergessen die vielen Maschinenring-Arbeitskräfte, land- und forstwirtschaftlichen Lohnunternehmer, die die Arbeiten auf den Versuchsflächen durchgeführt haben, ohne die eine fundierte Ökobilanzierung der Landnutzungsform Kurzumtriebsplantage nicht möglich gewesen wäre. Ihnen gebührt vor allem mein Dank.

Freising, im Juni 2010

Frank Joachim Burger



Meinen Söhnen

Luis Valentin und Maximilian



<b>1 Einleitung und Zielsetzung</b> .....	1
<b>2 Versuchsflächen</b> .....	3
<b>2.1 Übersicht</b> .....	3
<b>2.2 Standortkundliche Beschreibung</b> .....	4
<b>3 Begründung, Pflege und Rodung von Kurzumtriebsplantagen</b> .....	7
<b>3.1 Baumartenwahl</b> .....	7
<b>3.2 Pflanzverband und Umtriebszeit</b> .....	7
<b>3.3 Vorbereitende Maßnahmen</b> .....	8
<b>3.4 Kulturbegründung</b> .....	10
<b>3.5 Pflege von Kurzumtriebsplantagen</b> .....	10
<b>3.6 Rodung von Kurzumtriebsplantagen</b> .....	10
<b>4 Die Biomasseproduktion von Kurzumtriebsplantagen</b> .....	12
<b>4.1 Zielsetzung</b> .....	12
<b>4.2 Methodik</b> .....	12
4.2.1 Ermittlung der Höhenwuchsleistung.....	12
4.2.2 Ermittlung der Biomasseproduktion.....	13
4.2.2.1 Wiegung des aufstockenden Bestandes.....	13
4.2.2.2 Statistische Verfahren zur Massenbestimmung.....	13
<b>4.3 Ergebnisse</b> .....	15
4.3.1 Wöllershof.....	15
4.3.1.1 Erster fünfjähriger Umtrieb 1992 - 1996.....	15
4.3.1.2 Zweiter fünfjähriger Umtrieb.....	18
4.3.1.3 Dritter fünfjähriger Umtrieb.....	21
4.3.1.4 Erster zehnjähriger Umtrieb.....	23
4.3.2 Neuhof.....	26

4.3.3 Beuerberg.....	27
4.3.3.1 Erster fünfjähriger Umtrieb.....	27
4.3.3.2 Zweiter fünfjähriger Umtrieb.....	30
4.3.4 Schwarzenau.....	32
4.3.4.1 Erster fünfjähriger Umtrieb.....	32
4.3.4.2 Zweiter fünfjähriger Umtrieb.....	33
4.3.5 Coburg.....	35
4.3.5.1 Erster fünfjähriger Umtrieb.....	35
4.3.5.2 Zweiter fünfjähriger Umtrieb.....	36
4.3.6 Reisbach.....	38
4.3.7 Dornwang I.....	40
4.3.8 Dornwang II.....	42
4.3.9 Kammern.....	43
<b>4.4 Diskussion.....</b>	<b>45</b>
<b>5. Ernte von Kurzumtriebsplantagen.....</b>	<b>47</b>
<b>5.1 Einführung und Überblick.....</b>	<b>47</b>
5.1.1 Bedeutung der Ernte im Produktionssystem Kurzumtriebsplantage.....	47
5.1.2 Teilmechanisierte Verfahren.....	47
5.1.3 Vollmechanisierte Verfahren.....	48
<b>5.2 Arbeitsstudien.....</b>	<b>51</b>
5.2.1 Zielsetzung.....	51
5.2.2 Material und Methoden.....	52
5.2.3 Untersuchte Erntelinien.....	52
5.2.3.1 Motormanuelles Fällen – Hacken handbeschickt.....	52
5.2.3.2 Motormanuelles Fällen – Hacken kranbeschickt.....	54
5.2.3.3 Motormanuelles Fällen – Vorkonzentrieren – Hacken kranbeschickt.....	55

5.2.3.4 Fäller-Bündler – Rücken – Hacken am zentralen Platz.....	57
5.2.3.5 Gehölmähhäcksler.....	59
5.2.3.6 Motormanuelles Fällen – Rücken – Hacken am zentralen Platz.....	61
5.2.3.7 Harvesterfällung – Rücken – Hacken.....	63
<b>5.3 Ergebnisse.....</b>	<b>64</b>
5.3.1 Motormanuelles Fällen – Hacken handbeschickt.....	64
5.3.2 Motormanuelles Fällen – Hacken kranbeschickt.....	67
5.3.3 Motormanuelles Fällen – Vorkonzentrieren – Hacken kranbeschickt.....	68
5.3.4 Fäller-Bündler – Rücken – Hacken am zentralen Platz.....	71
5.3.5 Gehölmähhäcksler.....	72
5.3.6 Fällen – Rücken – Hacken am zentralen Platz (10-jähriger Umtrieb).....	74
5.3.7 Harvesterfällung – Rücken – Hacken (10-jähriger Umtrieb).....	77
<b>5.4 Diskussion.....</b>	<b>79</b>
<b>6. Die Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen.....</b>	<b>83</b>
<b>6.1 Einführung und Überblick.....</b>	<b>83</b>
<b>6.2 Zielsetzung.....</b>	<b>83</b>
<b>6.3 Die Methodik der Ökobilanzierung.....</b>	<b>84</b>
6.3.1 Aufbau gemäß ISO Norm.....	84
6.3.2 Software und Datengrundlage.....	85
6.3.3 Datenqualität.....	85
<b>6.4 Aufbau der Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen.....</b>	<b>85</b>
6.4.1 Funktionelle Einheit, Untersuchungsrahmen und Parameter.....	85
6.4.2 Die Module der Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen.....	87
6.4.2.1 Modul: Biologische Produktion.....	87
6.4.2.2 Modul: Technische Produktion.....	89

6.4.2.3 Modul: Verbrennung der Hackschnitzel.....	96
6.4.3 Boden-Kohlenstoffhaushalt.....	96
6.4.4 Düngung von Kurzumtriebsplantagen.....	96
6.4.5 Stickstoffaustrag mit dem Sickerwasser.....	102
<b>6.5 Ergebnisse der Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen.....</b>	<b>104</b>
6.5.1 Ergebnisse der Sachbilanz.....	105
6.5.1.1 Energieeinsatz und Energiebilanz des Anbaus und der Ernte von KUP.....	105
6.5.1.2 Energiebilanz bei variiertem Zuwachs.....	112
6.5.1.3 Lachgasemissionen.....	114
6.5.2 Wirkungsbilanz des Anbaus von Kurzumtriebsplantagen.....	116
6.5.2.1 Klimaänderung.....	116
6.5.2.2 Eutrophierung.....	119
6.5.2.3 Abiotischer Ressourcenverbrauch.....	121
6.5.2.4 Humantoxizität.....	122
6.5.2.5 Ozonabbau.....	123
6.5.2.6 Terrestrische Ökotoxizität.....	124
6.5.2.7 Versauerung.....	125
6.5.2.8 Land Use.....	126
6.5.3 Normierung.....	127
6.5.4 Ergebnisse der Sachbilanz der Verbrennung.....	128
6.5.4.1 Energieeinsatz und Energiebilanz bei Verbrennung .....	128
6.5.4.2 Energieeinsatz und Energiebilanz bei Erzeugung von Wärme und Strom.....	130
<b>6.6 Diskussion.....</b>	<b>132</b>
<b>7. Schlussfolgerungen.....</b>	<b>134</b>

<b>8. Zusammenfassung</b> .....	135
<b>9. Abstract</b> .....	138
<b>10. Verzeichnisse</b> .....	140
<b>10.1 Literatur</b> .....	140
<b>10.2 Abbildungen</b> .....	151
<b>10.3 Tabellen</b> .....	157
<b>10.4 Abkürzungen</b> .....	161
<b>11. Anhang</b> .....	163



## 1 Einleitung und Zielsetzung

Seit der Veröffentlichung des Berichtes des Club of Rome Anfang der siebziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts ist die Begrenztheit der fossilen Energieträger in unser Bewusstsein gerückt. Der starke Anstieg der Rohölpreise in den letzten Jahren und der Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) im Jahr 2007 haben neben der Endlichkeit der fossilen Rohstoffe auch die klimatischen Folgen ihrer Nutzung deutlich gemacht.

Diese Tatsachen zeigen inzwischen deutliche Wirkungen auf das politische Handeln. So will die Europäische Union den Anteil an erneuerbaren Energien bis 2020 auf 20 % steigern (EUROPÄISCHE UNION 2007). Auch die Bundesregierung strebt unter Verweis auf die Meseberger Beschlüsse eine deutliche Erhöhung des Bioenergieanteiles am gesamten Primärenergieverbrauch an. Dieser betrug im Jahr 2007 nicht mehr als 4,9 % (BMELV; BMU 2009). Der „Nationale Biomasseaktionsplan für Deutschland“ legt dabei großen Wert auf eine **nachhaltige** Erzeugung der Biomasse (BMELV, BMU 2009).

Die Energiebilanz Bayern weist für die erneuerbaren Energieträger einen Anteil von 10,4 % am Primärenergieverbrauch für das Jahr 2007 aus. Biomasse trägt dazu mehr als zwei Drittel bei (STMWIVT 2009). Sie ist damit vor der Wasserkraft der wichtigste erneuerbare Energieträger in Bayern. Bei Ausschöpfung des technisch nutzbaren Potenzials könnten bis zu 700.000 ha Ackerfläche zur Produktion nachwachsender Rohstoffe genutzt werden. Dies entspricht rund 30 % der bayerischen Ackerfläche (STMELF 2009) und wäre im Vergleich zu heute eine Steigerung um ca. 450.000 ha.

Ein Teil dieser Ackerfläche könnte mit schnellwachsenden Baumarten zur Produktion von Holzhackschnitzeln bestockt werden. Die thermische Nutzung von Holz aus diesen sogenannten Kurzumtriebsplantagen (KUP) lässt nach dem Sondergutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen (SRU 2007) wesentlich höhere Energieerträge erwarten als der Anbau von Energiepflanzen zur Herstellung von Kraftstoffen oder zur Stromerzeugung.

Erfahrungen mit Kurzumtriebsplantagen bestehen in Deutschland seit den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts. Seit 1992 wird an der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) ein langfristiges Projekt bearbeitet, das sich auf neun Versuchsstandorten in Ober- und Unterfranken, Oberbayern, Niederbayern, der Oberpfalz und Schwaben mit Anbau, Wuchsleistung und Ernte sowie den ökologischen Auswirkungen von Kurzumtriebsplantagen beschäftigt. Die Versuchsflächen dieses Projektes befinden sich mittlerweile in der dritten bzw. vierten Rotationsperiode.

Die vorliegende Arbeit basiert vor allem auf den Erfahrungen und Ergebnissen dieses Projekts. Sie beschäftigt sich mit Anbau und Ernte sowie der Biomasseleistung von Kurzumtriebsplantagen unter bayerischen Wuchsbedingungen und mündet in eine Ökobilanzierung der noch neuen Bodennutzungsart.

Folgende Fragestellungen sollen bearbeitet werden:

1. Was sind die Voraussetzungen für den erfolgreichen Anbau einer Kurzumtriebsplantage?
2. Wie hoch ist der mögliche Zuwachs beim Anbau von schnellwachsenden Baumarten in verschiedenen Regionen Bayerns?
3. Welche Ernteverfahren eignen sich unter den Bedingungen unserer kleinstrukturierten Landwirtschaft? Wie hoch ist die Produktivität dieser Erntelinien?
4. Wie stellt sich der Anbau von Kurzumtriebsplantagen unter ökobilanziellen Gesichtspunkten dar und wie könnte die Ökobilanz verbessert werden?
5. Wie sieht der Vergleich der ökologischen Auswirkungen von Kurzumtriebsplantagen mit landwirtschaftlichen Energiekulturen wie Energieweizen, Winterraps, Zuckerrübe und Silomais aus?

Die Arbeit ist anhand der oben genannten Fragestellungen in thematisch abgegrenzte Kapitel mit eigener Methodik, Zielstellung und Ergebnisteil gegliedert.

Nach einer kurzen Vorstellung der Versuchsflächen in Abschnitt 2 stellt Kapitel 3 die Technik des **Anbaus von Kurzumtriebsplantagen** dar. Es beschäftigt sich mit der Wahl des Pflanzverbandes, der Umtriebszeit und zeigt die Möglichkeiten der Rückumwandlung in landwirtschaftliche Nutzung auf.

In Kapitel 4 werden die **Biomasseleistungen** der Versuchsflächen des Projekts zum Teil über mehrere Rotationsperioden dargestellt.

Die **Ernte von Kurzumtriebsplantagen** von motormanuell bis vollmechanisiert ist das Thema des Kapitels 5. Sieben Erntelinien werden anhand von Zeitstudien ausführlich dargestellt und bewertet.

Kapitel 6 stellt die Ergebnisse der **Ökobilanzierung von KUP** dar und zieht einen Vergleich zur Hackschnitzelproduktion im Wald sowie zu landwirtschaftlichen Energiekulturen. Die Auswirkung von Kurzumtriebsplantagen auf den Humushaushalt des Bodens, der Austrag von Nitrat mit dem Sickerwasser und die häufig gestellte Frage nach der Notwendigkeit einer Düngung von KUP werden diskutiert.

## 2 Versuchsflächen

### 2.1 Übersicht

Während der Begründungsphase des Kurzumtriebs-Projekts von 1992 bis 1998 wurden neun Versuchsflächen mit insgesamt ca. 36 Hektar in Bestockung gebracht. Dabei sollten neben den verschiedenen Regionen Bayerns auch eine möglichst breite Palette von Standorten abgedeckt werden.

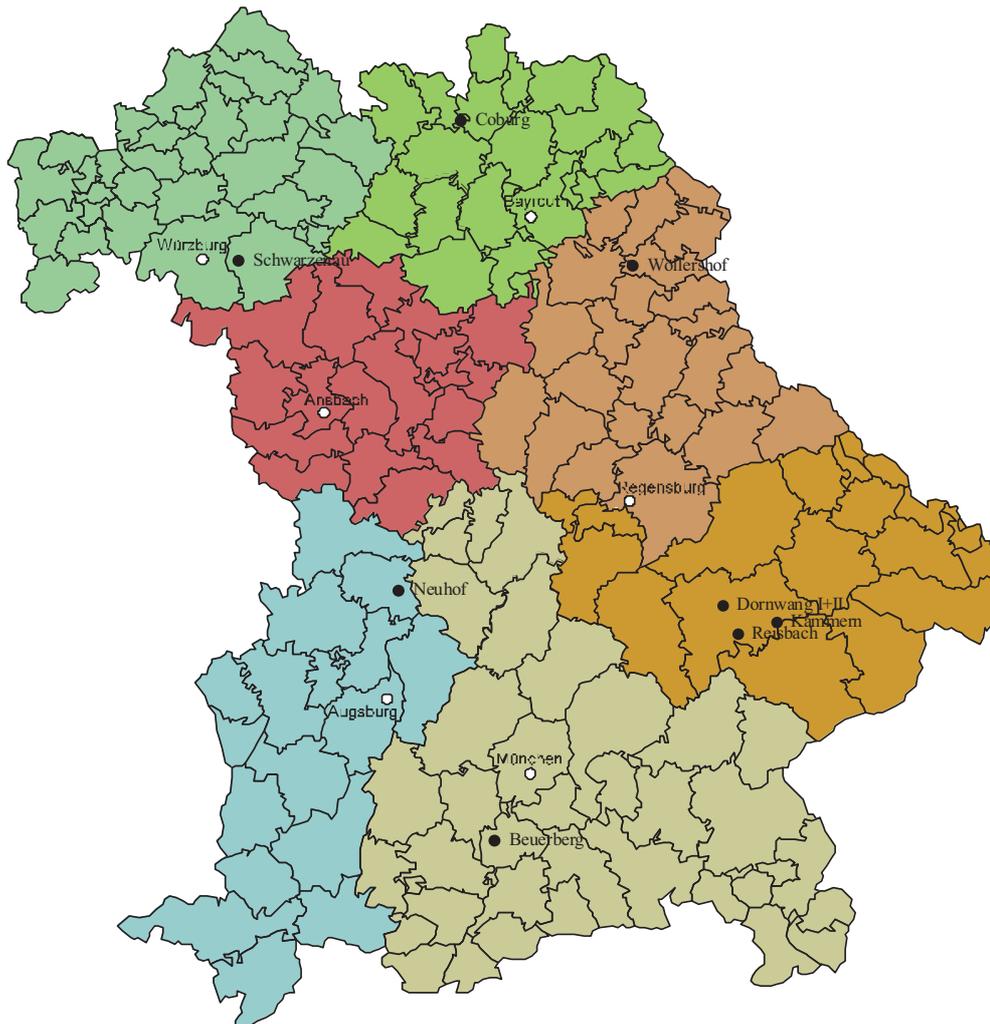


Abbildung 1: Lage der Versuchsflächen in Bayern

Tabelle 1: Übersicht der Versuchsflächen nach Wuchsbezirken

Versuchsfläche	(Teil-)Wuchsbezirk	Höhen über NN m	Mittlere Lufttemperatur ° C	Mittlere Niederschlagshöhen mm
<b>Wöllershof</b>	10.3 Vorderer Oberpfälzer Wald	420 - 440	6,00 - 6,99	650 - 749
<b>Neuhof</b>	6.3 Schwäbische Riesalb	510 - 530	7,00 - 7,99	650 - 749
<b>Beuerberg</b>	14.4/1 Westliche Kalkalpine Jungmoräne	630	7,00 - 7,99	1100-1299
<b>Schwarzenau</b>	4.2/2 Kitzinger Sandgebiet	200	8,00 - 8,99	450 - 549
<b>Coburg</b>	5.4 Itz-Baunach-Hügelland	320	7,00 - 7,99	650 - 749
<b>Reisbach</b>	12.9/2 Östliches Niederbayerisches Tertiärhügelland	440	7,00 - 7,99	750 - 849
<b>Dornwang I</b>	12.9/1 Westliches Niederbayerisches Tertiärhügelland	430	7,00 - 7,99	750 - 849
<b>Dornwang II</b>	12.5 Unteres Isartal	360	7,00 - 7,99	750 - 849
<b>Kammern</b>	12.9/2 Östliches Niederbayerisches Tertiärhügelland	410	7,00 - 7,99	750 - 849

## 2.2 Standortkundliche Beschreibung

### Wöllershof (1992)

Die Versuchsfläche liegt im Landkreis Neustadt a. d. Waldnaab. Sie besteht aus zwei Teilen mit zusammen acht Hektar Fläche. Ausgangsmaterial für die Bodenbildung sind relativ nährstoff- und glimmerreiche Gneise, die grusig-lehmig verwittern. Die Standortseinheit ist zumeist ein mäßig frischer bis frischer sandig-grusiger Lehm. Die Ackermesszahl der beiden Teilflächen liegt bei 30 bzw. 40.

### Neuhof (1993)

Der Versuchsstandort Neuhof umfasst drei Teilflächen von insgesamt zehn Hektar Fläche. Die Bodenbildung erfolgte aus nährstoffreichen quartären Lehmen, die zum Teil von sandigem Riesauswurf geprägt sind. Standortseinheit ist ein mäßig frischer, sandiger Feinlehm mit tonigem Unterboden.

### Beuerberg (1994)

Die 1,15 Hektar große Fläche Beuerberg liegt an einem nach Osten geneigten Hang. Die Geländeausformung ist stark kuppig. Geologisches Ausgangsmaterial ist die Obere Süßwassermolasse, die häufig wechselnden Bodenarten lassen auf eine glaziale Überprägung durch die Grundmoräne schließen. Die hauptsächlich vertretenen Standortseinheiten sind ein

tiefgründiger, frischer bis sehr frischer, feinsandig-toniger Lehm sowie ein schwach wechselfeuchter (sandig-toniger) Lehm.

### **Schwarzenau (1994)**

Der Versuchsstandort Schwarzenau hat eine Fläche von fünf Hektar. Ausgangsmaterial für die Bodenbildung sind quarzreiche Sande über Tonen des Unteren Keuper. Auf der Fläche kommen nur zwei Standortseinheiten vor, ein mäßig trockener Sand und ein mäßig trockener Schichtsand mit einer Tonlage im Unterboden. Unter den gegebenen geologischen und klimatischen Bedingungen (Weinbauklima) stellt Schwarzenau einen Grenzstandort für den Anbau von Kurzumtriebsplantagen dar.

### **Coburg (1995)**

Die Versuchsfläche Coburg, mit fünf Hektar Größe, ist ein ehemaliger Teich, der in den dreißiger Jahren des letzten Jahrhunderts trockengelegt wurde. Die Talverebnung besteht aus einem unterliegenden Feuerlettensockel mit geringmächtigen alluvialen, lehmig-sandigen Sedimentauflagen. Die ehemalige Nutzung als Teich zeigt sich deutlich im bestehenden Profilaufbau: die gesamte Fläche ist relativ stark von Staunässe- und Feuchtemerkmalen geprägt. Haupt-Standortseinheit ist ein wechselfeuchter Ton. Die Fläche war zum Zeitpunkt der Bepflanzung bereits drei Jahre stillgelegt.

## **Versuchsflächen im Landkreis Dingolfing**

### **Reisbach (1997)**

Die Versuchsfläche umfasst eine Fläche von 1,4 Hektar. Ausgangsmaterial für die Bodenbildung sind Lehme aus Löss und Tertiär mit auffallend geringem Humusanteil. Im unteren Teil der Versuchsfläche überwiegt im Oberboden der Löss, der Unterboden besteht aus Tertiär-Material. Mit ansteigendem Gelände Richtung Süden treten Mischlehme aus Löss und Tertiär auf.

### **Dornwang I (1997)**

Die Versuchsfläche ist 1,7 Hektar groß und liegt auf einer tertiären Kuppe aus Lehmen und sandig bis kiesigen Lehmen. Auffällig ist der gering ausgeprägte  $A_h$ -Horizont.

### **Dornwang II (1997)**

Dornwang II, mit einer Größe von 2,4 Hektar, liegt im unteren Isartal. Ausgangsmaterial für die Bodenbildung ist ein Anmoor, das sich im ehemals grundwassernahen Bereich des Isartales gebildet hat. Der anmoorige Horizont ist zwischen 60 und 80 Zentimeter mächtig.

Darunter befindet sich ein schluffiger bis feinschluffiger Horizont aus Auensediment. Das Solum ist im gesamten Bereich stark kalkhaltig.

### **Kammern (1998)**

Der Boden der 1,4 Hektar großen Versuchsfläche ist bis in eine Tiefe von 30 Zentimeter humos. Im unteren Bereich der Versuchsfläche in Bachnähe herrschen Lehme aus Löss und Tertiär vor, mit ansteigendem Gelände überwiegen Tertiär-Lehme, teils mit Löss.

### 3 Begründung, Pflege und Rodung von Kurzumtriebsplantagen

#### 3.1 Baumartenwahl

Für den Anbau von Kurzumtriebsplantagen (KUP) eignet sich eine ganze Reihe von heimischen und eingebürgerten Baumarten. Neben den züchterisch bearbeiteten Schwarzpappeln (*Populus nigra*, *P. deltoides*), Balsampappeln (*P. trichocarpa*, *P. maximowiczii*), Aspen (*P. tremula*, *P. tremuloides*) und der Korbweide (*Salix viminalis*) kommen alle Arten mit einem schnellen Jugendwachstum und gutem Regenerationsvermögen aus dem Stock in Frage wie Robinie (*Robinia pseudoacacia*), Schwarzerle (*Alnus glutinosa*) und Grauerle (*A. incana*). Bei fast allen Anbauten im Bundesgebiet zeigte sich, dass die Klone der Balsampappel (z. T. interspezifische Hybriden mit Schwarzpappel-Anteil) unter mitteleuropäischen Klimabedingungen am besten wuchsen (JUG 1998, FRIEDRICH und HOFMANN 1994). UNSELD (1999) erwähnt gute Wuchsleistungen von Schwarz- und Grauerle auf einem optimalen, z. T. überschwemmten Standort in Baden-Württemberg.

Ein Vorteil von KUP mit Balsampappel, aber auch Weide, ist die Möglichkeit, sie sehr kostengünstig mit Stecklingen (Steckhölzern) zu begründen. Stecklinge sind im Winter gewonnene, auf ca. 20 Zentimeter abgelängte einjährige Triebe.

#### 3.2 Pflanzverband und Umtriebszeit

Die Wahl der Umtriebszeit und des darauf abgestimmten Pflanzverbands ist für die Wuchsleistung einer KUP von ausschlaggebender Bedeutung. Enge Pflanzverbände schöpfen das Potenzial des Standortes zwar aus und zeigen hohe Wuchsleistungen bei niedrigen Umtriebszeiten (UNSELD 1999, RÖHLE et al. 2006), führen aber zu hohen Kosten bei der Bestandsbegründung. Weite Pflanzverbände mit niedrigen Pflanzanzahlen sind kostengünstig, erzielen aber nur bei höheren Rotationen befriedigende Wuchsleistungen.

Ein sehr wichtiger Gesichtspunkt ist die Abstimmung des Pflanzverbandes auf die Erntetechnik, insbesondere wenn eine vollmechanisierte Ernte geplant ist (SCHOLZ et al. 2007). Alle hochmechanisierten Ernteverfahren benötigen bestimmte, nicht zu enge Reihenabstände. Die Vollernter Austoft und Claas Jaguar arbeiten am besten in der Doppelreihe. Der Gehölmähmäcker dagegen ist auf Einzelreihen angewiesen.

FRIEDRICH (1995) gibt einen Pflanzverband von 1,0 \* 0,3 Meter bei zwei- bis dreijähriger Umtriebszeit als Maximum an. Bei diesem extrem dichten Verband ist allerdings bereits im zweiten Umtrieb mit konkurrenzbedingten Stammzahlabgängen zu rechnen. Er empfiehlt bei Umtriebszeiten von fünf bis sieben Jahren Pflanzanzahlen von 5.000 - 8.000 Stück pro Hektar als zuwachsoptimal. Auch österreichische Anbauversuche kommen zu dem Ergebnis, Pappeln

seien nicht für einen extrem kurzen Umtrieb von ein bis drei Jahren geeignet (PELZMANN 1992). Erst im Alter von sieben Jahren werden das Maximum des „Durchschnittlichen Gesamtzuwachses“ (DGZ) und damit die wuchsoptimale Umtriebszeit erreicht. UNSELD (1999) kommt bei seiner Untersuchung mit dem Balsampappelklon Max 3 zum gleichen Ergebnis. HOFMANN (2005) gibt für die Balsampappel eine wuchsoptimale Umtriebszeit von 11 bis 13 Jahren an.

Auf den ersten Versuchsflächen des bayerischen Projekts wurde im fünfjährigen Umtrieb ein einheitlicher Pflanzverband von 2,5 \* 0,6 Meter gewählt, was einer Pflanzendichte von ca. 6.600 Stück pro Hektar entspricht. Für die zehnjährige Umtriebszeit wurde der Abstand in der Reihe auf 1,2 Meter verdoppelt. Nach einigen Jahren zeigte sich jedoch, dass der sehr weite Reihenabstand von 2,5 Meter das Aufkommen konkurrenzstarker Gräser (v. a. *Agropyron repens*) begünstigte. Bei Anlage des Versuchsstandortes Coburg wurde deshalb ein von FRIEDRICH (1995) empfohlener Doppelreihenverband gewählt. Der Abstand zwischen den Doppelreihen beträgt zwei Meter, der Abstand innerhalb der Doppelreihe 0,75 Meter und der Pflanzabstand 0,8 Meter. Das auf der vormals stillgelegten Fläche schnell auflaufende Gras konnte allerdings durch den verringerten Reihenabstand nicht ausgedunkelt werden. Die Folge davon war ein schwacher Wuchs der Bäume während der gesamten ersten Umtriebszeit. Für drei Versuchsflächen im Raum Dingolfing wurde deshalb ein noch engerer Reihenabstand von 1,5 Meter gewählt und der Abstand von 0,8 Meter in der Reihe beibehalten, entsprechend einer Pflanzenzahl von 8.300 Stück pro Hektar. Die letzte Versuchsfläche des Projekts wurde mit einem Pflanzverband von 1,0 \* 0,8 Meter begründet. Die mit einem Reihenabstand von 1,5 bzw. 1,0 Meter begründeten Flächen zeigten z. T. bereits während der ersten Umtriebszeit gute Wachstumsleistungen.

### **3.3 Vorbereitende Maßnahmen**

Kurzumtriebsplantagen mit Balsampappel oder Weide werden in der Regel mit Stecklingen begründet. Wegen der noch nicht verholzten frischen Triebe reagieren diese im ersten Jahr aber empfindlich gegenüber der auf landwirtschaftlichen Flächen meist konkurrenzstarken Begleitvegetation. Eine optimale Bodenvorbereitung ist deshalb die wichtigste Voraussetzung für eine Stecklingspflanzung.

Als vorbereitende Maßnahmen haben sich bewährt (DÖHRER 1995a, FRIEDRICH 1995, KTBL 2006, SCHOLZ et al. 2008):

- Behandlung der Fläche mit einem Totalherbizid im Herbst vor der Pflanzung, falls eine Begleitvegetation vorhanden ist (z. B. bei stillgelegten Flächen)
- Anschließend wird die Fläche auf ca. 25 Zentimeter Tiefe gepflügt

- Eggen der Fläche vor der Absteckung im Frühjahr
- Ausbringung eines Voraufmittels (4 l/ha) kurz nach dem Einbringen der Stecklinge

Die geschilderten Maßnahmen halten die Begleitvegetation etwa sechs Wochen zurück, so dass die Stecklinge ungehindert austreiben und die Kultur sich entwickeln kann.



Abbildung 2: Kurzumtriebsplantage Kammern Anfang Juni 1998

Abbildung 2 zeigt eine Aufnahme der Versuchsfläche Kammern, die wie oben beschrieben behandelt wurde. Noch sechs Wochen nach der Begründung des Bestandes konnte sich neben den angebauten Pappeln keine Begleitvegetation entwickeln.



Abbildung 3: Kurzumtriebsplantage Kammern Mitte Juli 1998

Wiederum sechs Wochen später hat sich die Kultur etabliert, die Pappeln stehen über der nun auflaufenden Begleitvegetation (Abbildung 3).

### **3.4 Kulturbegründung**

Je nach Struktur und Größe der zu begründenden Fläche wird entweder manuell, durch Eindrücken der Stecklinge in den vorbereiteten weichen Boden (evtl. mit einem Steckeisen) oder maschinell gepflanzt. Für die maschinelle Pflanzung bewährten sich modifizierte Forst-Pflanzmaschinen (FRIEDRICH 1995). In Dänemark wurde eine spezielle Stecklings-Pflanzmaschine namens Woodpecker 601 entwickelt. Sie setzt vier Reihen auf einmal und eignet sich besonders für die Pflanzung von Weidenstecklingen.

Auf den bayerischen Versuchsflächen wurden Arbeitsstudien mit einer leichten österreichischen Pflanzmaschine durchgeführt. Die Maschine ist als Anbaugerät an einen kleineren Traktor konzipiert und arbeitet zweireihig. Auf dem Sandboden der Versuchsfläche Schwarzenau erreichte sie bei einer Pflanzdichte von 6.600 Stück pro Hektar eine Leistung von circa 1.200 Stecklingen in der Stunde.

### **3.5 Pflege von Kurzumtriebsplantagen**

Stellt sich trotz der in Kapitel 3.3 beschriebenen Maßnahmen ein die Kultur gefährdender Konkurrenzdruck durch die Begleitvegetation ein, so muss diese mechanisch oder chemisch bekämpft werden. Versuche zu einer effektiven Pflege von Balsampappel-KUP wurden von HANDLER und BLUMAUER (2008) durchgeführt. Am besten arbeitete ein Rübenhackgerät am Heck eines Traktors mit 50 KW Leistung.

Eine Alternative ist die Ausbringung eines Nachauflaufmittels mit einer Anbaufeldspritze, ebenfalls an einem Traktor mit 50 KW Leistung. Hier besteht aber die Gefahr, dass auch die Kultur in Mitleidenschaft gezogen wird. Umfangreiche Praxistests zur Herbizidverträglichkeit von Balsampappeln stehen bis jetzt noch aus.

### **3.6 Rodung von Kurzumtriebsplantagen**

Aus der Bewirtschaftung von Niederwäldern weiß man, dass die Wiederausschlagsfähigkeit der Stöcke zeitlich begrenzt ist. Die maximal mögliche Nutzungsdauer einer Kurzumtriebsplantage ist nicht bekannt, sie hängt von der Rotationslänge, von den angebauten Klonen und von der Pfléglichkeit des Ernteverfahrens ab. Doch wird die nachlassende Ausschlagsfähigkeit der Stöcke entweder die Neubegründung der Plantage oder die Rückführung in landwirtschaftliche Nutzung notwendig machen.

Soll eine Kurzumtriebsplantage wieder in landwirtschaftliche Nutzung überführt werden, so ist neben dem Abtrieb der oberirdischen Biomasse auch ein Zerschlagen der Wurzeln notwendig, um ein Wiederaustreiben zu verhindern.

Bewährt hat sich auf den bayerischen Versuchsflächen ein zweistufiges Arbeitsverfahren. In einem ersten Arbeitsgang wird die Fläche mit einem Schlegelmulcher fein gemulcht. Anschließend kommt eine Spezial-Rodungsfräse zum Einsatz, die den Boden in einer Tiefe von 35 Zentimetern komplett fräst. Dieses Verfahren wird auch von BECKER und WOLF (2009) favorisiert. Sie geben einen Kostenrahmen zwischen 1.800 und 2.500 Euro pro Hektar an.

Eine Alternative dazu ist ein zweimaliges Fräsen: im ersten Durchgang wird die Fläche mit der Rodungsfräse voran oberflächlich gefräst. Das Tieffräsen erfolgt in einem zweiten Arbeitsgang mit der Rodungsfräse nachlaufend.

WIPPERMANN (1999) beschreibt ein in Hessen angewendetes Verfahren mit umgekehrter Reihenfolge. Dort wurde im ersten Arbeitsgang eine Rodungsfräse zum Zerschneiden und Zerreißen der Wurzelstöcke eingesetzt. Im zweiten Durchgang erfolgte eine vollflächige Bearbeitung des aufgerissenen Bodens mit einem Mulcher. Die nachfolgenden Feinarbeiten wurden mit Pflug, Grubber und Scheibenegge durchgeführt. WIPPERMANN (1999) empfiehlt daran anschließend eine Einsaat von Phacelia zur Bodendeckung.

GROBE (2009) stellt ebenfalls ein zweistufiges Verfahren mit Rodungsfräse und anschließendem Eggen oder Grubbern der Fläche dar. Er empfiehlt außerdem die Bestellung des Feldes mit einer für das Umsetzen der verbliebenen Holzreste förderlichen Fruchtart, wie z. B. Mais. Die Kosten beziffert GROBE (2009) auf durchschnittlich 1.400 Euro pro Hektar.

## **4 Biomasseproduktion von Kurzumtriebsplantagen**

### **4.1 Zielsetzung**

Die wichtigste Frage beim Anbau von schnellwachsenden Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen ist die nach der Höhe der produzierten Biomasse in Tonnen absolut trockener Biomasse (t atro). In jedem Winter wurde auf den Versuchsflächen deshalb die jährliche Höhenwuchsleistung der Bäume ermittelt, um die Wuchsdynamik der Bestände zu dokumentieren. Nach Abschluss der Umtriebszeit von fünf und zehn Jahren erfolgte eine Massenermittlung auf den Versuchsflächen. Ziel war die Ermittlung der leistungsfähigsten Baumarten, Sorten und Klone, aber auch die Darstellung der für ein gutes Wachstum notwendigen standörtlichen Bedingungen.

In bisherigen Untersuchungen zum Thema Kurzumtrieb wird der Zuwachs an oberirdischer Biomasse in Tonnen absolut trocken pro Hektar und Jahr (t atro/ha\*a) angegeben (z. B. FRIEDRICH 1999, UNSELD 1999). Um die gewonnenen Daten vergleichbar zu machen, wird in den folgenden Ausführungen ebenso diese Bezugsbasis verwendet.

### **4.2 Methodik**

#### **4.2.1 Ermittlung der Höhenwuchsleistung**

Zur Darstellung des Wuchsverlaufes der Bäume während der Umtriebszeit wurde in jedem Jahr in der vegetationslosen Zeit die Durchschnittshöhe ermittelt. Um repräsentative Daten zu erhalten und gleichzeitig den Erhebungsaufwand zu begrenzen, erfolgte die Höhenmessung mit einer systematischen 25-Prozent-Stichprobe, d. h. der Messung jeder vierten Reihe.

#### **Statistische Tests zur Feststellung von signifikanten Unterschieden im Höhenwuchs**

Nach Abschluss der Umtriebszeit wurden die auf den Versuchsflächen ermittelten Endhöhen mit Hilfe eines statistischen Verfahrens auf signifikante Unterschiede zwischen den Baumarten und Klonen getestet. Zunächst wurde geprüft, welche Verfahren bei der vorhandenen Datenstruktur überhaupt zulässig und im Sinne der Fragestellung geeignet erscheinen. Eine Varianzanalyse konnte nicht durchgeführt werden, da in den Untergruppen (Baumarten, Klone) keine Varianzhomogenität vorlag. Auch eine Normalverteilung war nicht bei allen Kollektiven gegeben, weshalb mit leichten Verzerrungen der statistischen Kenngrößen zu rechnen war. Durchgeführt wurde deshalb ein T-Test mit einer Korrektur der Irrtumswahrscheinlichkeit nach BONFERRONI (DUNN). Die Korrektur war notwendig, da nicht nur paarweise getestet wurde, sondern in einem multiplen Mittelwertvergleich alle Baumarten und Klone miteinander verglichen wurden.

Die Ergebnisse der T-Tests sind in Kapitel 4.3 in Tabellenform dargestellt. Jeder Baumart und jedem Klon wird in der Tabelle mindestens ein Buchstabe zugeordnet. Bei Baumarten und Klone mit den gleichen Buchstaben bestehen **keine** signifikanten Unterschiede im Höhenwachstum. Baumarten/Klone mit mehreren Buchstaben weisen **keine** signifikanten Unterschiede zu allen Prüfgliedern mit denselben Buchstaben auf. Als Irrtumswahrscheinlichkeit wurde  $\alpha = 5$  Prozent gewählt.

### 4.2.2 Ermittlung der Biomasseproduktion

Nach Erreichen der Umtriebszeit bei fünf bzw. zehn Jahren wurde eine Ermittlung der atro Masse des aufstockenden Bestandes notwendig. Dies kann durch Wiegen ganzer Parzellen oder durch statistische Verfahren erfolgen.

#### 4.2.2.1 Wiegen des aufstockenden Bestandes

Die einfachste Methode zur Feststellung der zugewachsenen Biomasse ist das Wiegen der gesamten in den Versuchspartellen stehenden Biomasse. Die Bäume werden gefällt, gebündelt und unmittelbar danach mit einer an die Gabel eines Traktors angehängten Waage gewogen. Anschließend werden einige Bäume gehackt. Daraus zieht man eine Hackschnitzelprobe, die im Trockenschrank bei  $103\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis zur Massenkonstanz getrocknet wird (ÖNORM 1998). Rechnet man nun den für eine Parzelle ermittelten Wert auf einen Hektar hoch, so kann die Massenleistung in Tonnen absolut trockener Biomasse pro Jahr und Hektar ( $t\text{ atro/ha}\cdot a$ ) angegeben werden. Die Methode hat den Vorteil wahre Werte zu liefern, ist allerdings sehr aufwändig. Sie wurde deshalb nur bei der ersten Beerntung von Teilflächen der Versuchsstandorte Beuerberg, Schwarzenau und Coburg durchgeführt.

#### 4.2.2.2 Statistische Verfahren zur Massenbestimmung

Soll die aufstockende Biomasse am stehenden Bestand gemessen werden, so muss auf Stichprobenverfahren zurückgegriffen werden.

Zwei **Probestammverfahren** wurden zur Massenermittlung angewandt. Bei den Probestammverfahren wird die Bestandesmasse mit Hilfe von ausgewählten Bäumen (Probestämme) berechnet. Diese stellen Modellbäume dar und können als Repräsentanten des Bestandes gelten (PRODAN 1965, KRAMER & AKCA 1995).

Bei der ersten Massenermittlung der Versuchsfläche Wöllershof wurde ein Verfahren angewandt, das sich am **Grundflächenmittelstamm** orientierte. Nach PRODAN (1965) liegt der Grundflächenmittelstamm nahe am Massenmittelstamm. Auf der Versuchsfläche wurden zunächst mittels Vollaufnahme BHD und Höhe der Bäume erhoben. Dann wurde mit der Formel

$$d_g = \sqrt{\frac{\sum n_i \cdot d_i^2}{N}}$$

(KRAMER und AKCA 1995),

wobei  $d_g$  = der wahre Wert des Durchmessers des Grundflächenmittelstammes,

$n_i$  = die Stammzahl der jeweiligen Parzelle,

$d_i$  = der Durchmesser (BHD) bzw. Mittelwert des Durchmessers der Parzelle und

$N$  = die Stammzahl der jeweiligen Parzelle sind,

der Durchmesser des Grundflächenmittelstammes  $d_g$  parzellenweise errechnet. Ausgehend von diesem Durchmesser wurden dann in jeder Parzelle alle Stämme gesucht, deren BHD nahe am  $d_g$  lagen.

Mit Hilfe dieses Kollektivs wurde die Höhe des Grundflächenmittelstamms über eine lineare Regression mit dem logarithmierten BHD ermittelt, d.h.

$$h_g = A + B \cdot \ln d_g$$

(KRAMER und AKCA 1995),

wobei  $h_g$  = die Höhe des Grundflächenmittelstammes der jeweiligen Parzelle,

$A$  = die Regressionskonstante (Achsenabschnitt),

$B$  = die Steigung der Regressionsgerade und

$\ln d_g$  = der natürliche Logarithmus von  $d_g$  sind.

In einem zweiten Schritt wurden nun aus dem ersten Kollektiv alle Stämme ausgesucht, deren Höhe möglichst nahe bei  $h_g$  lag. Somit resultierte ein neues Kollektiv von Probebäumen, deren arithmetische Mittel von BHD und Höhe sehr nahe bei  $d_g$  und  $h_g$  lagen. Sie repräsentieren hinsichtlich beider Variablen den Grundflächenmittelstamm. Diese Bäume wurden mit der jeweiligen Reihen- und Baumnummer parzellenweise auf Formblättern dokumentiert, im Bestand aufgesucht, dort nochmals vermessen und nach der Fällung gewogen. In jeder Parzelle wurde eine Hackschnitzelprobe entnommen und deren Wassergehalt durch Trocknung bei 103 ° C bis zur Massenkonstanz bestimmt. Auf diese Weise konnte der jährliche Zuwachs in t atro/ha\*a geschätzt werden.

Das zweite Probestammverfahren war das **Massenlinienverfahren** von KOPETZKY-GERHARDT (KRAMER & AKCA 1995). Das Massenlinienverfahren basiert auf der linearen Beziehung zwischen dem Volumen  $v$  und der Grundfläche  $g$ . Da die Masse  $m$  über die Holzdicke linear mit dem Volumen  $v$  zusammenhängt, kann die Beziehung auch zur direkten Ermittlung der Masse aus der Grundfläche  $g$  mittels Regression herangezogen werden. Die über die Grundfläche aufgetragenen Massen ( $m$ ) einzelner Bäume werden durch eine Gerade  $m = A + B * g$  ausgeglichen. Über diese „Massenlinie“ lässt sich die Masse des Grundflächenmittelstammes (=Massenmittelstamm ( $m_m$ )) mit folgenden Arbeitsschritten herleiten:

Die Masse des Grundflächenmittelstammes  $m_m$  erhält man durch Einsetzen der mittleren Grundfläche der Parzelle  $\bar{g}_{voll}$  nach erfolgter Vollklappung in die Regressionsgleichung

$$m_m = A + B * \bar{g}_{voll}.$$

Multipliziert man die Masse des Grundflächenmittelstammes mit der Anzahl der Bäume ( $N$ ), ergibt sich die Gesamtmasse der Parzelle  $M_{ges}$

$$M_{ges} = m_m * N.$$

Das Massenlinienverfahren hat den Vorteil, dass nicht bestimmte Bäume pro Parzelle aufgesucht werden müssen, sondern nach Vollklappung der betreffenden Parzelle lediglich eine systematische Stichprobe mit 15 - 20 Bäumen durchgeführt wird und die betreffenden Bäume vermessen und gewogen werden. Aus jeder Parzelle werden wie im erstgenannten Verfahren Hackschnitzelproben entnommen und bei 103 ° Celsius bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, um die Biomasseproduktion der angebauten Baumarten und Klone in t atro/ha\*a zu ermitteln.

Das Verfahren erwies sich als weniger aufwändig als das erstgenannte Grundflächenmittelstammverfahren und wurde im Vorfeld von allen weiteren Erntemaßnahmen durchgeführt.

## 4.3 Ergebnisse

### 4.3.1 Wöllershof

#### 4.3.1.1 Erster fünfjähriger Umtrieb 1992 - 1996

Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der Durchschnittshöhe der Baumarten und Klone im ersten Umtrieb. Die Aspensorte Münden erreicht mit sieben Metern die größten Durchschnittshöhen. Der Wuchs war im Gegensatz zu den Erwartungen relativ schwach. Die Gründe hierfür lagen in den Schwierigkeiten bei der Begründung der Versuchsfläche und in

Anbaufehlern. Wegen der fehlenden Aufforstungsgenehmigung konnte die Fläche erst im Mai 1992 bei sehr hohen Temperaturen begründet werden. Auf den Einsatz von Herbiziden wurde in Wöllershof verzichtet. Bei dem Pflanzverband von 2,5 \* 0,6 Meter war der Reihenabstand viel zu groß, so dass die Bäume in den ersten Jahren nicht in der Lage waren, den Lichtraum zwischen den Reihen abzudunkeln. Die sofort nach dem Abstecken der Parzellen auflaufende Begleitvegetation, die im Laufe der Jahre immer mehr von der Quecke dominiert wurde, bildete während des ersten Umtriebs eine starke Nährstoff- und Wasserkonkurrenz und beeinträchtigte den Wuchs der Bäume stark. Interessanterweise nahmen die Höhenzuwächse bei Balsampappeln und Aspen in den Jahren 1995 und 1996 zu. Dies deutet darauf hin, dass sich das Wurzelwerk der Bäume erst zu diesem Zeitpunkt etabliert hatte.

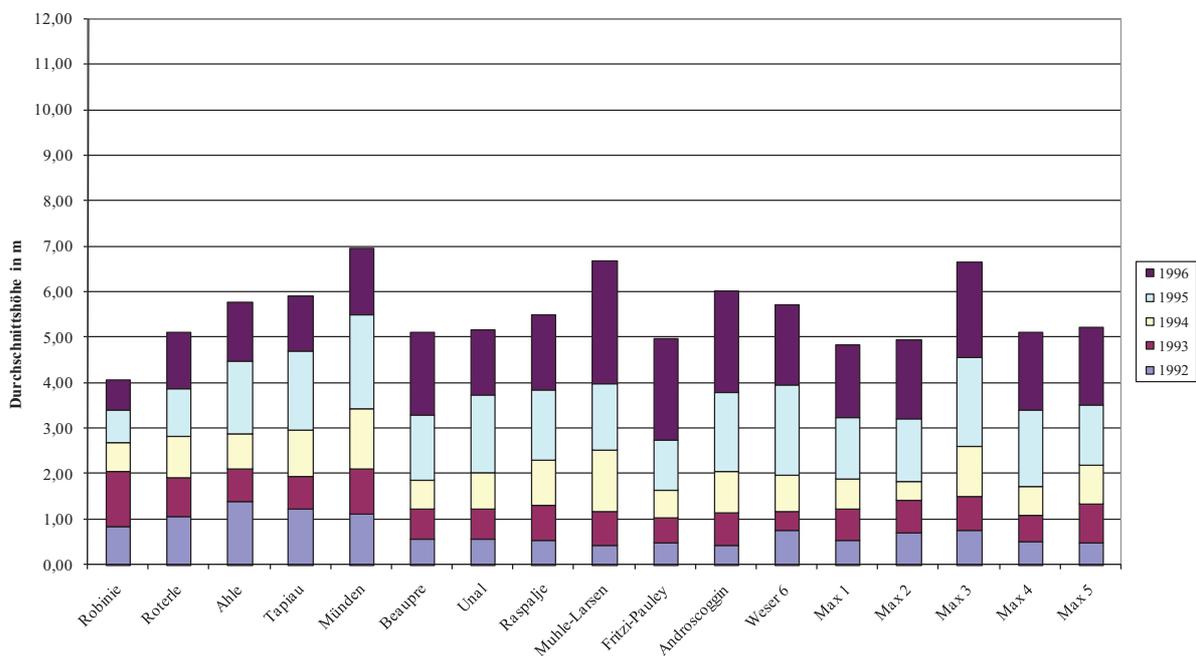


Abbildung 4: Entwicklung der Durchschnittshöhe von Robinie, Roterle, der Aspensorten Ahle, Tapiiau und Münden sowie von zwölf Klonen der Balsampappel, Versuchsfläche WÖLLERSHOF, 1. fünfjähriger Umtrieb 1992 - 1996

Auch die Darstellung der Massenleistung in Abbildung 5 zeigt den schwachen Wuchs der Versuchsfläche während des ersten Umtriebs. Nur die Balsampappel Max 3 leistete eine Biomasseproduktion von mehr als vier t atro/ha\*a. Die Aspensorte Münden kommt auf über drei Tonnen, der Rest produzierte eine bis drei Tonnen Trockenmasse.

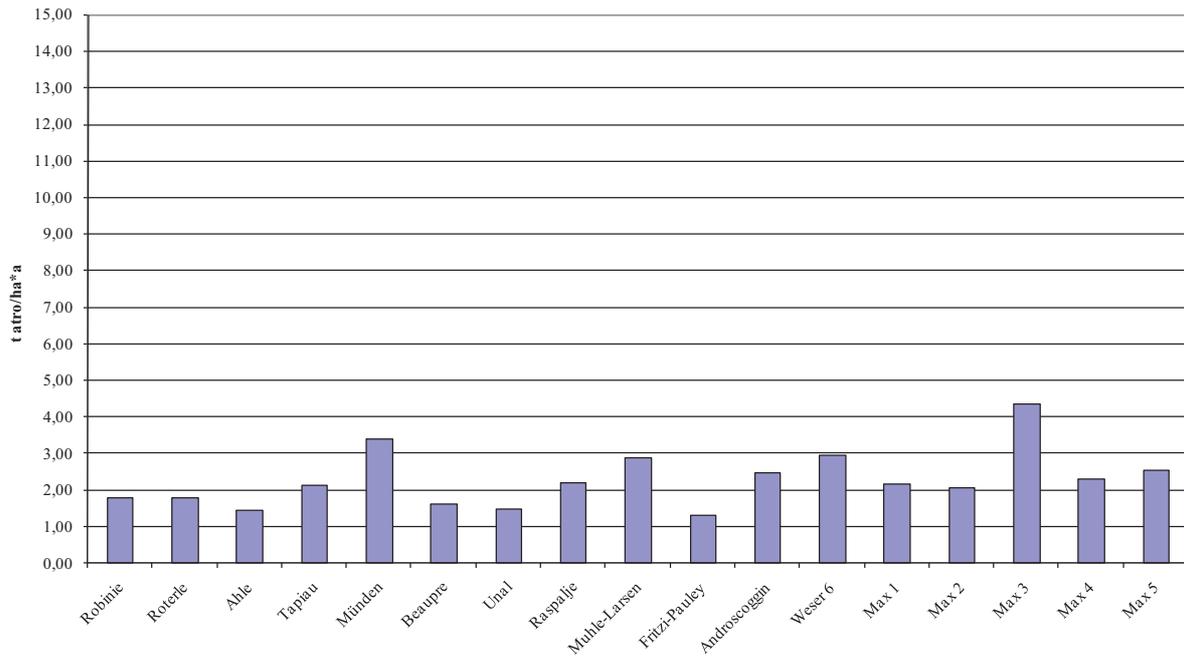


Abbildung 5: Massenleistung von Robinie, Roterle, der Aspensorten Ahle, Tapiou und Münden sowie von zwölf Klonen der Balsampappel, Versuchsfläche Wöllershof, 1. fünfjähriger Umtrieb, 1992 - 1996

### Prüfung auf signifikante Wuchsunterschiede: Ergebnisse der T-Tests

Tabelle 2: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum der Stecklingskultur, Wöllershof, 1. fünfjähriger Umtrieb 1992 - 1996

Baumart/Klon	Bonferroni-Gruppen	Durchschnittshöhe in m
Muhle-Larsen	A	6,7
Max 3	A	6,7
Androscoggin	B	6,0
Weser 6	B	5,7
Raspalje	D	5,5
Max 5	D	5,2
Unal		5,2
Max 4	F	5,1
Beupre	F	5,1
Fritzi-Pauley	F	5,0
Max 2	F	4,9
Max 1	F	4,8

Tabelle 2 zeigt die signifikanten Wuchsunterschiede innerhalb des Balsampappel-Kollektivs. Für die statistische Auswertung musste die mit Stecklingen begründete Balsampappelkultur

von den gepflanzten Aspen, Roterlen und Robinien getrennt werden, da diese im Pflanzjahr bereits einen Wuchsvorsprung hatten. Die Tabelle verdeutlicht, dass Muhle-Larsen und Max 3 eine signifikant unterschiedliche Höhenwuchsleistung aufwiesen als alle anderen Balsampappeln in Wöllershof. Der Klon Max 5 ist mit den Buchstaben D und E versehen, d. h. es bestanden in den Jahren 1992 bis 1996 signifikante Wuchsunterschiede zu Muhle-Larsen, Max 3, Androscoggin, Weser 6 (weder D noch E zugeordnet) und zu Max 1 (ebenfalls weder D noch E zugeordnet).

Tabelle 3: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum der gepflanzten Aspen, Roterlen und Robinien, Wöllershof, 1. fünfjähriger Umtrieb 1992 - 1996

Baumart/Klon	Bonferroni Gruppe	Durchschnittshöhe in m
Münden	A	7,0
Tapiau	B	5,9
Ahle	B	5,8
Roterle	C	5,1
Robinie	D	4,1

Tabelle 3 verdeutlicht den überlegenen Höhenwuchs der Aspensorte Münden im Vergleich zu allen anderen gepflanzten Baumarten.

Die Darstellung der T-Test-Ergebnisse zeigt, dass Max 3 und Münden, die in Abbildung 5 die größte Biomasseproduktion erzielten, im Höhenwuchs signifikante Unterschiede zu den meisten anderen Prüfgliedern aufwiesen.

#### 4.3.1.2 Zweiter fünfjähriger Umtrieb

Während des zweiten Umtriebs fielen die vom Pappelblattrost (*Melampsora larici-populina*) befallenen Balsampappeln Beaupré, Raspalje und Unal komplett aus. Der Wiederaustrieb der Robinie wurde durch das Rehwild verhindert. Die Darstellung der im zweiten Umtrieb erreichten Mittelhöhen (Abbildung 6) zeigt ein völlig anderes Bild als nach den ersten fünf Jahren. Die Roterle erreichte eine Durchschnittshöhe von neun Metern. Am schwächsten schnitt die Aspensorte Ahle mit gut acht Metern ab. Alle anderen Aspen und Balsampappeln erreichten Durchschnittshöhen von ca. zehn Metern. Auffällig ist die gleichmäßige Höhenentwicklung über die gesamte Umtriebszeit.

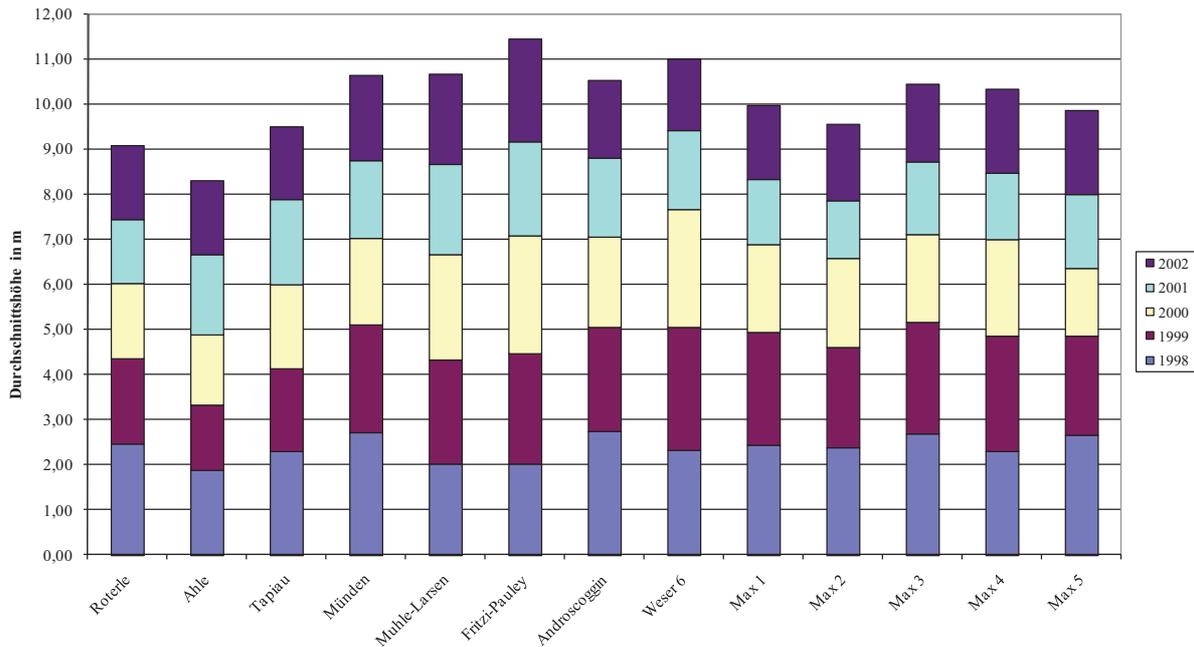


Abbildung 6: Entwicklung der Durchschnittshöhe von Roterle, der Aspensorten Ahle, Tapiau und Münden sowie von neun Balsampappel-Klonen, Versuchsfläche Wöllershof, 2. fünfjähriger Umtrieb 1998 - 2002

Der Unterschied zum ersten Umtrieb wird noch deutlicher, wenn man die Darstellung der Biomasseproduktion in Abbildung 7 betrachtet. Die Aspensorte Ahle mit dem schwächsten Zuwachs des Kollektivs von knapp über sechs t atro/ha\*a liegt deutlich über der besten Balsampappel der ersten Rotation. Die Roterle erreicht knapp sieben Tonnen Zuwachs, die Balsampappel Muhle-Larsen knapp acht Tonnen. Alle anderen Aspen und Balsampappeln liegen in einem Bereich von knapp zehn bis 13 Tonnen. Den Spitzenwert erreicht Weser 6 mit über 13 t atro/ha\*a. Die Gründe für den im Vergleich zum ersten Umtrieb drei- bis vierfachen Massenzuwachs liegen in der Wuchsstimulation durch die Ernte und in dem bereits gut entwickelten Wurzelsystem der Bäume. Die in Abbildung 7 dargestellten Zuwächse des zweiten Umtriebs verdeutlichen die Leistungskraft des Standortes Wöllershof.

Zu denselben Ergebnissen kommt auch JUG (1999) bei Untersuchungen auf der hessischen Versuchsfläche Canstein. Dort zeigten Aspen und Balsampappeln in der zweiten Umtriebszeit den dreifachen Zuwachs des ersten Umtriebs. Die Weide verbesserte sich sogar um den Faktor vier.

## Biomasseproduktion von Kurzumtriebsplantagen

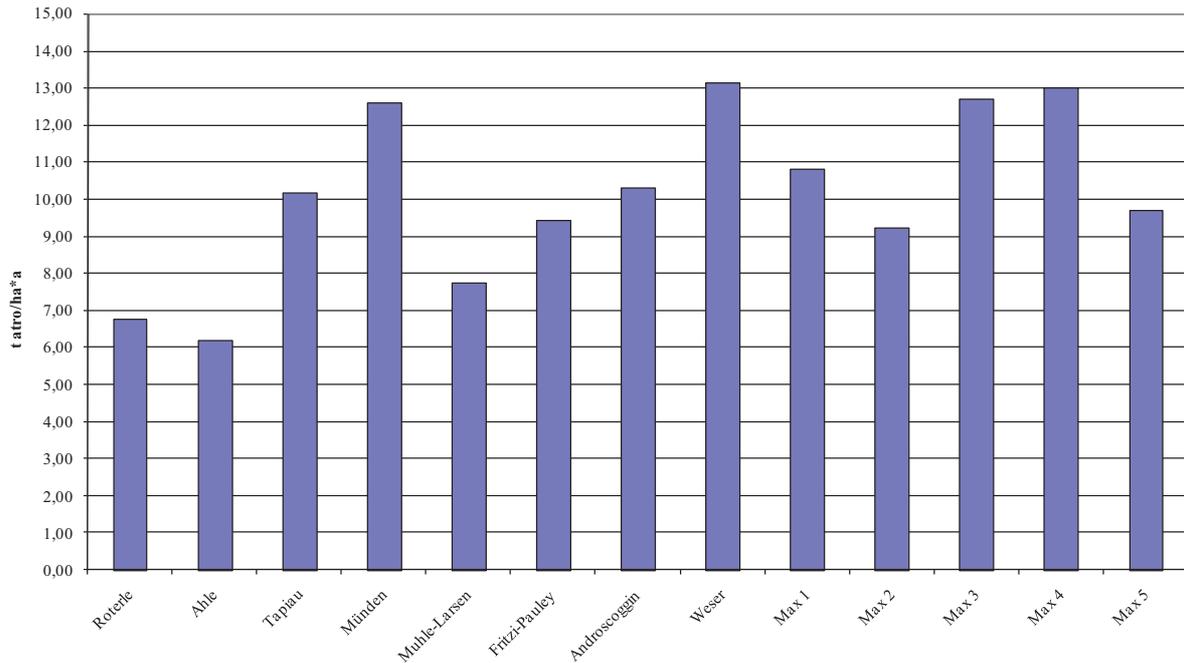


Abbildung 7: Massenleistung von Roterle, der Aspensorten Ahle, Tapiau und Münden sowie von neun Balsampappel-Klonen, Versuchsfläche Wöllershof, 2. fünfjähriger Umtrieb 1998 - 2002

### Prüfung auf signifikante Wuchsunterschiede: Ergebnisse der T-Tests

Tabelle 4: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum, Wöllershof, 2. fünfjähriger Umtrieb 1998 - 2002

Baumart/Klon	Bonferroni Gruppen		Durchschnittshöhe in m	
Fritzi-Pauley		A	11,4	
Weser 6	B	A	11,0	
Muhle-Larsen	B		10,7	
Münden	B	C	10,6	
Androscoggin	B	C	D	10,5
Max 3	B	C	D	10,4
Max 4	B	C	D	10,3
Max 1	E	C	D	10,0
Max 5	E		D	9,9
Max 2	E	F		9,5
Tapiau	E	F		9,5
Roterle		F		9,1
Ahle		G		8,3

Nach Abschluss des zweiten fünfjährigen Umtriebs konnten in Wöllershof, bedingt durch die kahlschlagartige Nutzung und die damit identischen Ausgangsbedingungen beim

Wiederaustrieb, alle Baumarten bzw. Klone miteinander verglichen werden. Tabelle 4 zeigt das Ergebnis. Die Balsampappel Fritzi-Pauley wies signifikante Unterschiede im Höhenwachstum zu allen anderen Prüfgliedern auf, mit Ausnahme der Balsampappel Weser 6. Bei Weser 6 beginnen schon die Überschneidungen, die bis hinunter zum Klon Max 4 reichen.

#### 4.3.1.3 Dritter fünfjähriger Umtrieb

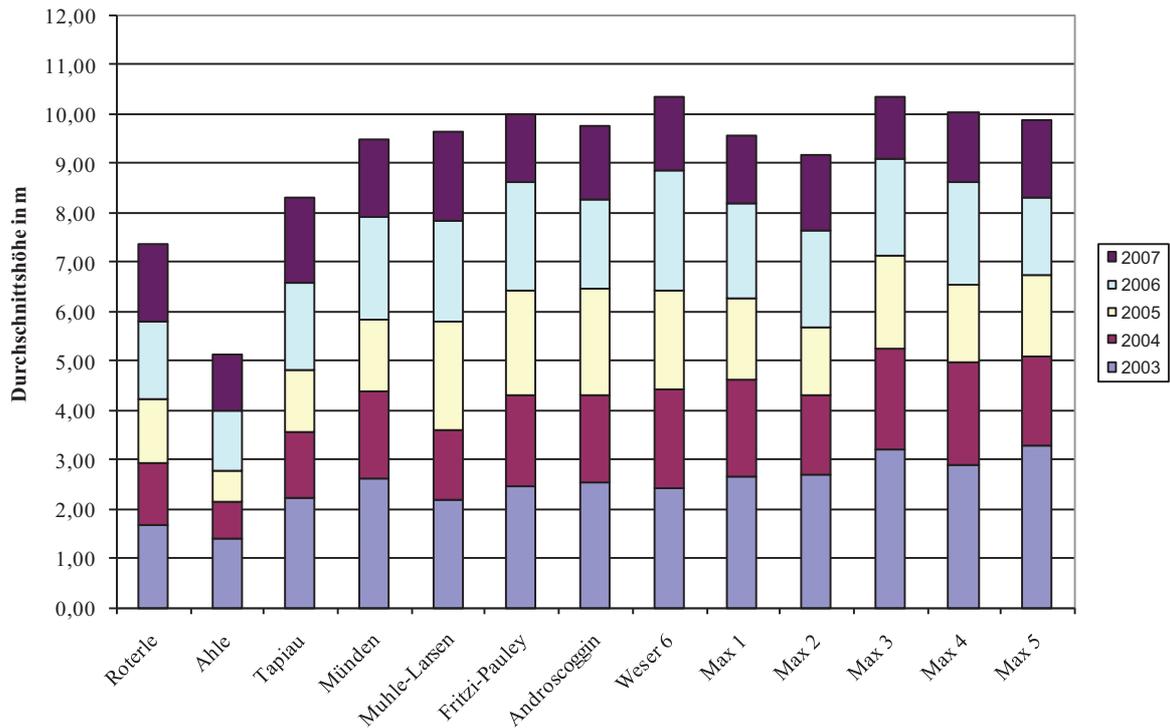


Abbildung 8: Entwicklung der Durchschnittshöhe von Roterle, der Aspen Ahle, Tapiau und Münden sowie von neun Klonen der Balsampappel, Versuchsfläche Wöllershof, 3. fünfjähriger Umtrieb, 2003 - 2007

Die Entwicklung der Durchschnittshöhe im dritten Umtrieb ähnelt der im zweiten sehr. Die Aspensorte Ahle erreichte mit gut fünf Metern die geringste Höhe, gefolgt von der Roterle und der Aspe Tapiau mit über acht Metern sowie der Balsampappel Max 2 mit etwas über neun Metern. Der Rest des Kollektivs erreichte mittlere Höhen von ca. zehn Meter (Abbildung 8). Wieder zeigen die meisten der angebauten Baumarten und Klone eine relativ gleichmäßige Entwicklung der Durchschnittshöhe über die gesamte Umtriebszeit.

Bei der Masseleistung fällt auf, dass Roterle und Aspen im Vergleich zu den Balsampappeln zurückgefallen sind (Abbildung 9). Die neun Balsampappel-Klone zeigen ein ähnliches Bild wie im zweiten Umtrieb. Das Spektrum reicht von acht Tonnen Zuwachs bei den

Hochwaldklonen Muhle-Larsen und Fritzi-Pauley bis zu 16 Tonnen bei Max 4. Bei der Mehrklon-Sorte Max fallen Max 2 mit einer Biomasseproduktion von knapp neun Tonnen und Max 4 mit über 16 Tonnen aus dem Rahmen. Alle andern Balsampappeln kommen auf einen Zuwachs zwischen zehn und zwölf Tonnen Trockenmasse pro Hektar und Jahr.

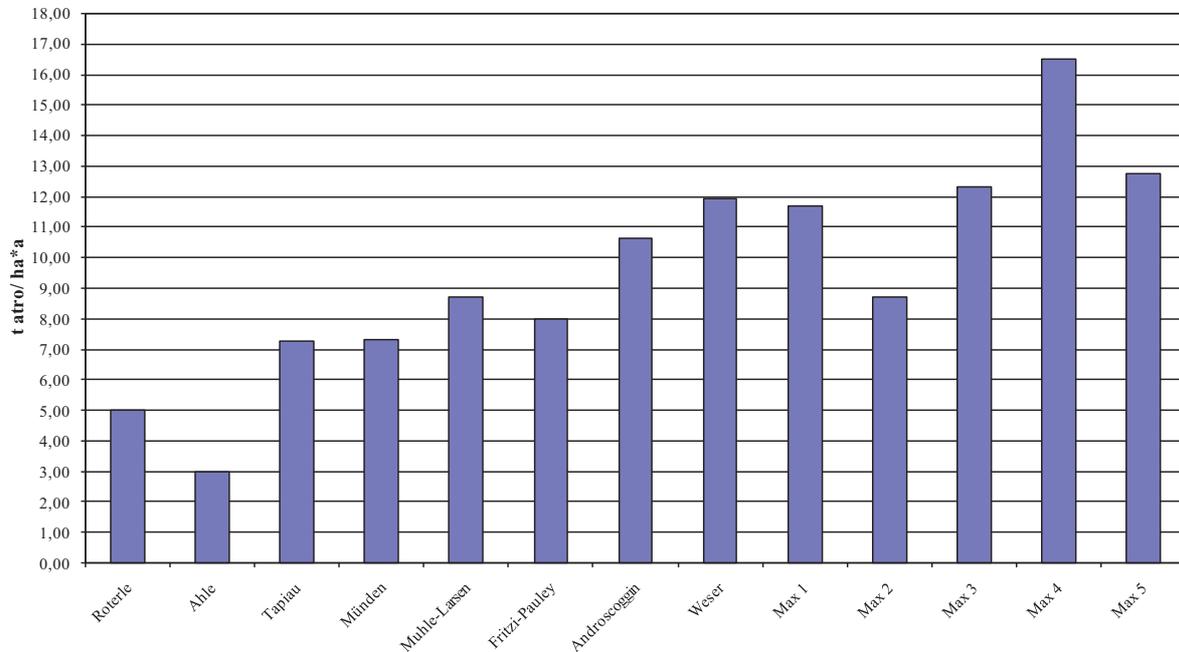


Abbildung 9: Massenleistung von Roterle, der Aspensorten Ahle, Tapiau und Münden sowie von neun Balsampappel-Klonen, Versuchsfläche Wöllershof, 3. fünfjähriger Umtrieb, 2003 - 2007

Der Vergleich von zweiter und dritter Rotation zeigt, dass man bei den gegebenen Standortbedingungen in Wöllershof mit einem Zuwachs von ca. zehn bis zwölf Tonnen atro/ha\*a bei der Balsampappel rechnen kann.

### Prüfung auf signifikante Wuchsunterschiede: Ergebnisse der T-Tests

Tabelle 5 zeigt, dass im dritten fünfjährigen Umtrieb der Balsampappelklon Max 3 ein signifikant unterschiedliches Höhenwachstum zu allen anderen Prüfgliedern hatte. Bei Weser 6 beginnen bereits die Überschneidungen. Roterle und die Aspensorte Ahle unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, weisen aber eine geringere Durchschnittshöhe auf als alle anderen Sorten und Klone.

Tabelle 5: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum, Versuchsfläche Wöllershof, 3. fünfjähriger Umtrieb 2003 - 2007

Baumart/Klon	Bonferroni Gruppen		Durchschnittshöhe in m
Max 3		A	10,5
Weser 6	B	A	10,4
Max 5	B	A	10,1
Fritzi-Pauley	B	A	10,1
Max 4	B	A	10,0
Muhle-Larsen	B	A	9,7
Androscoggin	B		9,6
Max 1	B		9,6
Max 2		D	9,1
Münden		D	9,0
Tapiau		D	8,4
Roterle	E		7,5
Ahle	E		7,3

#### 4.3.1.4 Erster zehnjähriger Umtrieb

In Abbildung 10 ist die Höhenentwicklung des zehnjährigen Umtriebs in Wöllershof dargestellt.

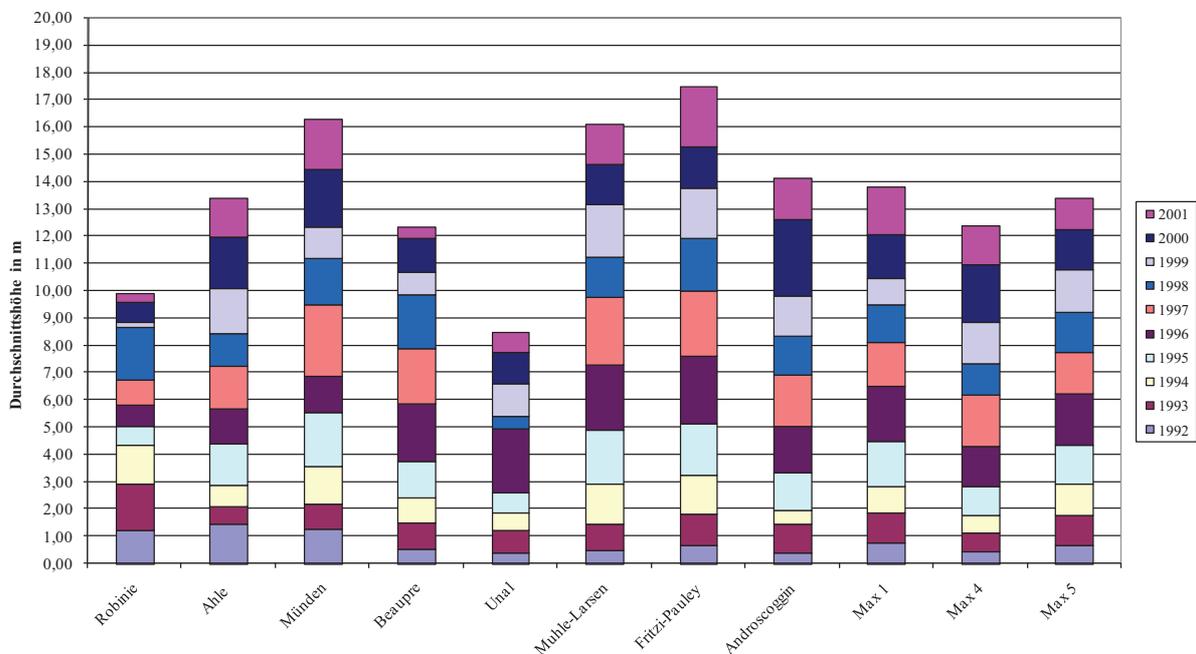


Abbildung 10: Entwicklung der Durchschnittshöhe von Robinie, der Aspensorten Ahle und Münden sowie von acht Balsampappel-Klonen, Versuchsfläche Wöllershof, 1. zehnjähriger Umtrieb 1992 - 2001

Nach einigen schwachen Anfangsjahren, die Gründe dafür liegen wie beim ersten fünfjährigen Umtrieb in Schwierigkeiten bei der Begründung, wiesen die Balsampappeln während der gesamten Umtriebszeit ein relativ gleichmäßiges Höhenwachstum auf. Eine Ausnahme bilden die vom Pappelblattrost befallenen Klone Beaupré und Unal, die in den letzten drei bis fünf Jahren schwache Wuchsleistungen zeigten. Die Robinie konnte bei dem vorgegebenen Pflanzverband von 2,5 \* 1,2 Meter die Stammzahl über die Umtriebszeit nicht halten. Das Absterben ihrer benachbarten Konkurrenten ermöglichte den überlebenden Bäumen in die Breite zu wachsen, was den schwachen Höhenwuchs des Kollektivs in den letzten drei Jahren erklärt. Die beiden Hochwald-Balsampappel-Klone Muhle-Larsen und Fritzzi-Pauley sowie die Aspe Münden erreichten die größten Durchschnittshöhen.

Im ersten zehnjährigen Umtrieb konnten, im Gegensatz zur ersten fünfjährigen Rotation, Zuwachsleistungen von über zehn Tonnen Trockenmasse pro Jahr und Hektar erzielt werden. Wie Abbildung 11 zeigt liegt der Balsampappel-Klon Max 1 mit einem Zuwachs von über elf Tonnen an der Spitze, gefolgt von Muhle-Larsen und Fritzzi-Pauley. Zieht man den schwachen Wuchs der ersten drei Jahre in Betracht, so ist in der zweiten Umtriebszeit mit einer noch höheren Biomasseproduktion zu rechnen. Dies entspricht den Berechnungen von HOFMANN (2005), der für die Balsampappel eine Umtriebszeit von 11 bis 13 Jahren als zuwachsoptimal angibt.

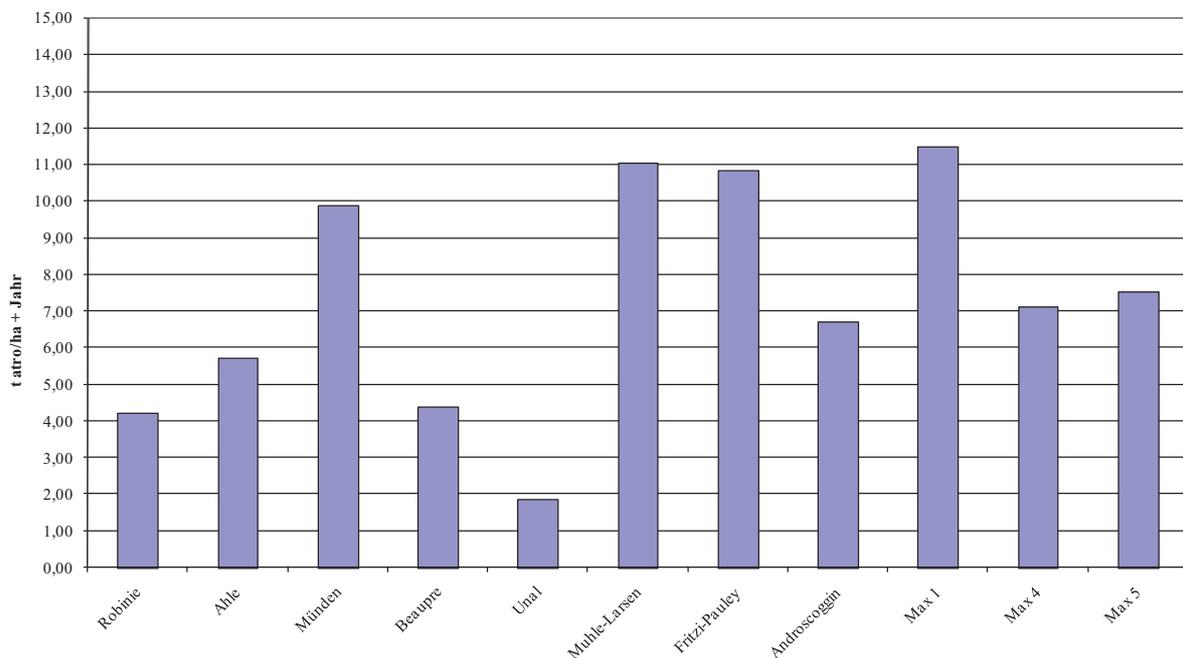


Abbildung 11: Massenleistung von Robinie, der Aspensorten Ahle und Münden sowie von acht Balsampappelklonen, Versuchsfläche Wöllershof, 1. zehnjähriger Umtrieb 1992 - 2001

**Prüfung auf signifikante Wuchsunterschiede: Ergebnisse der T-Tests**

Tabelle 6: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum der Stecklingskultur, Versuchsfläche Wöllershof, 1. zehnjähriger Umtrieb 1992 - 2001

Baumart/Klon	Bonferroni Gruppen	Durchschnittshöhe in m
Fritzi-Pauley	A	17,5
Muhle-Larsen	B	16,1
Androscoggin	C	14,1
Max 1	C	13,8
Max 5	C D	13,4
Max 4	D	12,4
Beaupré	D	12,3
Unal	E	8,5

Die Tabellen 6 und 7 zeigen das Ergebnis der Signifikanzprüfungen des Höhenwachstums im zehnjährigen Umtrieb. Auch hier muss wegen der unterschiedlichen Ausgangsbedingungen zwischen Stecklingskultur und Pflanzung differenziert werden. Der Balsampappelklon Fritzi-Pauley erreicht bei der Stecklingskultur eine signifikant unterschiedliche Mittelhöhe im Vergleich zu allen anderen Prüfgliedern. Die geringste Durchschnittshöhe hat der vom Pappelblattrost befallene Klon Unal.

Im Bereich des zehnjährigen Umtriebs sind die Standortbedingungen wesentlich einheitlicher als im fünfjährigen. Dementsprechend geringer fallen die Überschneidungen aus und die Wuchsunterschiede der Klone treten stärker hervor. Nur dem Balsampappelklon Max 5 sind zwei Großbuchstaben zugeordnet.

Im Kollektiv der gepflanzten Bäume erreichte die Aspensorte Münden eine signifikant unterschiedliche Mittelhöhe im Vergleich zur Aspe Ahle und Robinie.

Tabelle 7: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum der gepflanzten Aspen und Robinien, Versuchsfläche Wöllershof, 1. zehnjähriger Umtrieb 1992 - 2001

Baumart/Klon	Bonferroni Gruppen	Durchschnittshöhe in m
Münden	A	16,3
Ahle	B	13,4
Robinie	C	9,9

### 4.3.2 Neuhof

Auf Grund von Klon-Vermischungen konnten die Ertragsdaten des fünfjährigen Umtriebs in Neuhof nicht ausgewertet werden. Deshalb erfolgt hier nur eine Darstellung des zehnjährigen Bestandes, in dem die Zeitstudie für das Ernteverfahren „Fällen - Rücken - Hacken“ durchgeführt wurde.

#### Erster zehnjähriger Umtrieb

Die Darstellung der Höhenwuchsleistung in Abbildung 12 zeigt ein recht ausgeglichenes Bild. Die Balsampappeln und Aspen erreichen nicht die Durchschnittshöhen wie auf der Versuchsfläche Wöllershof. Deutlich ist zu sehen, dass die beiden Klone Androscoggin und Muhle-Larsen im Herbst als Großpflanzen eingebracht wurden. Sie starteten mit Höhen von ungefähr zwei Metern und litten dann zwei Jahre unter dem Pflanzschock. Ähnliches gilt für die Robinie und für die Aspensorten. Einzig die mit Stecklingen eingebrachte Balsampappel Max 3 zeigte einen relativ ausgeglichenen Wuchsverlauf über die gesamten zehn Jahre.

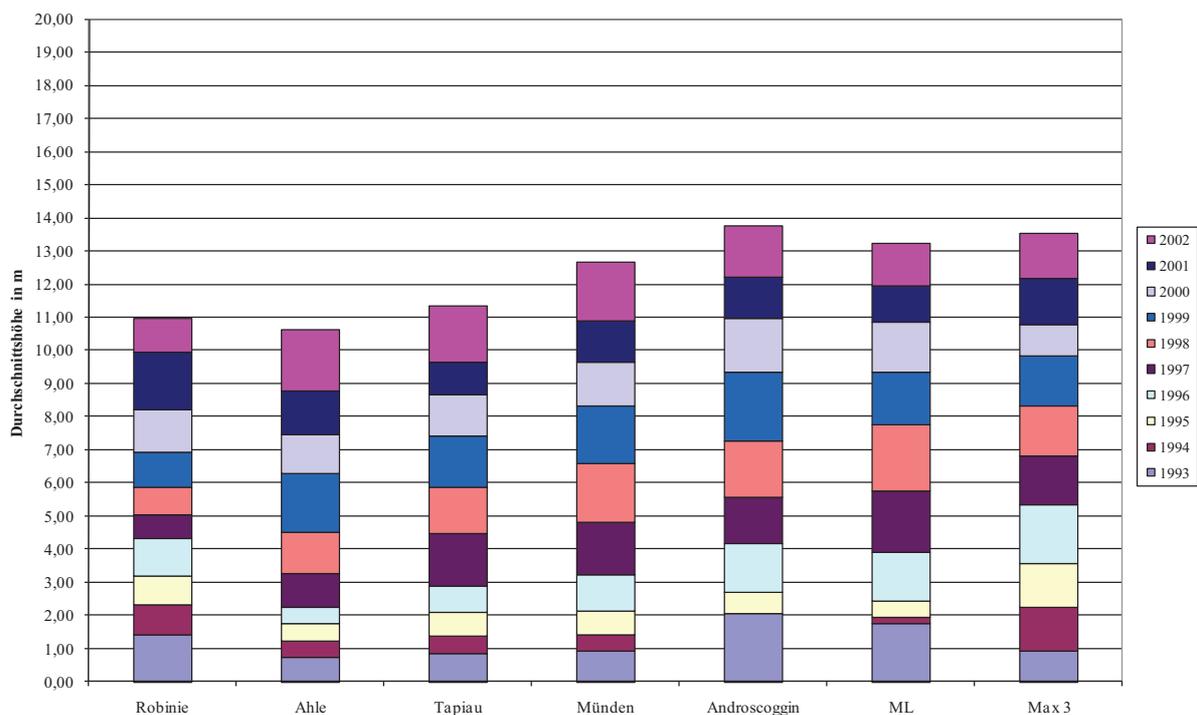


Abbildung 12: Entwicklung der Durchschnittshöhe von Robinie, der Aspensorten Ahle, Tapiau und Münden sowie von drei Balsampappelklonen, Versuchsfläche Neuhof, 1. zehnjähriger Umtrieb 1993 - 2002

In der Darstellung des Biomassezuwachses in Abbildung 13 werden die Unterschiede zwischen den angebauten Baumarten und Sorten deutlicher. Insgesamt liegen die Zuwächse unter dem Niveau des zehnjährigen Umtriebs in Wöllershof. Am besten gewachsen ist die

Balsampappel Muhle-Larsen mit acht t atro/ha\*a. Die Robinie übertrifft mit knapp sechs Tonnen in Neuhoof sogar alle Aspensorten.

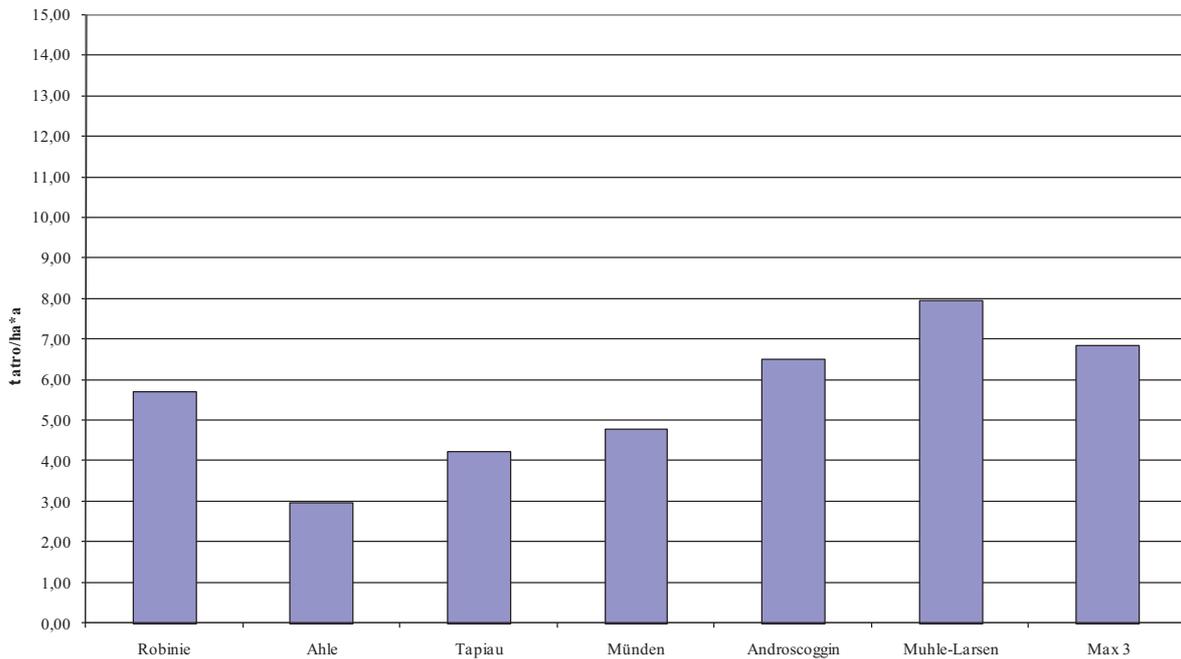


Abbildung 13: Massenleistung von Robinie, der Aspensorten Ahle, Tapiau und Münden sowie von drei Balsampappelklonen, Versuchsfläche Neuhoof, 1. zehnjähriger Umtrieb 1993 - 2002

### 4.3.3 Beuerberg

Wegen der geringen Flächengröße der Versuchsfläche entschloss man sich bei der ersten Massenermittlung zu einer Wiegung der gesamten aufgewachsenen Biomasse nach dem in Kapitel 4.2.2.1 beschriebenen Verfahren. Bei der zweiten Ernte der Versuchsfläche erfolgte die Ermittlung der Wuchsleistung nach dem Massenlinienverfahren nach KOPETZKY-GERHARDT (KRAMER & AKCA 1995).

#### 4.3.3.1 Erster fünfjähriger Umtrieb

Die Abbildung 14 zeigt die Entwicklung der Durchschnittshöhen der in Beuerberg angebauten Baumarten und Klone. Die Balsampappeln wurden im Herbst des Begründungsjahres als gut zwei Meter große Heister gepflanzt, der unterste Abschnitt im Balkendiagramm stellt deshalb die Durchschnittshöhe zum Zeitpunkt der Pflanzung dar. Im darauffolgenden Jahr war das Wachstum zunächst gering, doch schon 1996 zeigten die Balsampappeln eine gute Höhenzunahme, die bis zum Ende der Umtriebszeit anhielt. Die größte Durchschnittshöhe erreichte mit über elf Metern der Balsampappelklon Trichobel. Roterle und Aspe wurden im Frühjahr 1994 als zweijährige Pflanzen eingebracht und waren

zum Zeitpunkt der Ernte bereits sieben Jahre alt. Ihr Wuchsverlauf ähnelt dem der in Beuerberg gepflanzten Balsampappeln. Nach einem schwachen Wuchs im Jahr nach der Pflanzung stieg das Höhenwachstum in den Folgejahren an. Die Aspe Astria erreichte eine Durchschnittshöhe von knapp acht Meter, Roterle und Korbweide gut fünf Meter.

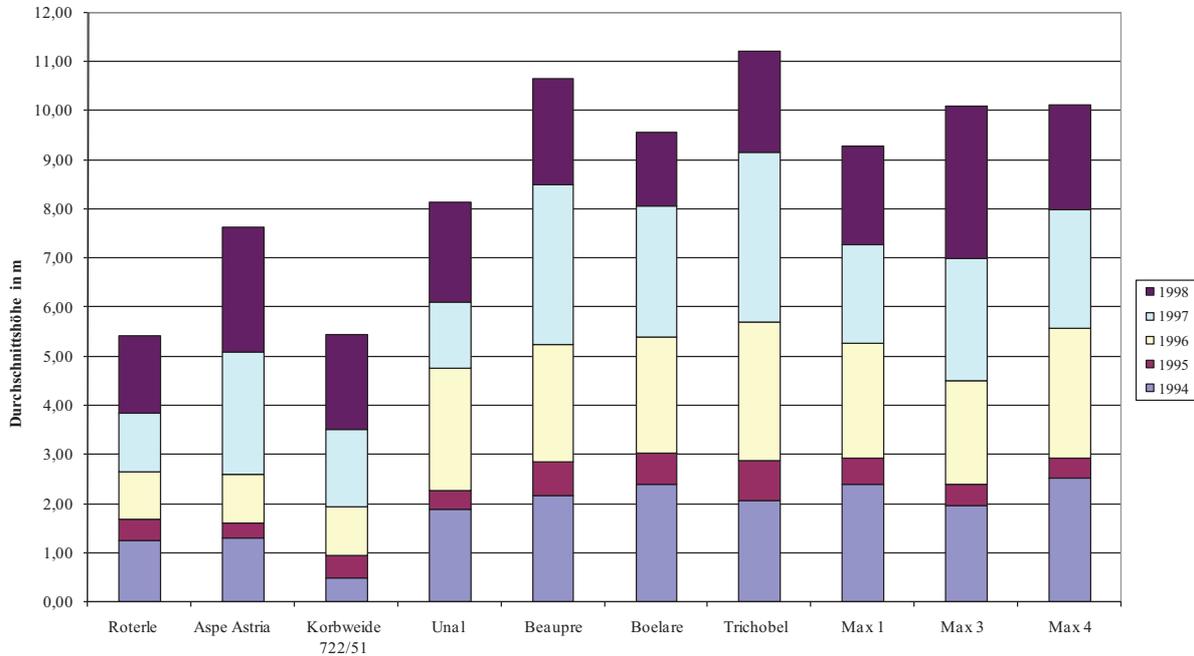


Abbildung 14: Entwicklung der Durchschnittshöhe von Roterle, der Aspensorte Astria, des Korbweidenklons 722/51 sowie von sieben Balsampappelklonen, Versuchsfläche Beuerberg, 1. fünfjähriger Umtrieb 1994 - 1998

Abbildung 15 stellt den jährlichen Zuwachs an Biomasse während des ersten fünfjährigen Umtriebs in Tonnen Trockenmasse pro Hektar und Jahr dar. Die Balsampappel Trichobel ist mit knapp neun Tonnen Spitzenreiter, gefolgt von Beaupré und Max 1. Das Schlusslicht bildet der vom Pappelblattrost befallene Klon Unal. Roterle, Aspe und Korbweide bleiben weit hinter den Balsampappeln zurück. Die Roterle war in Beuerberg allerdings bereits im ersten Umtrieb von der Phytophthora-Wurzelhalsfäule der Erle (*Phytophthora alni*) befallen und konnte keinen optimalen Zuwachs leisten.

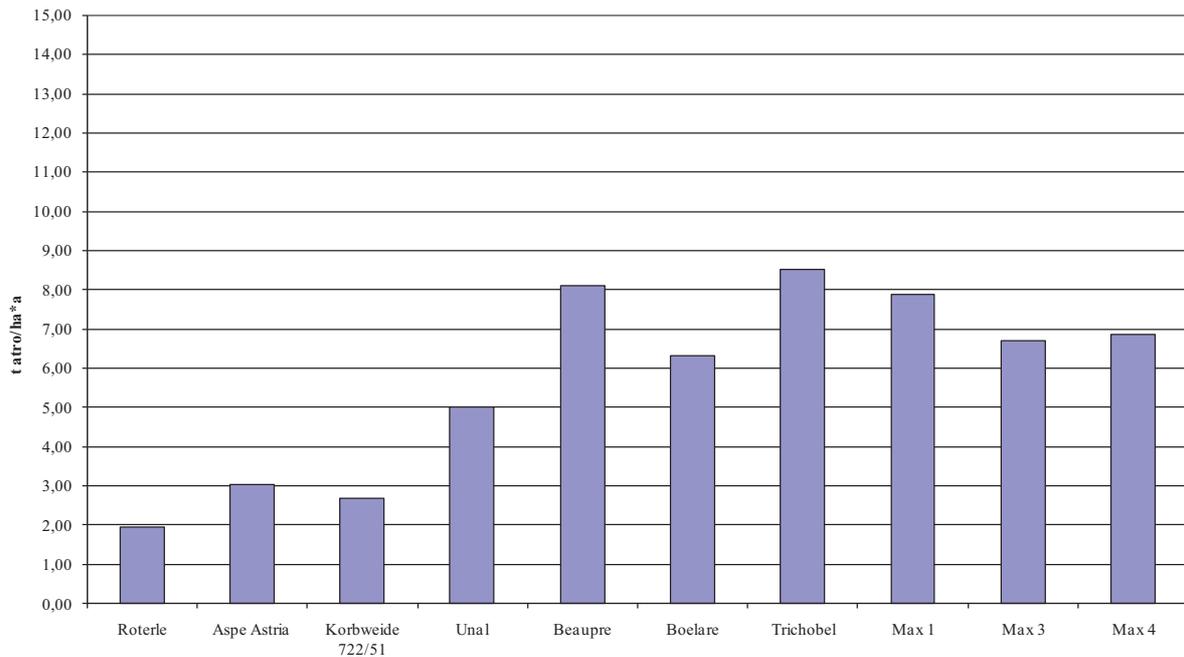


Abbildung 15: Massenleistung von Roterle, der Aspensorte Astria, des Korbweideklons 722/51 sowie von sieben Balsampappelklonen, Versuchsfläche Beuerberg, 1. fünfjähriger Umtrieb 1994 - 1998

**Prüfung auf signifikante Wuchsunterschiede: Ergebnisse der T-Tests**

Tabelle 8: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum, Beuerberg, 1. fünfjähriger Umtrieb 1994 - 1998

Baumart/Klon	Bonferroni Gruppen		Durchschnittshöhe in m
Trichobel	A		11,2
Beaupré	A	B	10,7
Max 4	C	B	10,1
Max 3	C	B	10,1
Boelare	C		9,6
Max 1	C		9,3
Unal	D		8,1
Astria	D		7,6
Roterle	E		5,4

Tabelle 8 zeigt die signifikanten Unterschiede im Höhenwachstum auf der Versuchsfläche Beuerberg. Die Korbweide wurde als einzige mit Stecklingen begründet und deshalb nicht in die Tests mit einbezogen. Die Balsampappel Trichobel zeigt ein signifikant unterschiedliches Höhenwachstum zu allen anderen angebauten Baumarten und Klonen mit Ausnahme von Beaupré. Bereits bei dieser beginnen die Überschneidungen.

#### 4.3.3.2 Zweiter fünfjähriger Umtrieb

Während des zweiten Umtriebes fielen die Balsampappelklone Unal, Boelare und Beaupré wegen des Befalls mit Pappelblattnests aus. Die Roterle wurde durch die Phytophthora-Wurzelhalsfäule der Erle geschädigt und ebenfalls nicht mehr beprobt. Der Wiederaustrieb der Korbweide 722/51 fiel dem Verbiss des Rehwildes zum Opfer. Neu hinzugekommen ist der Balsampappelklon 10/85, der in der ersten Umtriebszeit mit Setzruten nachgebessert wurde und deshalb erst im zweiten Umtrieb in die Auswertung einbezogen werden konnte.

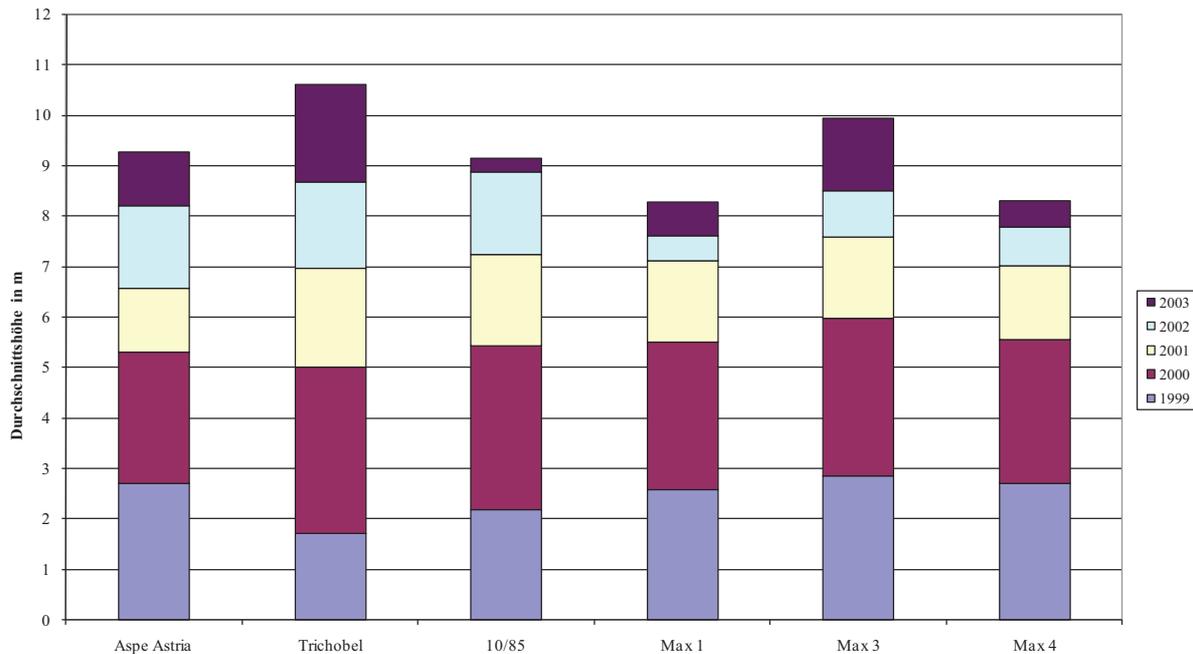


Abbildung 16: Entwicklung der Durchschnittshöhen der Aspensorte Astria sowie von fünf Balsampappelklonen, Versuchsfläche Beuerberg, 2. fünfjähriger Umtrieb 1999 - 2003

Trichobel erreicht auch im zweiten Umtrieb die größte Mittelhöhe, gefolgt von Max 3 mit knapp zehn Metern (Abbildung 16). Es fällt auf, dass die Balsampapeln 10/85 und Max 1 im letzten Jahr fast kein Höhenwachstum zeigten. Die Ursache mag Wassermangel im Extremsommer 2003 bei diesen recht dicht wachsenden Sorten sein. Allerdings können auch andere Ursachen wie Gipfelbruch durch Sturm nicht ganz ausgeschlossen werden.

Ein etwas anderes Bild bietet sich bei der Darstellung der zugewachsenen Biomasse in Abbildung 17. Hier bildet der Balsampappelklon 10/85 mit knapp 13 t atro/ha\*a Zuwachs die Spitze, gefolgt von Max 3 mit knapp zwölf Tonnen. Die Balsampappel mit dem größten Höhenzuwachs, Trichobel, fällt in der Biomasseproduktion stark zurück. Dies liegt mit Sicherheit an dem schlanken, geradschaftigen Wuchs dieses Klons. Auch die Aspe Astria erreicht mit knapp zehn Tonnen im zweiten Umtrieb einen guten Wert und übertrifft ihren Zuwachs im ersten Umtrieb um mehr als das dreifache.

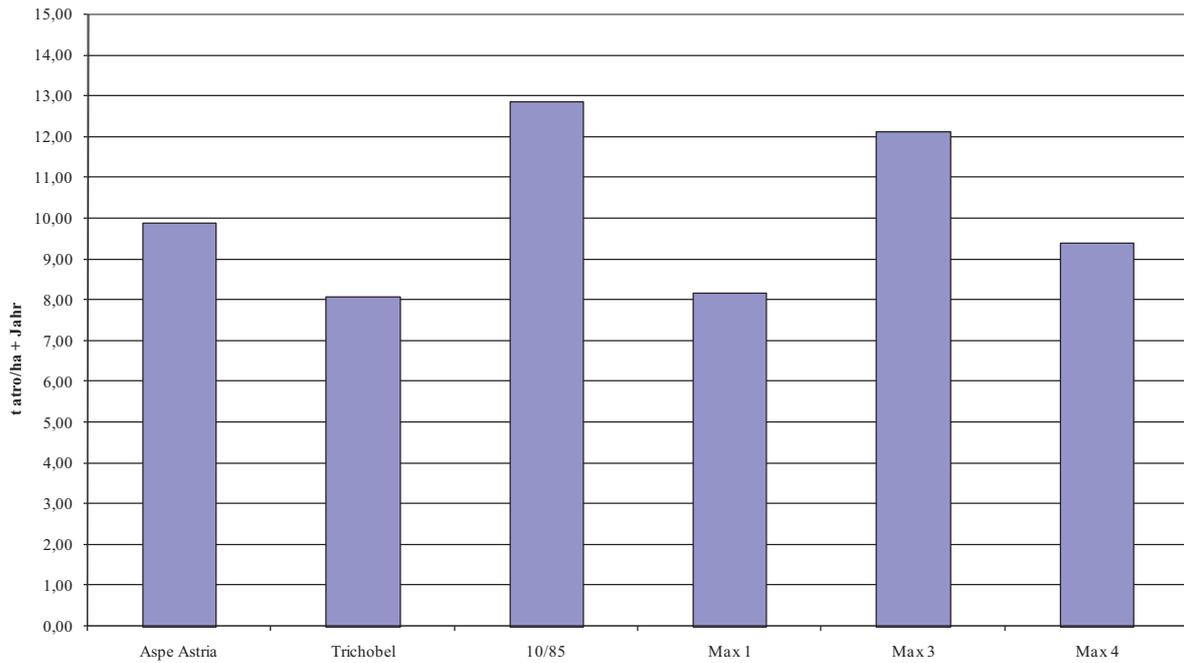


Abbildung 17: Massenleistung der Aspensorte Astria sowie von fünf Balsampappelklonen, Versuchsfläche Beuerberg, 2. fünfjähriger Umtrieb 1999 - 2003

### Prüfung auf signifikante Wuchsunterschiede: Ergebnisse der T-Tests

Tabelle 9: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum, Beuerberg, 2. fünfjähriger Umtrieb 1999 - 2003

Baumart/Klon	Bonferroni Gruppen		Durchschnittshöhe in m
Trichobel	A		10,6
Max 3	A		9,9
Astria	A	B	9,3
P 10/85	A	B	9,1
Max 4	B		8,3
Max 1	B		8,3

Auf Grund des gleichmäßigen Wuchses im zweiten Umtrieb konnten durch die Prüfungen auf Signifikanz keine großen Unterschiede herausgearbeitet werden. Tabelle 9 weist lediglich zwei Gruppen aus, die sich im Mittelfeld bei Astria und 10/85 überschneiden.

#### 4.3.4 Schwarzenau

##### 4.3.4.1 Erster fünfjähriger Umtrieb

Wegen der standörtlichen Gegebenheiten der Versuchsfläche (mäßig trockener bis mäßig wechsellrockener Sand) kam es im Anlagejahr zu zahlreichen Ausfällen. Besonders schlecht entwickelten sich die gepflanzten Aspensorten, die z. T. parzellenweise ausfielen. Auch Balsampappeln und Korbweiden wiesen so hohe Ausfälle auf, dass im Herbst 1994 größere Nachbesserungen vorgenommen werden mussten. Da der Anwuchserfolg der Herbstnachbesserungen nicht gesichert war, wurde im Jahr 1994 auf eine Ermittlung der Durchschnittshöhen verzichtet. Der blaue Balken in Abbildung 18 stellt daher den Höhenwuchs der Korbweiden und Balsampappeln in den Jahren 1994 und 1995 dar.

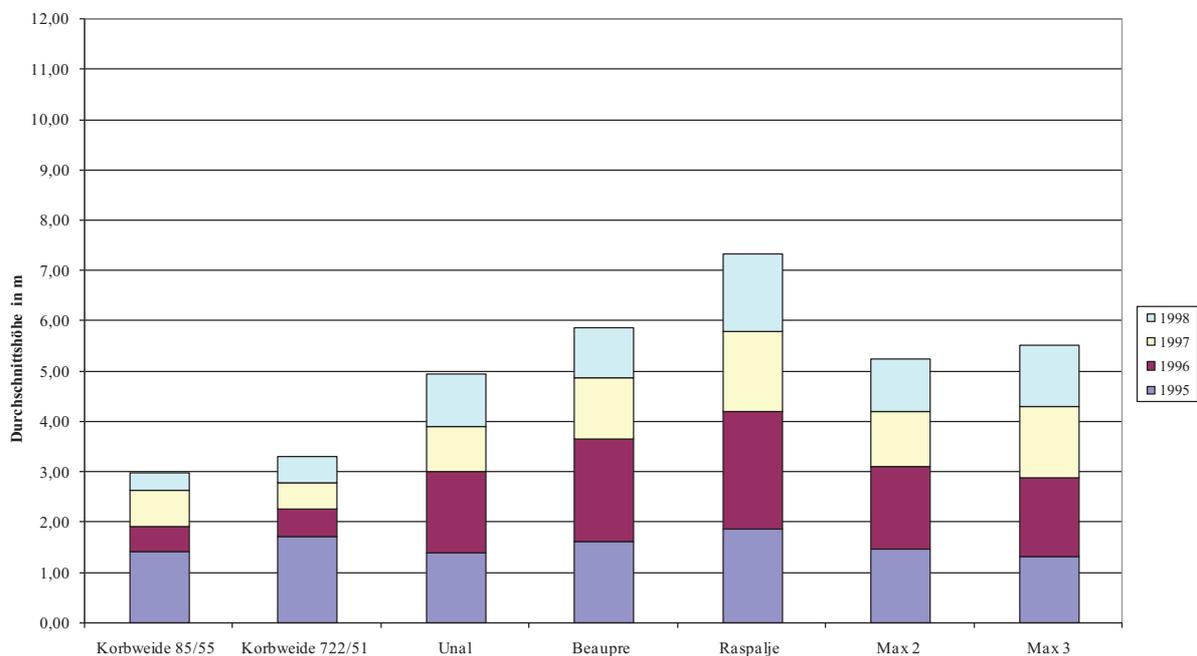


Abbildung 18: Entwicklung der Durchschnittshöhen von zwei Klonen der Korbweide und fünf Balsampappelklonen, Versuchsfläche Schwarzenau, 1. fünfjähriger Umtrieb 1994 – 1998

Die niedrigsten Mittelhöhen erreichten die Korbweiden, wobei der Zuwachs der drei letzten Jahre deutlich niedriger als 1994 und 1995 war. Besser schnitten die fünf Balsampappeln ab. Die höchste Mittelhöhe erreichte Raspalje. Die Klone Raspalje, Beaupré und Unal, die auf allen anderen Versuchsflächen am Pappelblattrost litten und z. T. bereits ganz ausgefallen sind, zeigten im warm trockenen Klima von Schwarzenau relativ gute Höhenwuchsleistungen. Dies ist wahrscheinlich auf das Fehlen der Lärche in der näheren Umgebung der Versuchsfläche zurückzuführen, die der Erreger des Pappelblattrostes als Haplontenwirt benötigt.

Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Begründung und des schlechten Wuchses im 1. Umtrieb wurde in Schwarzenau auf eine statistische Ermittlung des Biomasse-Zuwachses

verzichtet. Lediglich drei besonders gut gewachsene Parzellen wurden im Winter 1998/99 gefällt und komplett gewogen (Verfahren nach 4.2.2.1). Die beste Wuchsleistung erzielte Raspalje mit 4,9 t atro/ha\*a, gefolgt von Max 3 mit 3,93 Tonnen und Beaupré mit 3,75 Tonnen.

**Prüfung auf signifikante Wuchsunterschiede: Ergebnisse der T-Tests**

Tabelle 10: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum, Schwarzenau, 1. fünfjähriger Umtrieb 1994 - 1998

Baumart/Klon	Bonferroni Gruppen	Durchschnittshöhe in m
Raspalje	A	7,3
Beaupré	B	5,9
Max 3	C	5,5
Max 2	C	5,2
Unal	D	4,9
Korbweide 722/51	E	3,3
Korbweide 85/55	E	3,0

Aus Tabelle 10 ist zu ersehen, dass die Balsampappel Raspalje signifikante Unterschiede im Höhenzuwachs zu allen anderen Klonen aufweist. Die Zahl der Überschneidungen in Schwarzenau ist gering.

**4.3.4.2 Zweiter fünfjähriger Umtrieb**

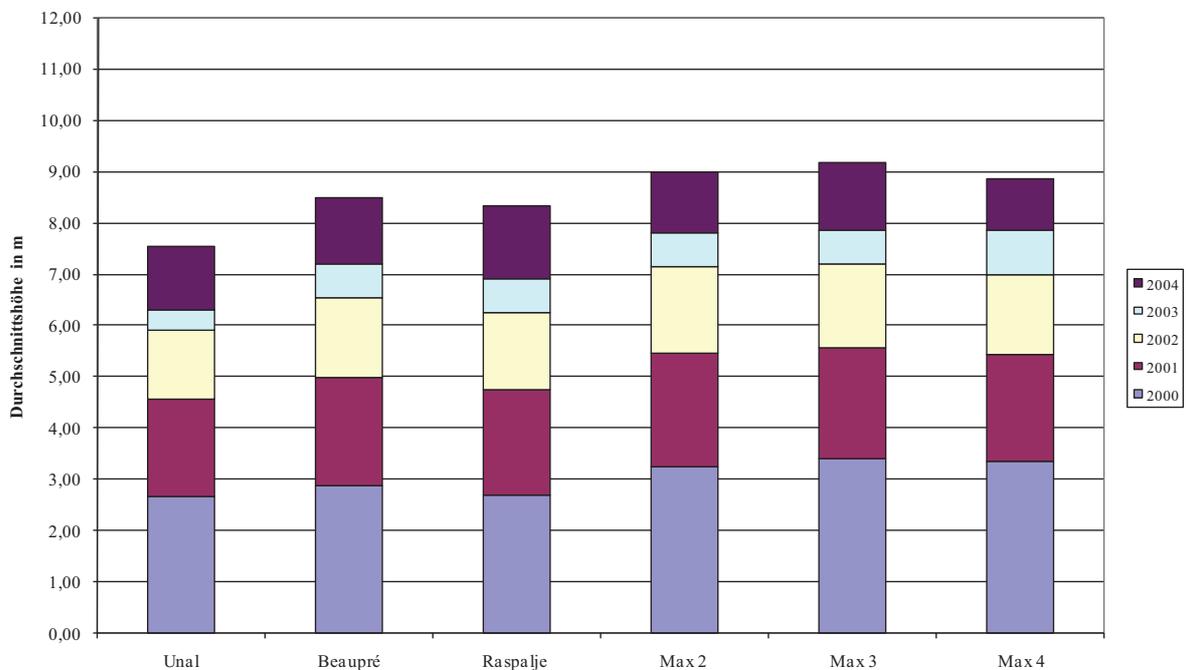


Abbildung 19: Entwicklung der Durchschnittshöhen von sechs Balsampappelklonen, Versuchsfläche Schwarzenau, 2. fünfjähriger Umtrieb, 2000 - 2004

Der Wiederaustrieb in Schwarzenau entwickelte sich deutlich wuchskräftiger als die erste Rotation (Abbildung 19). Die Korbweide wurde wegen des sehr schwachen Wuchses nicht mehr beprobt. Die sechs dargestellten Balsampappelklone zeigten in den ersten drei Jahren sehr gute Höhenzuwächse. Im Trockenjahr 2003 sieht man in der Graphik einen deutlich schwächeren Wuchs.

In der Darstellung des Biomasse-Zuwachses in Abbildung 20 werden die Unterschiede zwischen den Klonen deutlicher. Die vom Pappelblattrost befallenen Klone Unal, Raspalje und Beaupré zeigten eine deutlich schwächere Biomasseproduktion als Max 2, 3 und 4.

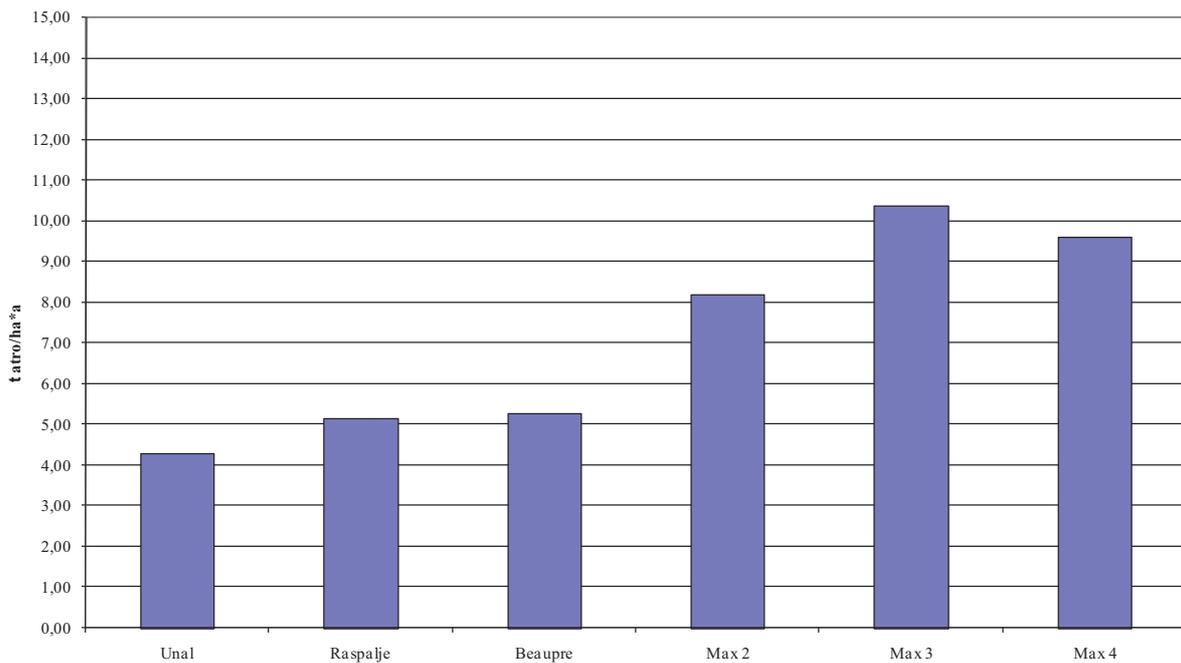


Abbildung 20: Massenleistung von sechs Balsampappelklonen, Versuchsfläche Schwarzenau, 2. fünfjähriger Umtrieb, 2000 - 2004

### Prüfung auf signifikante Wuchsunterschiede: Ergebnisse der T-Tests

Nur bei Unal konnten signifikante Unterschiede zu allen anderen Klonen nachgewiesen werden.

Tabelle 11: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum, Schwarzenau, 2. fünfjähriger Umtrieb 2000 – 2004

Baumart/Klon	Bonferroni Gruppen		Durchschnittshöhe in m
Max 3		A	9,2
Max 2	B	A	9,0
Max 4	B	A	8,9
Beaupré	B	C	8,5
Raspalje		C	8,3
Unal		D	7,5

### 4.3.5 Coburg

#### 4.3.5.1 Erster fünfjähriger Umtrieb

Abbildung 21 zeigt die Entwicklung der Durchschnittshöhen der auf der Versuchsfläche angebauten Roterle, Korbweide und Balsampappel während des ersten Umtriebs. Die Roterle wurde als Pflanze eingebracht, der unterste Balkenabschnitt in der Abbildung stellt also die Summe aus Pflanzhöhe plus Zuwachs im Jahr 1995 dar. Bei den Klonen von Korbweide und Balsampappel, als Stecklinge gesetzt, zeigt jeder Balkenabschnitt den durchschnittlichen Höhenzuwachs pro Jahr.

Der Wuchsverlauf der Balsampappel ist bei allen Klonen ähnlich. Während in den ersten drei Jahren nur geringe Zuwächse erreicht wurden, stiegen die Höhenwuchsleistungen in den letzten beiden Jahren an. Die größten Zuwächse wurden bei allen acht Klonen im letzten Jahr gemessen, ein Hinweis darauf, dass die Pappeln auf Grund der starken Graskonkurrenz auf der Fläche ihr Wuchspotenzial zunächst nicht ausschöpfen konnten.

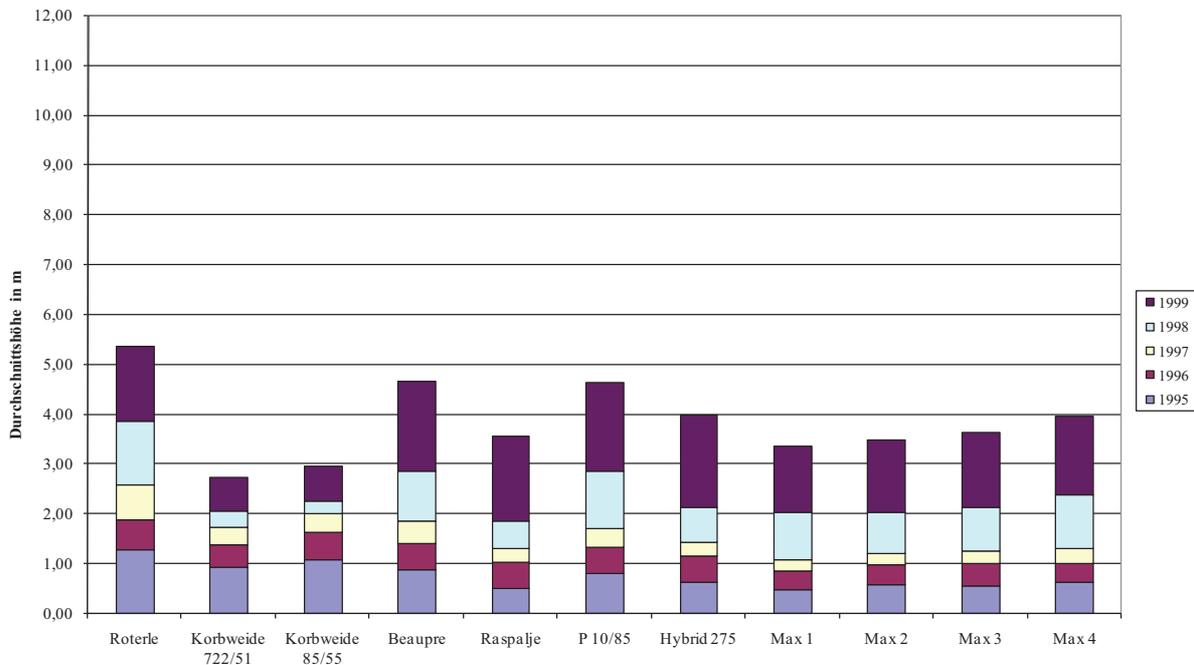


Abbildung 21: Entwicklung der Durchschnittshöhen von Roterle, zwei Klonen der Korbweide sowie acht Balsampappelklonen, Versuchsfläche Coburg, 1. fünfjähriger Umtrieb 1995 - 1999

Den größten Höhenzuwachs erzielte die gepflanzte Roterle, sie kam offenbar besser mit der Graskonkurrenz zu Recht als die Stecklingskultur. Insgesamt ist der Wuchs im ersten Umtrieb als sehr schlecht zu beurteilen.

Wegen des schwachen Wachstums im ersten Umtrieb entschied man sich, auf eine statistische Massenermittlung zu verzichten. Lediglich die beiden am besten gewachsenen Parzellen mit Roterle und der Balsampappel Raspalje wurden gefällt und komplett gewogen. Die Roterle

hatte mit 2,43 t atro den besten Biomassezuwachs im ersten Umtrieb, Rascalje kam auf 1,19 Tonnen.

### Prüfung auf signifikante Wuchsunterschiede: Ergebnisse der T-Tests

Bei der statistischen Analyse wurde die Roterle nicht berücksichtigt, da sie als Einzige als Pflanze eingebracht wurde. Tabelle 12 zeigt, dass die Balsampappeln Beaupré und 10/85 signifikant unterschiedlich gewachsen sind als alle anderen Prüfglieder. Die Tabelle weist keine Überschneidungen auf, was möglicherweise auf die einheitlichen Standortverhältnisse in Coburg zurückzuführen ist.

Tabelle 12: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum von Korbweide und Balsampappel, Coburg, 1. fünfjähriger Umtrieb 1995 - 1999

Baumart/Klon	Bonferroni Gruppen	Durchschnittshöhe in m
Beaupré	A	4,6
P 10/85	A	4,6
Hybrid 275	B	4,0
Max 4	B	3,9
Max 3	C	3,6
Rascalje	C	3,5
Max 2	C	3,5
Max 1	C	4,4
Korbweide 85/55	D	2,9
Korbweide 722/51	D	2,7

#### 4.3.5.2 Zweiter fünfjähriger Umtrieb

Erst in der zweiten Rotation zeigt sich das Wuchspotenzial des Standorts Coburg. Während keiner der als Steckling eingebrachten Klone im ersten Umtrieb eine Durchschnittshöhe von fünf Metern erreichte, kommen die beiden Balsampappeln P 10/85 und Hybrid 275 in der zweiten Rotation auf ca. zehn Meter. Max 1 - 4 erreichen Durchschnittshöhen von etwa neun Metern (Abbildung 22).

## Biomasseproduktion von Kurzumtriebsplantagen

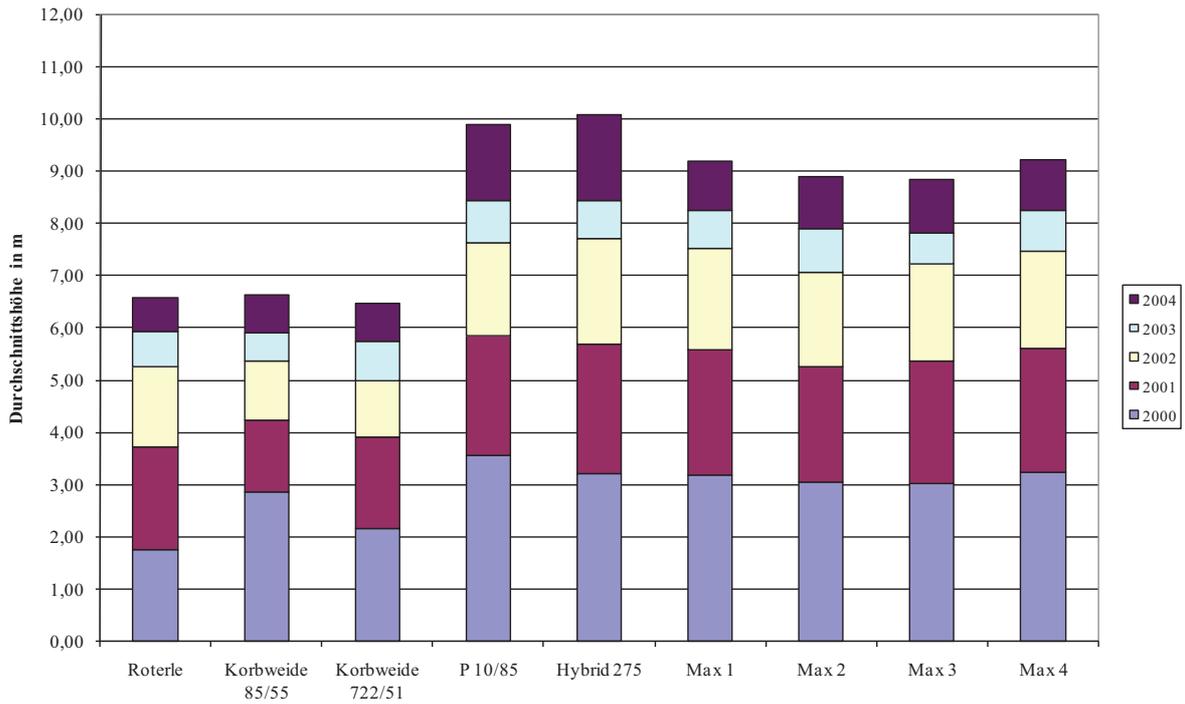


Abbildung 22: Entwicklung der Durchschnittshöhen von Roterle, zwei Klonen der Korbweide sowie sechs Balsampappelklonen, Versuchsfläche Coburg, 2. fünfjähriger Umtrieb 2000 - 2004

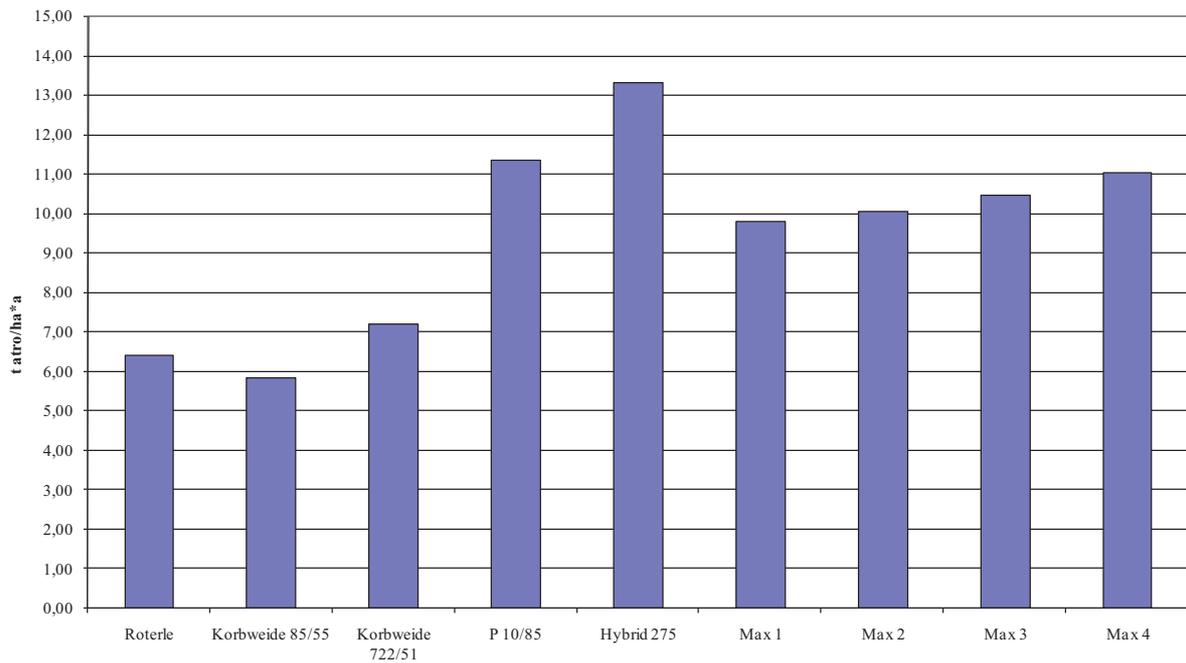


Abbildung 23: Massenleistung von Roterle, zwei Klonen der Korbweide und sechs Balsampappelklonen, Versuchsfläche Coburg, zweiter fünfjähriger Umtrieb, 2000 - 2004

Auch die Biomasseleistung weist bedeutende Unterschiede zur ersten Umtriebszeit auf. Alle sechs Balsampappelklone in Abbildung 23 liegen recht nah beieinander und zeigen

Zuwachsleistungen zwischen zehn und 13 t atro/ha\*a. Deutlich weniger produzieren die beiden Korbweiden-Klone und die Roterle mit sechs bis sieben Tonnen.

### Prüfung auf signifikante Wuchsunterschiede: Ergebnisse der T-Tests

Tabelle 13: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum von Korbweide, Roterle und Balsampappel, Coburg, zweiter fünfjähriger Umtrieb, 2000 - 2004

Baumart/Klon	Bonferroni Gruppen	Durchschnittshöhe in m
Hybrid 275	A	10,1
P 10/85	A	9,9
Max 4	B	9,2
Max 1	B	9,2
Max 2	B/C	8,9
Max 3	C	8,8
Korbweide 85/55	D	6,6
Roterle	D	6,6
Korbweide 722/51	D	6,5

Die Durchschnittshöhen der beiden Balsampappeln Hybrid 275 und P 10/85 weisen signifikante Unterschiede zu allen anderen Prüfgliedern auf, was die Ergebnisse der Zuwachsschätzungen bestätigt.

#### 4.3.6 Reisbach

##### Erster fünfjähriger Umtrieb

Wegen der unbefriedigenden Biomasseproduktion des ersten Umtriebs der bisher angelegten Versuchsflächen (Ausnahme: Beuerberg) wurde bei der Anlage der Flächen Reisbach, sowie Dornwang I und II der Abstand zwischen den Reihen auf 1,5 Meter verringert, damit die angebauten Balsampappeln den Lichtraum zwischen den Reihen frühzeitig schließen und die aufkommende konkurrenzstarke Begleitvegetation frühzeitig ausdunkeln können. Gleichzeitig wurde der Abstand in der Reihe auf 0,8 Meter erhöht, so dass die Soll-Pflanzenzahl auf den genannten Flächen mit 8.330 Stück pro Hektar etwas höher liegt als in Wöllershof, Neuhof, Beuerberg und Schwarzenau.

Die Abbildung 24 zeigt die Höhenentwicklung von sieben Balsampappelklonen auf der Versuchsfläche Reisbach. Bis auf Beupré und Boelare, die vom Pappelblattrost befallen wurden, zeigen alle Balsampappeln ein gutes und relativ ausgeglichenes Höhenwachstum. Die erreichte Mittelhöhe nach fünf Jahren liegt bei den gesunden Klonen zwischen neun und zehn Metern.

## Biomasseproduktion von Kurzumtriebsplantagen

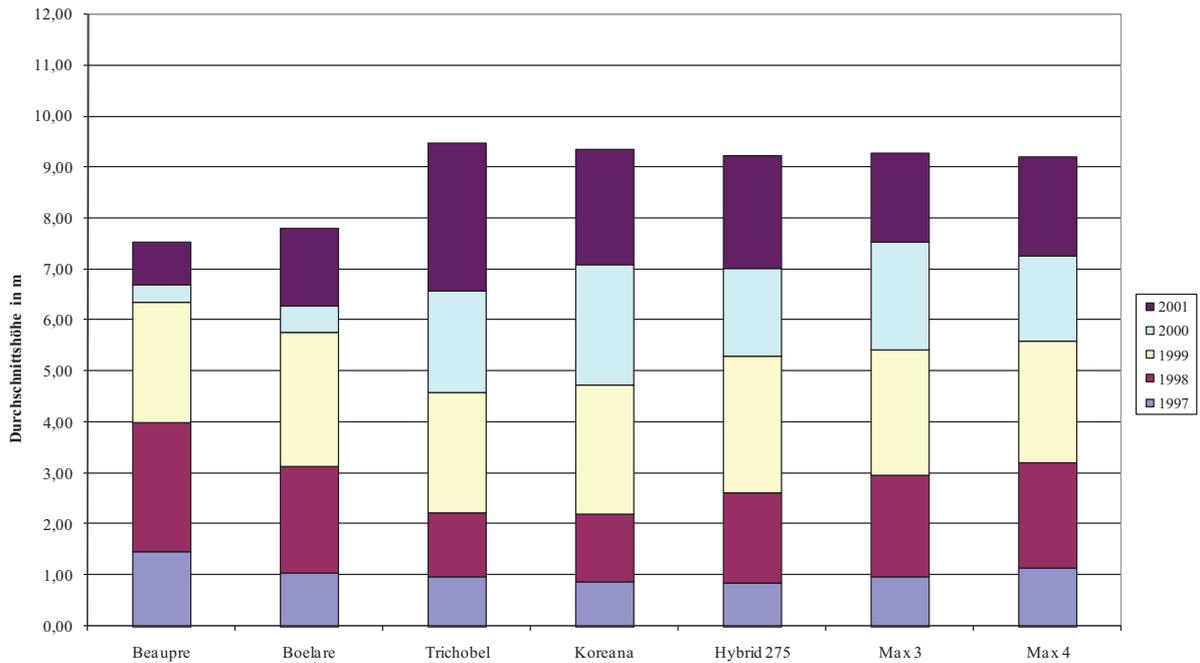


Abbildung 24: Entwicklung der Durchschnittshöhen von sieben Balsampappelklonen, Versuchsfläche Reisbach, 1. fünfjähriger Umtrieb 1997 - 2001

Die Darstellung des Biomassezuwachses in Abbildung 25 zeigt ein ähnliches Bild. Den niedrigsten Zuwachs leisten die vom Pappelblattrost befallenen Klone. Alle anderen erreichen Zuwächse zwischen sieben und neun t atro/ha\*a.

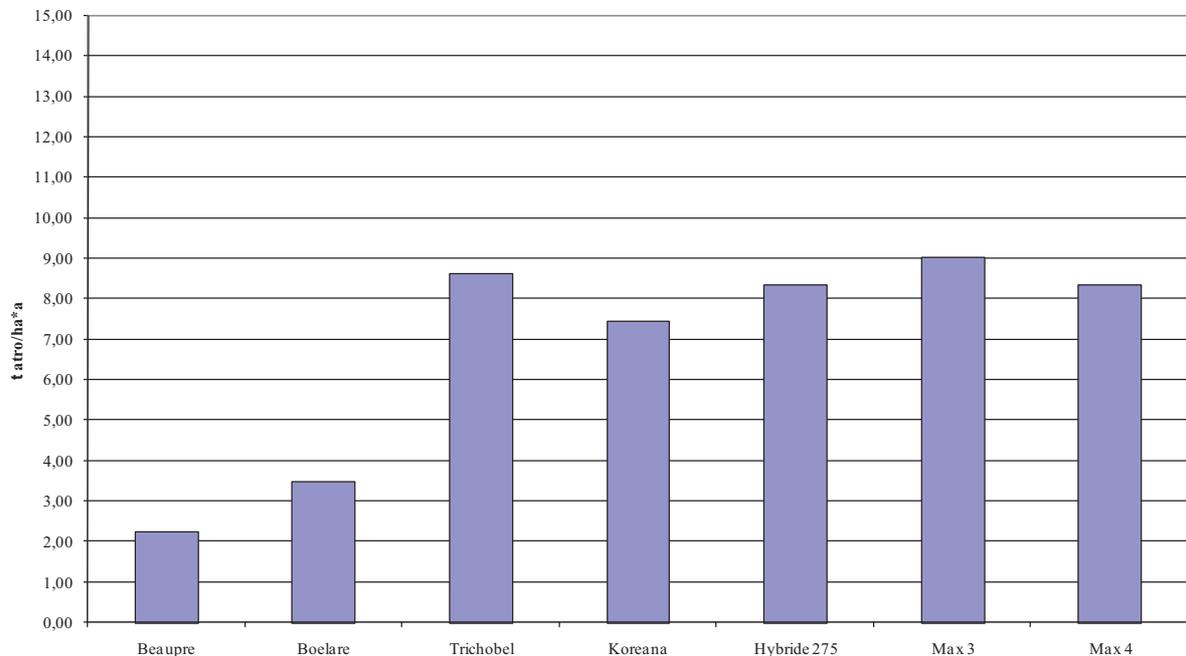


Abbildung 25: Massenleistung von sieben Balsampappelklonen, Versuchsfläche Reisbach, 1. fünfjähriger Umtrieb 1997 - 2001

**Prüfung auf signifikante Wuchsunterschiede: Ergebnisse der T-Tests**

Tabelle 14: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum, Reisbach, 1. fünfjähriger Umtrieb 1997 - 2001

Klon	Bonferroni Gruppen	Durchschnittshöhe in m
Trichobel	A	9,5
Koreana	A	9,4
Max 3	A	9,3
Hybrid 275	A	9,3
Max 4	A	9,2
Boelare	B	7,8
Beaupré	B	7,6

Die Ergebnisse der T-Tests in Tabelle 14 zeigen keine Überschneidungen. Allerdings konnten nur zwei Gruppen dargestellt werden. Die fünf gesunden Klone weisen ähnliche Mittelhöhen ohne bedeutsame Unterschiede auf. Bei den vom Pappelblattrost befallenen Beaupré und Boelare konnten signifikante Unterschiede im Höhenwachstum zu allen anderen Klonen herausgearbeitet werden.

**4.3.7 Dornwang I**

**Erster fünfjähriger Umtrieb**

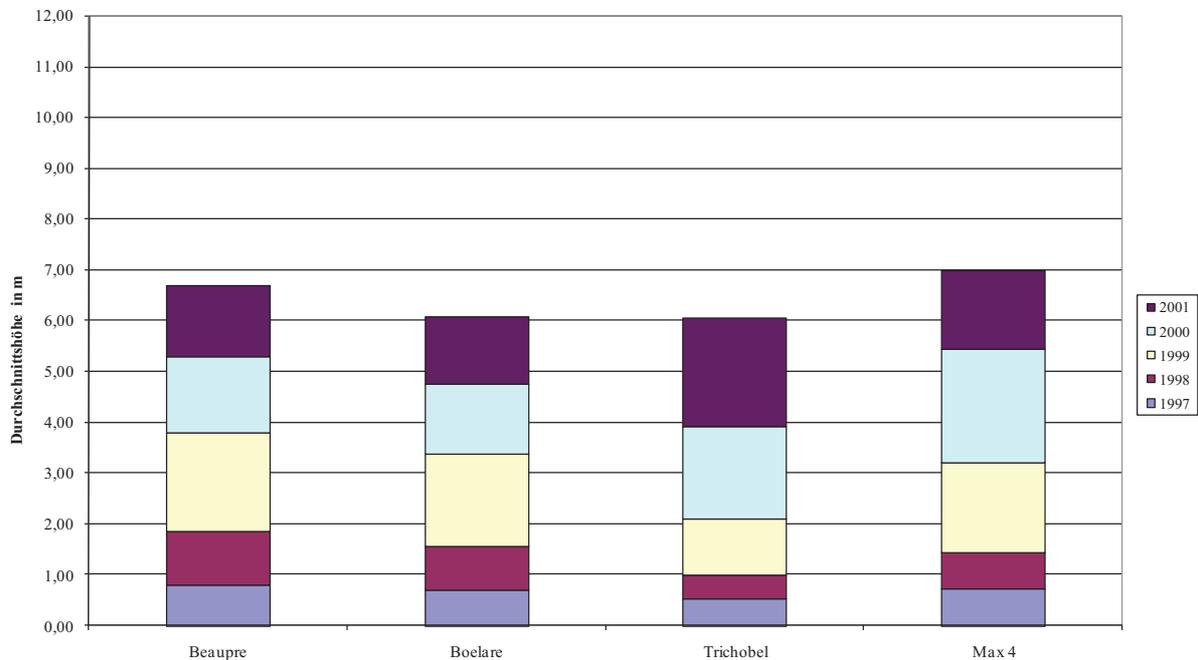


Abbildung 26: Entwicklung der Durchschnittshöhen von vier Balsampappelklonen, Versuchsfläche Dornwang I, 1. fünfjähriger Umtrieb 1997 - 2001

Auch die Versuchsfläche Dornwang I wurde mit einer Soll-Pflanzenzahl von 8.330 Stück pro Hektar begründet. Der Wuchs ist schwächer als in Reischbach, wie die Abbildungen 26 und 27 belegen. Dies liegt womöglich an der windexponierten Kuppenlage der Fläche und an dem auffallend geringen Humusanteil im Oberboden. Allerdings schränkte die exponierte Lage auch den Einfluss des Pappelblattrostes ein, die Unterschiede in Höhenwachstum und Biomasseproduktion zwischen den befallenen Klonen Beaupré und Boelare und den gesunden Balsampappeln Trichobel und Max 4 sind nicht so ausgeprägt wie in Reischbach.

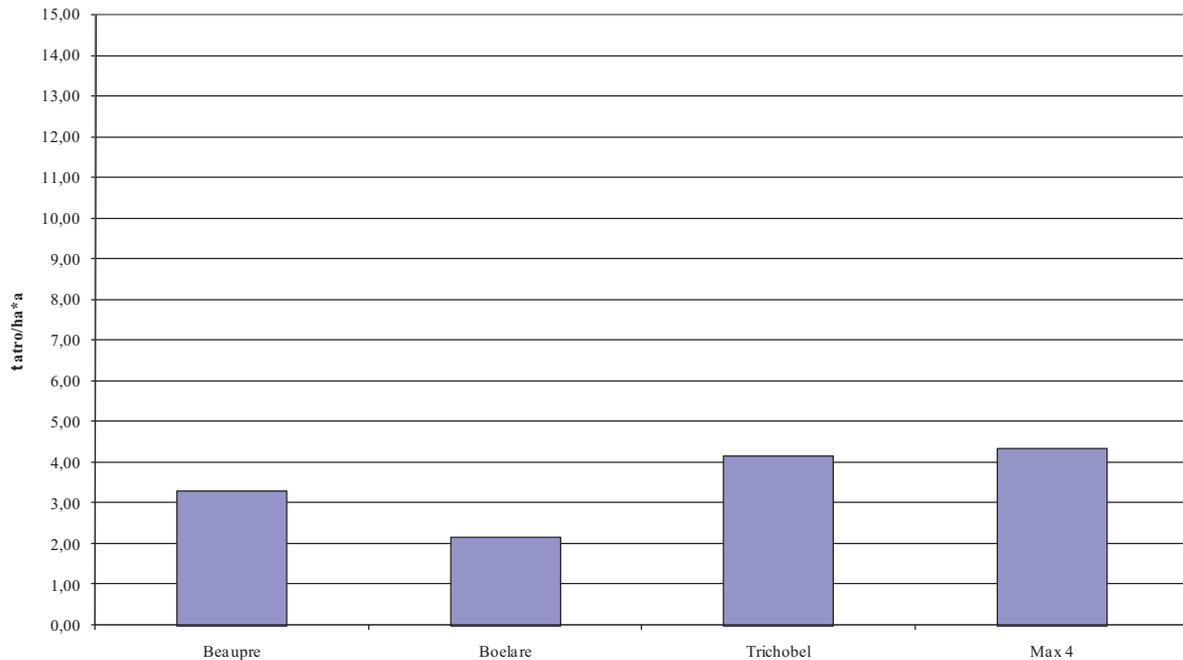


Abbildung 27: Massenleistung von vier Balsampappelklonen, Versuchsfläche Dornwang I, 1. fünfjähriger Umtrieb, 1997 - 2001

**Prüfung auf signifikante Wuchsunterschiede: Ergebnisse der T-Tests**

Tabelle 15: Signifikante Wuchsunterschiede im Höhenwachstum, Dornwang I, 1. fünfjähriger Umtrieb 1997 – 2001

Klon	Bonferroni Gruppen	Durchschnittshöhe in m
Max 4	A	7,0
Beaupré	B	6,7
Boelare	C	6,1
Trichobel	C	6,1

Signifikante Unterschiede bestehen zwischen Max und Beaupré; Boelare und Trichobel gehören der gleichen Gruppe an.

### 4.3.8 Dornwang II

#### Erster fünfjähriger Umtrieb

Auf dieser Versuchsfläche wurden die Klone Beaupré und Boelare, möglicherweise bedingt durch die Lage im Isartal, sehr stark vom Pappelblattrost geschädigt. Auf einigen Parzellen mussten Höhenmessung und Massenabschätzung unterbleiben. Die folgenden Abbildungen sind daher nicht repräsentativ. Auf eine statistische Auswertung wurde verzichtet.

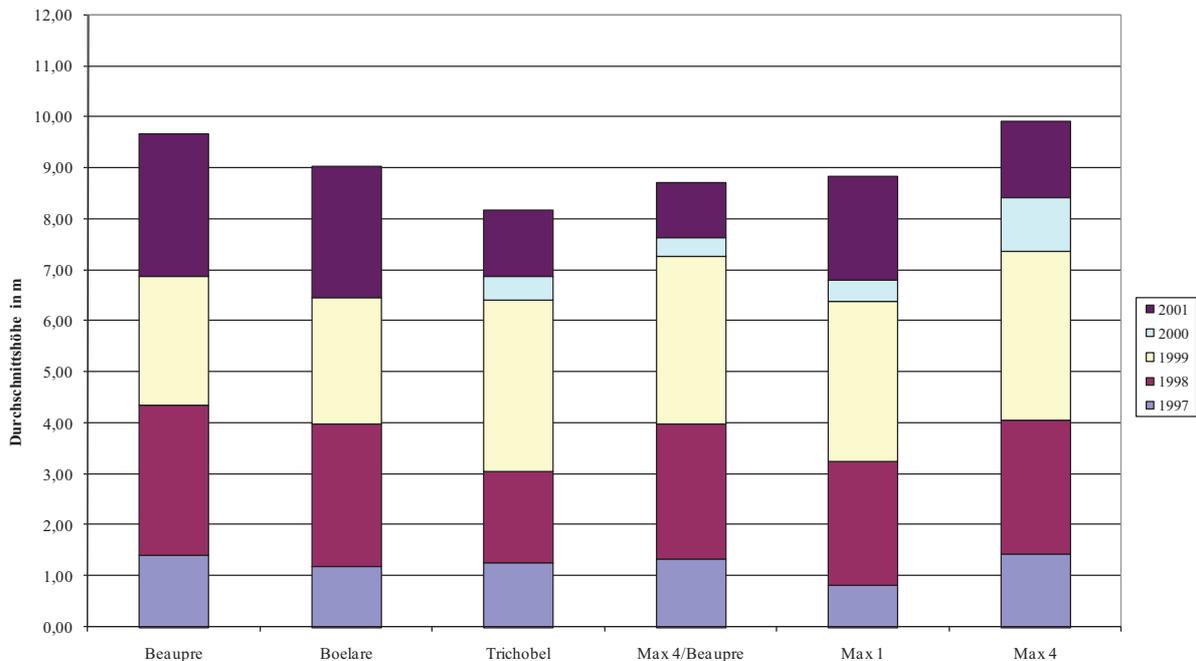


Abbildung 28: Entwicklung der Durchschnittshöhen von sechs Balsampappelklonen, Versuchsfläche Dornwang II, 1. fünfjähriger Umtrieb 1997 - 2001

Nach einem verhaltenen Start im Anlagejahr zeigten die Bäume im zweiten und dritten Jahr gutes Wachstum. Im Jahr 2000 nahm die Durchschnittshöhe der beiden vom Rostpilz befallenen Klone überhaupt nicht zu. Auch die übrigen Balsampappeln zeigten in diesem Jahr nur schwaches Wachstum. Insgesamt kann die Entwicklung der Durchschnittshöhe in Dornwang II als gut bezeichnet werden.

In Abbildung 29 zeigt der Klon Max 4 bereits im ersten Umtrieb eine sehr gute Biomasse-Produktion von über elf t atro/ha\*a. Alle anderen Angaben sind nicht repräsentativ, da nur die am Rand der Versuchsfläche liegenden Parzellen beprobt werden konnten. Die innerhalb der Fläche liegenden Parzellen der erkrankten Klone waren z. T. bereits abgestorben.

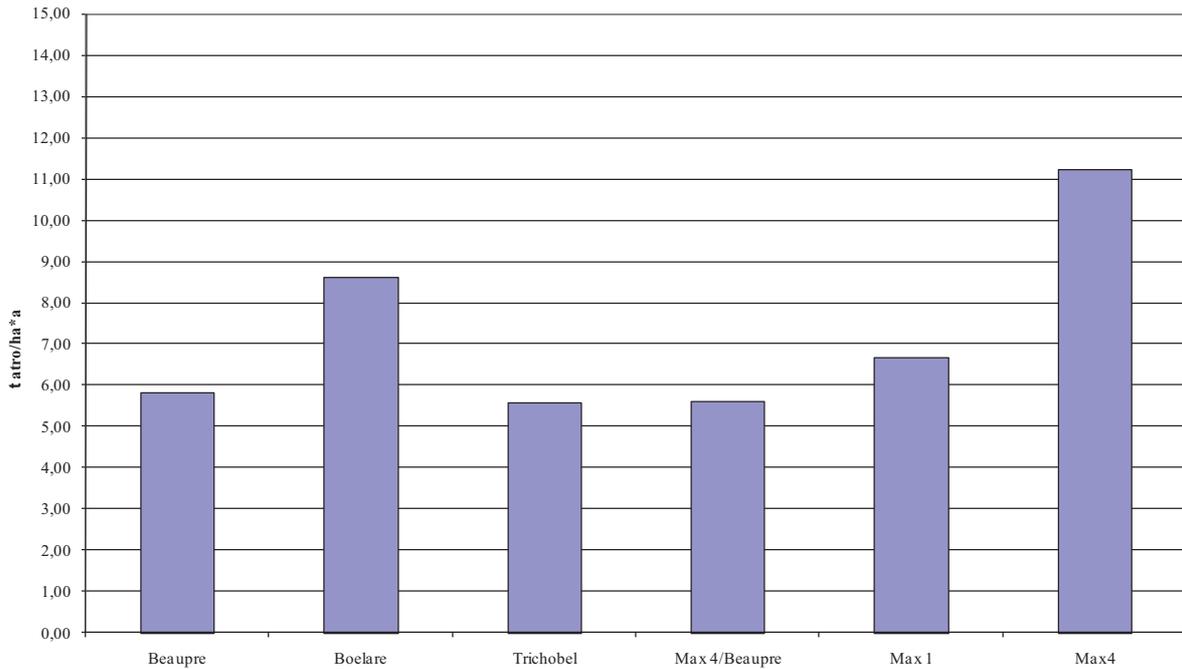


Abbildung 29: Massenleistung von sechs Balsampappelklonen, Versuchsfläche Dornwang II, 1. fünfjähriger Umtrieb 1997 - 2001

#### 4.3.9 Kammern

##### Erster fünfjähriger Umtrieb

Auf dieser Versuchsfläche wurde der Reihenabstand auf Grund der vorgesehenen maschinellen Ernte auf einen Meter reduziert. Bei einem Abstand von 0,8 Meter in der Reihe ergibt dies 12.500 Pflanzen pro Hektar. Außerdem wurde auf die Anlage von Parzellen verzichtet. Es wurden lediglich vier Blöcke gebildet.

Im ersten Block wurden die beiden bis dahin wüchsigsten Klone Max 4 und Beaupré in Einzelmischung angebaut. In Block zwei folgte eine reihenweise Mischung der gleichen Sorten. Block drei besteht aus Max 4 und in Block vier wurde der Klon Beaupré gepflanzt. Auf eine statistische Auswertung musste wegen der geringen Zahl an Prüfgliedern verzichtet werden. In Abbildung 30 zeigen beide Klone in den verschiedenen Blöcken einen ähnlichen Wuchsverlauf. Wegen des Einsatzes von Herbiziden bei Begründung der Fläche war der Höhenzuwachs bereits im ersten Jahr sehr gut. Bereits nach dem zweiten Jahr fiel er ab. Im letzten Jahr war er meist am niedrigsten. Dies deutet darauf hin, dass bei der hohen Ausgangspflanzenzahl in Kammern bereits im fünften Wuchsjahr Wuchsdepressionen durch Wassermangel auftraten. Während in der Darstellung der mittleren Höhen Beaupré und Max 4 nahezu gleichauf sind, zeigen die Massenzuwächse in Abbildung 31 deutliche Unterschiede.

## Biomasseproduktion von Kurzumtriebsplantagen

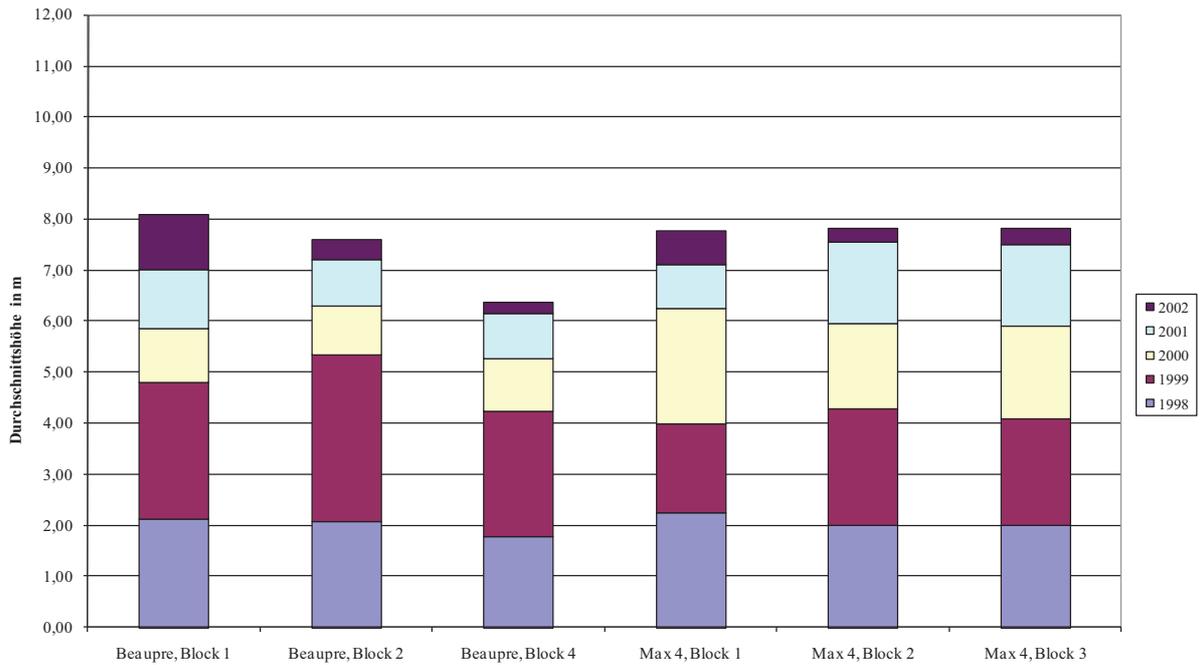


Abbildung 30: Entwicklung der Durchschnittshöhen von Max 4 und Beaupré, Versuchsfläche Kammern, 1. fünfjähriger Umtrieb 1998 - 2002

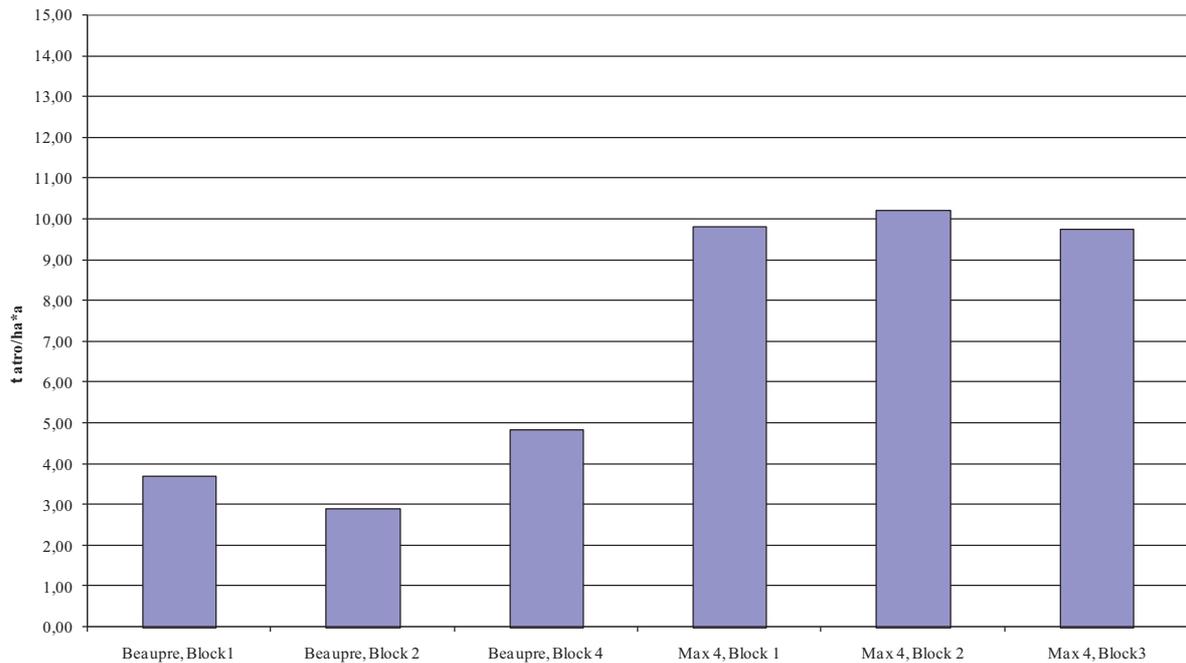


Abbildung 31: Massenleistung der Balsampappelklone Max 4 und Beaupré, Versuchsfläche Kammern, 1. fünfjähriger Umtrieb 1998 - 2002

Der Biomassezuwachs der während der Umtriebszeit vom Pappelblattrost befallenen Beaupré lag zwischen drei und knapp fünf Tonnen Trockenmasse pro Jahr und Hektar. Max 4 erreichte in allen drei Blöcken mit circa zehn Tonnen mehr als den doppelten Zuwachs.

#### 4.4 Diskussion

Die ermittelten Wuchsleistungen streuen auf den ersten Blick weit. Vor allem in der ersten Umtriebszeit ist der Wuchs einiger Flächen als schwach zu beurteilen. Bei den Versuchsflächen Wöllershof, Neuhof, Schwarzenau und Coburg war vor allem die Kombination von nicht optimalem Pflanzverband (zu weite Abstände zwischen den Reihen) und nicht durchgeführtem Herbizideinsatz für die schlechten Wuchsleistungen verantwortlich. Der zu weite Abstand zwischen den Reihen verhinderte eine Beschattung der Begleitvegetation, die in der Folge zu einer starken Konkurrenz um Wasser und Nährstoffe wurde und erst mit dem Wiederaustrieb im zweiten Umtrieb von den angebauten Baumarten und Klonen zurückgedrängt werden konnte.

Die mit Großpflanzen begründete Versuchsfläche Beuerberg zeigte bereits im ersten Umtrieb gute Wuchsleistungen, da die bei der Pflanzung bereits zwei Meter hohen Pflanzen sich gut gegen die Begleitvegetation durchsetzen konnten.

Bei den Versuchsflächen Reisbach, Dornwang I und II sowie Kammern wurde deshalb der Reihenabstand reduziert, bei Kammern außerdem noch ein Totalherbizid und ein Voraufbrauchmittel gespritzt. Mit Ausnahme von Dornwang I, das auf einer windausgesetzten Kuppe liegt, waren die Wuchsleistungen dieser Flächen bereits in der ersten Umtriebszeit durchweg gut.

Verantwortlich für die schlechten Wuchsleistungen im ersten Umtrieb in Coburg ist auch die Tatsache, dass die Bäume nach fünf Jahren zu einem Zeitpunkt geerntet wurden, als sie sich gerade etabliert hatten und im Wachstum zulegten. Die Biomasseproduktion des ersten zehnjährigen Umtriebs in Wöllershof unterstützt diese These. Der Zuwachs des zehnjährigen Umtriebs liegt klar über den Werten der ersten fünfjährigen Rotation. Offensichtlich entspricht der zehnjährige Wuchszeitraum dem natürlichen Wuchsverhalten von Balsampappel und Aspe besser als der fünfjährige. Zu diesem Schluss kommen auch UNSELD (1999) und HOFMANN (2005), die für die Balsampappel eine längere zuwachsoptimale Umtriebszeit von acht bzw. 10 - 13 Jahren ermittelten.

Im Vergleich zur ersten stellt sich die Situation in der zweiten und dritten Umtriebszeit ganz anders dar. Die meisten der angebauten Balsampappelklone erreichen Zuwächse von 10 - 13 Tonnen Trockenmasse pro Jahr und Hektar. In Wöllershof, Schwarzenau und Coburg vervielfachte sich die Biomasseproduktion. Die Auswertung der dritten Rotationsperiode in Wöllershof zeigt, dass der Zuwachs auf dem Niveau des zweiten Umtriebes bleibt.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass mit der Balsampappel bei Vermeidung von Anbaufehlern auf den meisten bayerischen landwirtschaftlichen Standorten Zuwächse von 10 - 13 Tonnen Trockenmasse pro Jahr und Hektar möglich sind.

Die oben dargestellten Zuwächse, insbesondere aus den zweiten Rotationsperioden, bewegen sich zum großen Teil über den Ergebnissen anderer Untersuchungen. UNSELD (1999) ermittelte in einem achtjährigen ersten Umtrieb mit sechs Balsampappelklonen Massenleistungen zwischen 3,0 und 7,4 Tonnen Trockenmasse. Interessanterweise zeigten bei seinen Untersuchungen die Standorte mit flach- oder mittelgründigem Lehm schlechtere Zuwachsleistungen als die Moor- und Tonstandorte. Auch die bayerischen Ergebnisse gehen in diese Richtung. Der Zuwachs der auf einem anmoorigen Standort liegenden Versuchsfläche Dornwang II war bereits im ersten Umtrieb hoch. Die feuerletten-geprägte (tonige) Versuchsfläche Coburg zeigte im zweiten Umtrieb sehr gute Zuwächse.

JUG (1998) erzielte die besten Ergebnisse in Bayern mit dem Balsampappelklon Muhle-Larsen, der im Durchschnitt des als Dünge-Versuch konzipierten Projekts im ersten vierjährigen Umtrieb 7,5 Tonnen und im zweiten Umtrieb 6,4 Tonnen Trockenmasse produzierte. Sehr aufschlussreich sind die Ergebnisse der Düngerversuche von JUG (1998). Dabei zeigten Balsampappel und Aspe keinerlei signifikante Wuchssteigerungen nach Gaben von Stickstoff, Kalium, Magnesium und Calcium. Lediglich die Korbweide reagierte auf die Stickstoffgaben mit einem Mehrzuwachs.

Wuchsleistungen von über zehn Tonnen Trockenmasse nennt JUG (1998) nur für die zweite Umtriebszeit einer hessischen Versuchsfläche, auf der Muhle-Larsen über alle gedüngten und ungedüngten Varianten einen Zuwachs von 13 Tonnen aufwies. Allerdings war die Stammzahl der Versuche mit 16.600 Pflanzen pro Hektar sehr hoch.

Sehr hohe Zuwächse beschreibt HOFMANN (1995), der auf einem bayerischen Standort in der zweiten Rotationsperiode für verschiedene Balsampappelklone Zuwächse von sieben bis über 18 Tonnen Trockenmasse pro Jahr und Hektar feststellt. Die Versuchsfläche war allerdings sehr stammzahlreich mit 16.600 Pflanzen pro Hektar begründet worden, außerdem war bei der sehr geringen Parzellengröße der Versuche der Einfluss von Sonderfaktoren nicht auszuschließen.

In Deutschland wurde die Züchtung von Waldbäumen in den letzten dreißig Jahren vernachlässigt. Die letzte Sortenzulassung mit Eintragung in das Bundessortenregister erfolgte bereits 1988 (MEYER et al. 2006). Das macht die Notwendigkeit der Wiederaufnahme der Züchtungsbemühungen insbesondere bei Balsampappeln deutlich. Mit Züchtung können mittelfristig die Zuwachsleistungen in Kurzumtriebsplantagen gesteigert werden, und das ohne zusätzlichen Aufwand an Dünger oder sonstigen Maßnahmen.

## 5. Ernte von Kurzumtriebsplantagen

### 5.1 Einführung und Überblick

#### 5.1.1 Bedeutung der Ernte im Produktionssystem Kurzumtriebsplantage

Im Vergleich zur konventionellen Forstwirtschaft sind Kurzumtriebsplantagen gekennzeichnet durch sehr kurze Umtriebszeiten und hohe Stammzahlen pro Hektar. Wegen der geringen Stückmassen ist die technische Arbeitsproduktivität bei der Ernte derartiger Bestände sehr niedrig. Ein Vorteil ist allerdings die kahlschlagartige Nutzung und die bessere räumliche Ordnung aufgrund des exakten Pflanzverbandes. Dies ermöglicht den Einsatz hochmechanisierter reihengebundener Ernteaggregate.

Die Erntekosten spielen für die Wirtschaftlichkeit des gesamten Produktionssystems KUP eine zentrale Rolle. DÜRRSTEIN und LÖFFLER (1989) schätzen den Anteil der Erntekosten am durchschnittlichen Gesamtaufwand auf 50 bis 80 %. Nach SCHOLZ et al. (2009) bestimmt die Erntetechnologie in hohem Maße die Produktionskosten von Kurzumtriebsplantagen. Deshalb ist es wichtig, alle in der Erntekette vorhandenen Rationalisierungspotenziale auszuschöpfen.

Für die Ernte kommen nur die Monate Dezember bis April in Betracht, da sonst die Ausschlagfähigkeit der Stöcke eingeschränkt würde. Aus Hessen ist bekannt, dass im Mai beerntete, bereits belaubte Balsampappelbestände nicht mehr ausgetrieben haben. Eine Ernte während der Vegetationsruhe hat weiterhin den Vorteil eines minimalen Nährstoffaustrags. JUG (1999) errechnete bei dem Balsampappelklon Muhle-Larsen einen erntebedingten Stickstoffverlust zwischen 19 und 36 Kilogramm pro Hektar und Jahr, was ungefähr dem Stickstoffeintrag aus der Luft entspricht.

Die Ernteverfahren für Kurzumtriebsplantagen kann man nach dem Mechanisierungsgrad in zwei Gruppen unterteilen, die teilmechanisierten und die vollmechanisierten Verfahren.

#### 5.1.2 Teilmechanisierte Verfahren

Das Fällen der schwach dimensionierten Bäume lässt sich mit verschiedenen motorgetriebenen Geräten bewerkstelligen. Dies sind in erster Linie leichte Motorsägen und Freischneidegeräte.

Bei der Arbeit mit einer leichten **Motorsäge** ist der Anteil der Arbeit in gebückter Haltung für den Motorsägenführer aus ergonomischer Sicht problematisch. Bewährt hat sich deshalb der Einsatz eines Zwei-Mann-Trupps, bei dem ein Arbeiter die Bäume mit der Motorsäge vom Stock trennt und ein zweiter Mann die Bäume mit einer Fällgabel gerichtet zu Fall bringt.

Die **Bügelmotorsäge** ist eine in ein Bügelgestell montierte leichtere Motorsäge, die eine aufrechte und damit ergonomisch günstigere Fällhaltung ermöglicht. Die Motorsäge ist horizontal auf einer Bodenplatte drehbar. Der Gasgriff wird über den Bügel betätigt. Durch waagrechtes Drehen wird der Stamm vom Stock getrennt und kann dann mit der linken Hand des Motorsägenführers gerichtet zu Fall gebracht werden. Das Verfahren funktioniert im ersten Umtrieb bis zu einem Trenndurchmesser von zehn Zentimeter (WIPPERMANN und STAMPFER 1995). Die gefällten Bäume werden anschließend gerückt und an einem zentralen Platz gehackt.

Das **Freischneidegerät** mit einem Kreissägenblatt als Schneidwerkzeug ermöglicht die Ernte von Bäumen bis zu einem Trenndurchmesser von zehn Zentimeter. Von Vorteil ist hier die aufrechte Arbeitshaltung. Allerdings ist ein gerichtetes Zufallbringen der Bäume sehr schwierig (WIPPERMANN und STAMPFER 1995 a, b).

Nach dem Fällen folgt das Hacken der Bäume. Dabei sind mehrere Varianten möglich, das Hacken am Fällort, das Rücken und Hacken an einem zentralen Platz oder das Hacken durch einen Großhacker am Heizwerk (DÜRRSTEIN und LÖFFLER 1989).

### **5.1.3 Vollmechanisierte Verfahren**

#### **Fäll-Lege-Maschinen**

Die einzige bekannte Fäll-Lege-Maschine wurde an der Universität für Bodenkultur in Wien entwickelt. Sie ist ein Anbaugerät für die Heckhydraulik eines mittelstarken Schleppers. Als Fällleinrichtung dient ein waagrechtes Kettensägenschwert. Die auf dem Feld abgelegten Bäume müssen anschließend gerückt und gehackt werden. Zeitstudien zur Leistungsfähigkeit dieses Gerätes sind nicht bekannt. Nach HARTMANN und THUNEKE (1997) eignet sich diese Technik nur für den einstämmigen Baumhabitus.

#### **Fäll-Bündel-Maschinen**

Fäll-Bündel-Maschinen sind gezogene oder selbstfahrende Erntemaschinen. Zwei Prototypen wurden in den achtziger Jahren in Skandinavien für die Ernte von Kurzumtriebsplantagen entwickelt. Sie trennen die Stämme reihenweise mit Hilfe von Kreissägen vom Stock, transportieren die Bäume gebündelt auf eine auf der Maschine befindliche Plattform und legen sie an einem Lagerplatz am Feldrand ab (WIPPERMANN und STAMPFER, 1995 a, b). Abbildung 32 zeigt die beiden Prototypen **Fröbbesta** und **ESM 901**.



Abbildung 32: Fäll-Bündel-Maschinen Fröbbesta (links) und ESM 901 (rechts) (Foto: SPINELLI)

Vor ca. zehn Jahren stellten die Firmen Timberjack und Waratah einen speziellen **Mehrfach-Fällkopf mit Bündleinrichtung** (Feller-Buncher) für Harvester der mittleren Leistungsklasse vor. Der Fällkopf verfügt weder über Vorschubwalzen noch über eine Kettensäge. Stämme bis zu einem Trenndurchmesser von 20 Zentimetern werden mit einem waagrecht bewegten Fällmesser vom Stock getrennt. Mit zwei Paaren von Greifklauen, die der Harvester-Fahrer abwechselnd öffnet und schließt, werden mehrere Bäume geerntet und gebündelt. Der Zweck dieses Fällkopfs ist eine wirtschaftliche Ernte bisher defizitärer Sortimente vor allem für die energetische Verwertung. Im Energieholz-Boom der letzten Jahre kamen noch einige andere Bündelaggregate auf den Markt. Zu nennen sind der Naarva-Grip Fällkopf (Abbildung 33) oder die Sammelaggregate ABAB 350 und Bracke C 16.a. Zeitstudien mit diesen Geräten im Durchforstungsbereich führten EBERHARDINGER et al. (2009) durch.



Abbildung 33: Mehrfach-Fällkopf Naarva-Grip 1500-40E an Bagger-Chassis

## Harvester

Auch die **Harvestertechnologie** kann für die Fällung der Bäume eingesetzt werden. SCHOLZ et al. (2009) empfehlen diese Technik bei Ernteintervallen von mindestens zehn Jahren.

## Hackschnitzel-Vollernter

Als Hackschnitzel-Vollernter bezeichnet man Maschinen, die die Bäume in einem Arbeitsgang vom Stock trennen und hacken. Mehrere Typen wurden in Deutschland im Versuchseinsatz erprobt. Diese Erntetechnik, bei SCHOLZ et al. (2009) als „Einphasenernte“ bezeichnet, stellt ein besonders effizientes Arbeitssystem dar. Dieses wurde in mehr als zwanzig Entwicklungen weltweit erprobt, aber meist nicht zur Praxisreife geführt (SCHOLZ et al. 2006).

Der **Claas Jaguar** ist ein selbstfahrender modifizierter Maishäcksler, der für die Ernte von Korbweiden in Schweden konstruiert wurde. Eine Frontgabel setzt die Bäume unter Spannung, so dass das abgetrennte Stammende in den Einzugschacht gedrückt wird. Der Vollernter arbeitet mit zwei Kreissägen zweireihig im sogenannten „Parallelverfahren“ (HARTMANN und THUNEKE 1997), das heißt, neben der Erntemaschine fährt ein Traktor mit einem Anhänger, auf den die Hackschnitzel geblasen werden. Die Maschine erntet Korbweiden mit ihrem strauchartigen Habitus sehr effektiv, hat bei Balsampappeln aber Probleme. Der Claas Jaguar wurde im Jahr 2001 in Baden-Württemberg in der Pappelernte getestet (TEXTOR 2003).



Abbildung 34: Claas Jaguar mit Weiden-Gebiss (links) (Foto: SPINELLI), Austoft 7700 bei der Weidenernte (rechts)

Den **Austoft 7700** entwickelte die australische Firma Austoft Industries für die Zuckerrohrernte. Der Erntevorgang ähnelt dem des Claas-Häckslers. Eine Abweisergabel drückt die Stämme nach vorn, zwei Kreissägenblätter trennen sie von den Stöcken. Vertikal rotierende Walzen und ein Einzugsmechanismus führen die Stämme horizontal in das Hackaggregat. Der Transport der Hackschnitzel erfolgt durch ein parallel fahrendes Hängergespann.

Der **Gehölmähhäcksler (Mäh Hacker)** wurde von Wieneke und Döhner (WIENEKE 1993; DÖHRER 1995b) speziell für die Ernte von Balsampappel-Kurzumtriebsplantagen entwickelt. Die einreihig arbeitende Maschine ist ein Frontanbaugerät für Schlepper ab 90 KW. Sie erntet

mit angehängtem Kipper oder mit parallel fahrendem Schleppergespann zur Aufnahme der Hackschnitzel (Bunker- bzw. Parallelverfahren nach HARTMANN und THUNEKE 1997).

Der Vorsatz der Firma **Biomasse Europa** ist ein Anbaugerät für alle gängigen Maishäcksler. Nach Angaben der Firma ist der Vorsatz in der Lage, Balsampappeln bis zu einem Stockdurchmesser von zwölf Zentimeter zu ernten. Das Gerät ist mit einer Abweiser-Gabel ausgestattet und ähnelt dem **Claas**-Gebiss.



Abbildung 35: Vorsatz der Firma Biomasse Europa (links), Vollernter der Firma Krone (rechts)

Eine Maschine aus Deutschland wurde vor einigen Jahren von der Firma **Krone** vorgestellt. Auch hier handelt es sich um ein spezielles Holz-Gebiss an einem Maishäcksler-Chassis des Herstellers.

## 5.2 Arbeitsstudien

### 5.2.1 Zielsetzung

Die Erntemaßnahmen auf den bayerischen KUP-Versuchsflächen wurden möglichst praxisnah durchgeführt, um mit den Arbeitsstudien ein realistisches Bild der Einsätze zeichnen zu können. Mehrere Erntesysteme, beginnend bei den motormanuellen Verfahren über Fäller-Bündler- und Harvestertechnologie bis hin zur vollautomatischen Erntetechnik wurden getestet. Die Datenerfassung und -auswertung erfolgte mit den im forstlichen Arbeitsstudium üblichen Methoden (REFA 1991). Die Ziele dabei waren:

- die Ermittlung der Praxistauglichkeit und Leistungsfähigkeit der Ernteverfahren;
- die Optimierung insbesondere der motormanuellen Verfahren hinsichtlich der Ergonomie;
- die Zeitstudien sollten die Basis für eine vergleichende Ökobilanzierung des Landnutzungssystems Kurzumtriebsplantage bilden.

### 5.2.2 Material und Methoden

Die den Arbeitsstudien zugrundeliegende Methodik entspricht der von REFA empfohlenen Vorgehensweise (REFA 2003). Die Zeiten wurden mit mobilen Datenerfassungsgeräten erfasst und lassen sich in **reine Arbeitszeit** (RAZ) und **allgemeine Zeiten** (AZ) aufteilen. Die RAZ umfasst alle planmäßigen, der Erfüllung der Arbeitsaufgabe dienenden, regelmäßig auftretenden Zeiten (LÖFFLER 1988). Die AZ dienen nicht unmittelbar der Erfüllung der Arbeitsaufgabe oder können dieser nicht zugeordnet werden. RAZ und AZ zusammen ergeben die Gesamtarbeitszeit (GAZ). Zum Teil waren die Anteile der allgemeinen Zeiten an der Gesamtarbeitszeit in den Arbeitsstudien nicht repräsentativ. In diesen Fällen wurde für die Leistungsrechnung ein pauschaler Zuschlag für die allgemeinen Zeiten gegeben. Für die anschließende Ökobilanzierung ist dies nicht von Bedeutung, da hierzu nur die Zeiten herangezogen werden, in denen die Maschinen arbeiten.

Die Bezugseinheit ist immer die Masse der geernteten Bäume. Diese wurde mit Hilfe eines Schätzverfahrens (Kapitel 4.2.2.2) vorher bestimmt. Je nach Ernteverfahren gehen die Massen von Parzellenreihen, Reihen über mehrere Parzellen oder ganze Parzellen als Bezugseinheiten in die Auswertung ein.

### 5.2.3 Untersuchte Erntelinien

Sieben Erntelinien wurden für eine Bewertung durch die Ökobilanzierung aufbereitet. Fünf davon im fünfjährigen Umtrieb, davon wiederum drei motormanuelle und zwei vollmechanisierte Verfahren. Jeweils ein motormanuelles und ein vollmechanisiertes Verfahren wurden im zehnjährigen Umtrieb getestet.

#### 5.2.3.1 Motormanuelles Fällen - Hacken handbeschickt

Tabelle 16: Daten zur Arbeitsstudie „Motormanuelles Fällen – Hacken handbeschickt“

Versuchsfläche:	Wöllershof
Alter:	fünfjähriger Aufwuchs auf elfjähriger Wurzel (2. Rotationsperiode)
Flächengröße:	0,68 Hektar
Erntemasse:	78,7 t Frischmasse
Erntemasse/Hektar:	115,7 t Frischmasse
Mittlerer BHD:	4,89 cm
Pflanzverband:	2,5 * 0,6 m
Erntezeitpunkt	Mitte Februar bis Mitte März bei einer Schneedecke von 10 - 30 cm
Baumarten (massegewichtet):	94,4 % Balsampappel, 5,6 % Aspe
Maschinen:	Motorsäge Stihl 026 Anbauhacker Pöttinger WI-DU an Schlepper Case 130 CS, 96 kW Anhängergespann John Deere 6230, 66 kW, mit Kipper mit Tandemachse

## **Arbeitsverfahren**

Zur Fällung der Pappeln wurden Zwei-Mann-Teams gebildet. Der Motorsägenführer übernahm den Fällschnitt, der zweite Arbeiter brachte die Bäume mit einer Fällgabel gerichtet zu Fall. Der Trupp wechselte sich nach einem selbst gewählten Rhythmus mit den Arbeiten ab, wodurch die körperliche Belastung der Motorsägenarbeit reduziert und ganztägiges Arbeiten ermöglicht wurde.

Die händische Beschickung des Hackers erfolgte mit drei bis vier Arbeitern. Das Fahrzeug mit dem Hacker wechselte bei Bedarf die Position, um eine möglichst geringe Beiziehentfernung zu erreichen.

## **Zeitstudien - Methodik**

Als Zyklus wurde das **Fällen** einer Parzellenreihe definiert, um einem in sich geschlossenen, gleichmäßig wiederkehrenden Vorgang (Zyklus) eine exakte Erntemasse zuordnen zu können.

Folgende Ablaufabschnitte wurden erfasst:

- Fällen
- Gehen
- Störung
- Sonstige Zeiten
- Sachliche Verteilzeiten
- Persönliche Verteilzeiten

Den **Hackvorgang** erfasste man ohne Einteilung in Zyklen. Als Ablaufabschnitte wurden definiert:

- Fahren
- Hacken
- Anhängerwechsel/EZ

Die Allgemeinen Zeiten (Rüsten, sachliche und persönliche Verteilzeiten, sonstige Zeiten, Störungen) wurden später pauschal zugeschlagen.

## Bezugsmaße

Als Bezugsmaß zur Ermittlung der Technischen Arbeitsproduktivität (TAP) dienten die Massen der Parzellenreihen. Da beim Hacken keine zyklische Aufnahme möglich war, wurden den gemessenen Zeiten die am jeweiligen Tag gehackten Mengen gegenübergestellt.



Abbildung 36: Motormanuelles Fällen und handbeschicktes Hacken

### 5.2.3.2 Motormanuelles Fällen - Hacken kranbeschickt

Tabelle 17: Daten zur Arbeitsstudie „Motormanuelles Fällen – Hacken kranbeschickt“

Versuchsfläche:	Wöllershof
Alter:	fünfjähriger Aufwuchs auf elfjähriger Wurzel (2. Rotationsperiode)
Flächengröße:	0,82 Hektar
Erntemasse:	105,6 t Frischmasse
Erntemasse/Hektar:	128,8 t Frischmasse
Mittlerer BHD:	4,93 cm
Pflanzverband:	2,5 * 0,6 m
Erntezeitpunkt:	Mitte Februar bis Mitte März, Schneedecke 20 Zentimeter
Baumarten (massegewichtet):	77,4 % Balsampappel, 20,1 % Aspe, 2,5 % Roterle
Maschinen:	Motorsäge Stihl 026 Eschlböck Biber 7 an Schlepper Case 150 CS, 110 kW Anhängergespann John Deere 6230, 74 kW, mit Kipper

## Arbeitsverfahren

Für diese Erntelinie erstellte man beim Fällen keine eigene Arbeitsstudie (siehe Kapitel 5.2.3.1).

Um praxisgerecht arbeiten zu können, wurden für die Arbeitsstudie mit dem kranbeschickten Hacker mehrere benachbarte Parzellen als Ernteeinheit definiert. Das Hackergespann fuhr immer im rechten Winkel zu den gefälltten Stämmen, so dass der Kran die Stämme dicktörtig,

meist von rechts in den Hackereinzug einführen konnte. Sobald der Kranführer alle Bäume in Reichweite gehackt hatte, setzte das Gespann um. Parallel zum Hackergespann fuhr ein Schlepper mit Hänger zur Aufnahme des Hackgutes.

### **Zeitstudien - Methodik**

Fällvorgang siehe Kapitel 5.2.3.1.

Das **Hacken** erfasste man wie bei Kapitel 5.2.3.1 ohne Einteilung in Zyklen. Folgende Ablaufabschnitte wurden definiert:

- Fahren (innerhalb der Erntereihen)
- Hacken
- Umsetzen (ringförmiges Umsetzen zum nächsten Ausgangspunkt)

Die Berücksichtigung der Allgemeinen Zeiten (Rüsten, persönliche und sachliche Verteilzeit, sonstige Zeiten) erfolgte pauschal.



Abbildung 37: Motormanuelles Fällen, kranbeschickter Hacker

### **Bezugsmaße**

Als Bezugsmaß beim Fällen verwendete man die Massen der Parzellenreihen. Da für den Hackvorgang keine Zyklen definiert werden konnten, wurden den gemessenen Zeiten die gehackten Mengen eines Tages gegenübergestellt.

### **5.2.3.3 Motormanuelles Fällen - Vorkonzentrieren - Hacken kranbeschickt**

#### **Arbeitsverfahren**

Die Bäume fällte wie in Kapitel 5.2.3.1 und 5.2.3.2 ein Zwei-Mann-Trupp. Anschließend schob einer der Arbeiter mit einem landwirtschaftlichen Schlepper mit Frontlader die gefällte Reihe auf einen Haufen zusammen. Die Vorgänge „Fällen“ und „Vorkonzentrieren“

wechselten sich ab, so dass eine in einer Flucht liegende Ernteschlaue entstand. Die Ernteschlaue wurde anschließend von einem kranbeschickten Hacker gehackt. Das Hackergespann fuhr direkt an die Schlaue heran, das Transport-Gespann positionierte sich direkt daneben, um die Hackschnitzel aufzunehmen. Sobald das Hackgut in Reichweite des Krans gehackt war, wurden die Gespanne umgesetzt.

Tabelle 18: Daten zur Arbeitsstudie „Motormanuelles Fällen – Vorkonzentrieren – Hacken kranbeschickt“

Versuchsfläche:	Wöllershof
Alter:	fünfjähriger Aufwuchs auf elfjähriger Wurzel (2. Rotationsperiode)
Flächengröße:	0,43 Hektar
Erntemasse:	55,8 t Frischmasse
Erntemasse/Hektar:	129,7 t Frischmasse
Mittlerer BHD:	5,49 cm
Pflanzverband:	2,5 * 0,6 m
Erntezeitpunkt	Mitte Februar bis Mitte März bei 20 Zentimeter Schneelage
Baumarten:	100 % Balsampappel
Maschinen:	Motorsäge Stihl 026 zum Vorkonzentrieren Schlepper Deutz-Fahr, 66 kW, mit Frontlader + Gabel Eschlböck Biber 7 an Schlepper Case 150 CS, 110 kW Anhängergespann John Deere 6230, 74 kW mit Kipper

### Zeitstudien - Methodik

Als ein Zyklus wurde das **Fällen und Vorkonzentrieren** einer Parzellenreihe definiert. Folgende Ablaufabschnitte wurden erfasst:

- Fällen
- Gehen
- Vorkonzentrieren
- Sachliche Verteilzeiten
- Persönliche Verteilzeiten
- Sonstige Zeiten

Beim **Hacken** wurden wie in Kapitel 5.2.3.1 und 5.2.3.2 keine Zyklen definiert, sondern nur die Einzelzeiten aufgezeichnet. Folgende Ablaufabschnitte wurden festgelegt:

- Fahren (innerhalb einer Ernteschlaue)

- Hacken
- Anhängerwechsel
- Umsetzen (von einer Ernteschlaue zur nächsten)

Der Zuschlag der Allgemeinen Zeiten (Rüsten, persönliche und sachliche Verteilzeiten, sonstige Zeiten) erfolgte pauschal.

### Bezugsmaße

Bei der Teilarbeit Fällen und Vorkonzentrieren dienen die Massen der gernteten Parzellenreihen als Bezugsmaß.

Beim Hacken wurden die in der Ernteschlaue enthaltenen Massen der Parzellenreihen herangezogen. Als Kontrollmaß diente die Zahl der gefüllten landwirtschaftlichen Anhänger.



Abbildung 38: Motormanuelles Fällen, Vorkonzentrieren, kranbeschicktes Hacken

#### 5.2.3.4 Fäller-Bündler - Rücken - Hacken am zentralen Platz

Tabelle 19: Daten zur Arbeitsstudie „Fäller-Bündler - Rücken - Hacken am zentralen Platz“

Versuchsfläche:	Dornwang II
Alter:	fünf Jahre (1. Rotationsperiode)
Flächengröße:	1,76 Hektar
Erntemasse:	117,0 t Frischmasse
Erntemasse/Hektar:	66,3 t Frischmasse
Mittlerer BHD:	6,80 cm
Pflanzverband:	1,5 * 0,8 m
Erntezeitpunkt:	Fällung Januar bei trockenem Wetter, Rücken und Hacken April 2002
Baumarten:	100 % Balsampappel
Maschinen	Harvester Timberjack 870 mit Fäller-Bündler Fällkopf 720 Rückegerät Ponsse S 16 Buffalo Hacker Heizomat an Schlepper John Deere 7810, 147 KW

## Arbeitsverfahren

Der Maschinenführer des Fäller-Bündlers erntete die Versuchspartzen getrennt, damit der Bezug zwischen Parzellenmasse und benötigter Zeit eindeutig hergestellt werden konnte. Die Bündel mit den Pappeln wurden von dem Fällkopf im 45°-Winkel zur Fahrtrichtung abgelegt. Somit waren zwei Möglichkeiten für das Hacken der Bäume gegeben: das Hacken auf der Fläche oder das Rücken der Bäume und Hacken an einem zentralen Platz. Auf Vorschlag des Hackerunternehmers kam das zweite Verfahren zur Anwendung, da durch die höhere Produktivität des Hackers bei stationärem Einsatz Kostenvorteile zu erwarten waren. Der Forwarder rückte die Bäume zu zwei Poltern an den Stirnseiten der Versuchsfläche.

## Zeitstudien - Methodik

Bei der Ernte der Bäume wurden Fällen und Ablegen eines Pappelbündels als Zyklus definiert. Folgende Ablaufabschnitte wurden erfasst:

- Fällen/Bündeln
- Ablegen
- Fahren
- Systembedingte Verteilzeiten (VS)
- Persönlich bedingte Verteilzeiten (VP)
- Sonstige Zeiten.

Beim Rücken ermittelte man zur Berechnung der Technischen Arbeitsproduktivität lediglich die Gesamtdauer des Forwardereinsatzes.

Um die Produktivität des Hackvorgangs zu ermitteln, wurde der Zeitbedarf pro Containerfüllung gemessen (Zyklus).



Abbildung 39: Fäller-Bündler bei der Fällung von Pappeln

## Bezugsmaße

Da der Fäller-Bündler Reihen übergreifend arbeitete diente als Bezugsmaß die Gesamtmasse einer Parzelle. Beim Rücken und Hacken stellte man den gemessenen Zeiten die Masse der gerückten Bäume bzw. der produzierten Hackschnitzel gegenüber.

### 5.2.3.5 Gehölmähhäcksler

Tabelle 20: Daten zur Arbeitsstudie „Gehölmähhäcksler“

Versuchsfläche:	Kammern
Alter:	fünf Jahre (1. Rotationsperiode)
Flächengröße:	1,01 Hektar
Erntemasse:	86,8 t Frischmasse
Erntemasse/ha:	86,1 t Frischmasse pro Hektar
Mittlerer BHD:	4,6 cm
Pflanzverband:	1,0 * 0,8 m
Erntezeitpunkt:	März
Baumarten:	100 % Balsampappel
Maschinen:	Gehölmähhäcksler System Wieneke/Döhrrer an JCB Fasttrac, 95 kW zwei Schlepper, 73 kW mit Kipper

Der Gehölmähhäcksler beerntete insgesamt fünf Versuchsflächen. Die Ernte der Versuchsfläche Kammern wurde für die Darstellung in der Ökobilanzierung gewählt, da die Biomasseproduktion auf dieser Fläche bereits im ersten Umtrieb relativ hoch war und der für die Ökobilanzierung getroffenen Annahme von zehn Tonnen absolut trockene Biomasse pro Jahr und Hektar am besten entsprach. Zudem lagen bei der Ernte der Versuchsfläche die Leistungen der Maschine im mittleren Bereich, so dass der Ernteeinsatz in Kammern als repräsentativ angenommen werden kann.

## Arbeitsverfahren

Der Gehölmähhäcksler (Mäh Hacker) wurde speziell für die Ernte von Balsampappel-Kurzumtriebsplantagen vom Institut für Landtechnik der Universität Göttingen in Zusammenarbeit mit dem hessischen Forstamt Diemelstadt entwickelt (WIENEKE 1993). Er wird an die Fronthydraulik eines landwirtschaftlichen Schleppers angebaut und über die Frontzapfwelle angetrieben. Der Gehölmähhäcksler arbeitet einreihig. Balsampappeln mit einem Stockdurchmesser von bis zu zwölf Zentimeter werden von einem Kreissägeblatt vom Stock getrennt und mit einer auf dem Sägeblatt montierten Hackschnecke zerkleinert. Durch die hohe Drehzahl der Hackschnecke werden die Hackschnitzel auf ein parallel fahrendes Schlepper-Anhänger-Gespann (Parallel-Verfahren) oder auf einen vom Ernteschlepper gezogenen Anhänger geworfen (Bunker-Verfahren) (HARTMANN & THUNEKE, 1997).

Die Ernte der Versuchsfläche Kammern erfolgte im Parallelverfahren (Abbildung 40). Neben der Erntemaschine waren zwei Schlepper mit Hänger im Einsatz, von denen immer einer parallel neben der Erntemaschine fuhr. Die Hänger waren meist nach zwei beernteten Reihen gefüllt, der Schlepper brachte die Hackschnitzel dann zu einer 2,5 Kilometer entfernten Lagerhalle. Während dieser Zeit nahm der zweite Schlepper die Hackschnitzel auf. In der Übungsphase für den Fahrer der Erntemaschine wurde zunächst versucht, das rechteckig angelegte Versuchsfeld in einer Art „Rundfahrt“ zu ernten, d. h. nach einer Erntereihe stirnseitig zur nächsten gegenüberliegenden Erntereihe zu fahren, um diese in entgegengesetzter Richtung zu hacken. Dadurch wäre es möglich gewesen, unnötige Leerfahrten einzusparen. Dieses Verfahren konnte jedoch nicht umgesetzt werden, da der Schlepper mit dem Mähacker beim Hacken der am Oberhang liegenden Reihen wegen der Hangneigung in die Nachbarreihe geschoben wurde. In Folge dessen konnte nur einseitig vom Unterhang her geerntet werden. Nach dem Hacken einer Reihe musste der Gehölmähhäcksler deshalb in Leerfahrt zum Ausgangspunkt zurückfahren und dort mit der Ernte der nächsten Reihe beginnen. Damit erhöhte sich der Anteil an Fahrzeit, was sich negativ auf die Produktivität des Erntesystems auswirkte.

Der Fahrer des Schleppers wurde in einer fast zweitägigen Übungsphase mit dem Mähacker vertraut gemacht. Nach diesem Zeitraum hatte er die Übungsschwelle erreicht und konnte das Aggregat sicher einsetzen.

### **Zeitstudien - Methodik**

Die Versuchsfläche Kammern besteht aus 76 jeweils 180 Meter langen Reihen von Balsampappeln. Als Zyklus wurde die Beerntung einer Reihe definiert. Folgende Ablaufabschnitte wurden erfasst:

- Mähhacken
- Fahren
- Systembedingte Verteilzeiten (VS)
- Persönlich bedingte Verteilzeiten (VP)
- Sonstige Zeiten (versuchsbedingte Unterbrechungen, Besprechungen, Pausen).

Der Ablaufabschnitt Mähhacken begann mit dem Trennschnitt des ersten Baumes einer Reihe und endete, wenn der letzte Baum einer Reihe komplett gehackt war. Fahrzeiten traten jeweils bei den Leerfahrten zurück zum Ausgangspunkt auf. Sie begannen, wenn der letzte Baum gehackt war und endeten, wenn der Trennschnitt am ersten Baum der nächsten Reihe erfolgte. Als systembedingte Verteilzeiten wurden Störungen, wie z. B. das Verstopfen des

Auswurfrohres, lockerer Keilriemen und deren Behebung erfasst. Persönlich bedingte Verteilzeiten waren beispielsweise Besprechungen des Maschinenführers mit dem Fahrer des parallel fahrenden Schleppers.



Abbildung 40: Gehölmähhäcksler beim Hacken von Pappeln

### Bezugsmaß

Als Bezugsmaß wurde die Masse einer Reihe mit einer Länge von 180 m herangezogen. Als Kontrollmaß diente die Zahl der gefüllten Anhänger.

#### 5.2.3.6 Motormanuelles Fällen - Rücken - Hacken am zentralen Platz

Tabelle 21: Daten zur Arbeitsstudie „Motormanuelles Fällen – Rücken – Hacken am zentralen Platz“

Versuchsfläche:	Neuhof
Alter:	zehn Jahre (1. Rotationsperiode)
Flächengröße:	2,46 Hektar
Erntemasse:	323,9 t Frischmasse
Erntemasse/Hektar:	131,9 t Frischmasse
Mittlerer BHD:	7,62 cm
Pflanzverband:	2,5 * 1,2 m, 2,5 * 0,6 m
Erntezeitpunkt:	Fällung und Rücken Ende März, Hacken im September/Okttober
Baumarten (massegewichtet):	45,6 % Balsampappel, 39,2 % Aspe, 15,2 Roterle
Maschinen:	Motorsägen Stihl 024, 026; Forstspeziialschlepper HSM, 85 kW Stationärer Großhacker Heizomat mit separatem Dieselmotor Deutz, 161 kW, Zwei Schlepper mit 66 kW u. 121 kW zum Versetzen von Hacker und Container

### Arbeitsverfahren

Die zehn Jahre alten Bäume wurden von Zwei-Mann-Trupps gefällt (siehe Kapitel 5.2.3.1) und anschließend zu nahe gelegenen Lagerplätzen gerückt. Nach Abtrocknung der Stämme

während des Sommers erfolgte das Hacken mit dem stationären Großhacker. Die Hackschnitzel wurden direkt auf Schlepper-Anhänger-Gespanne oder in Hakenlift-Container geworfen (Abbildung 41).

### **Zeitstudien - Methodik**

Zur Methodik der Fäll-Zeitstudie siehe Kapitel 5.2.3.1. Beim Rücken wurde als Zyklus das Be- und Entladen eines Ruckeanhängers festgelegt. Folgende Ablaufabschnitte wurden definiert:

- Leerfahrt
- Laden
- Lastfahrt
- Entladen
- Störungen
- Sachliche Verteilzeiten
- Persönliche Verteilzeiten
- Sonstige Zeiten



Abbildung 41: Motormanuelles Fällen, Rücken, Hacken am zentralen Platz

### **Bezugsmaße**

Als Bezugsmaße zur Ermittlung der TAP dienten beim Fällen die Massen der Parzellenreihen. Um möglichst praxisnahe Daten zu bekommen, musste davon beim Rücken abgewichen werden. Als Bezugsmaß wurden immer zwei bis drei Versuchsparzellen festgelegt, die nebeneinander lagen und günstig zu bearbeiten waren. Diesen Ernteeinheiten wurden die bei der Arbeitsstudie aufgenommenen Zeiten gegenübergestellt. Insgesamt wurden zwölf Ernteeinheiten gerückt. Beim Hacken erfolgte eine einfache Zeitaufschreibung.

### 5.2.3.7 Harvesterfällung – Rücken – Hacken

Tabelle 22: Daten zur Arbeitsstudie „Harvesterfällung – Rücken – Hacken“

Versuchsfläche:	Wöllershof
Alter:	zehn Jahre (1. Rotationsperiode)
Flächengröße:	1,16 Hektar
Erntemasse:	196,0 t Frischmasse
Erntemasse/Hektar:	169,1 t Frischmasse
Mittlerer BHD:	10,7 cm
Pflanzverband:	2,5 * 1,2 m
Erntezeitpunkt:	Fällung im März, Rücken und Hacken im April
Baumarten (massegewichtet):	82,1 % Balsampappel, 14,7 % Aspe, 3,2 % Robinie
Maschinen:	Harvester Timberjack 1270A mit Aggregat 746C*

\*bei Rückung und Hacken wurden in Wöllershof keine repräsentativen Zeitstudien angefertigt, zur Ökobilanzierung werden deshalb die Daten der Ernte Neuhof (5.2.3.6) herangezogen

#### Arbeitsverfahren

Der Harvester sollte in seinem Arbeitsfortschritt möglichst wenig von dem Versuchsflächendesign beeinträchtigt werden. In Absprache mit dem Maschinenführer wurde deshalb bei einer Überfahrt jeweils eine Ernteeinheit von drei Reihen gefällt und abgelegt. Da die Anzahl der Reihen in den Parzellen schwankte, lag eine Ernteeinheit zum Teil in zwei Parzellen. Da die aufstockenden Massen reihenscharf ermittelt worden waren, war ein Bezug der ermittelten Zeiten auf die Massen möglich. Die geernteten Bäume wurden in Bündeln konzentriert abgelegt. Gerückt wurde auf einen Polter an der Zufahrtsstraße. Das Hacken erfolgte an der Zufahrtsstraße.



Abbildung 42: Raupenharvester bei der Ernte von Pappeln

#### Zeitstudien - Methodik

Die Festlegung der Zyklen und Ablaufabschnitte erfolgte analog zu Kapitel 5.2.3.4.

## **Bezugsmaß**

Als Bezugsmaß wurde die Masse der Ernteeinheit, also der gleichzeitig beernteten drei Parzellenreihen verwendet.

## **5.3 Ergebnisse**

Die sachlichen und persönlichen Verteilzeiten sowie die Störungszeiten sind in kürzeren Arbeitsstudien nicht repräsentativ. Auch bei den hier vorgestellten Erntelinien schwankten die sonstigen Zeiten stark. Um für die Technische Arbeitsproduktivität (TAP) realistische Werte zu erhalten, wurden bei Berechnung der Gesamtarbeitszeit (GAZ) deshalb auf die reinen Arbeitszeiten (RAZ) pauschale Werte aufgeschlagen. Diese liegen bei den motormanuellen Fällarbeiten bei 20 Prozent, bei den vollmechanisierten Teilarbeiten Rücken und Hacken bei 15 Prozent und beim körperlich sehr belastenden händischen Hacken, das längere Erholzeiten notwendig macht, bei 25 Prozent. Eine Ausnahme bildet die Zeitstudie des Gehölmähähäckslers. Die sonstigen Zeiten lagen hier genau im Rahmen und wurden beibehalten. Die TAP pro Stunde Gesamtarbeitszeit (GAZ) wird immer auf die Frischmasse geernteten Holzes bezogen. Durch Einbeziehung der massegewichteten Wassergehalte kann bei jeder Erntelinie auf die entsprechenden TAP-Werte für absolut trockene Biomasse (atro) geschlossen werden.

Auf eine Verwendung von z. T. gebräuchlichen Umrechnungsfaktoren von Tonnen atro auf Schüttraummeter Hackschnitzel wie bei DÜRRSTEIN und LÖFFLER (1989) wird in dieser Arbeit verzichtet. Die Lagerungsdichte von Hackschnitzeln schwankt abhängig von ihrer Größe und hängt außerdem noch von Hacker und Transportentfernung (Verdichtung) ab. Die Einheit Schüttraummeter bietet deshalb kein wissenschaftlich objektives Maß.

Mögliche Ernteverluste, wie liegengebliebene Äste oder verlorene Hackschnitzel, bei HARTMANN und THUNEKE (1997) mit 2 - 5 Prozent angegeben, werden hier nicht berücksichtigt. Die ermittelten Zeiten und technischen Arbeitsproduktivitäten beziehen sich immer auf die mit den statistischen Methoden in Kapitel 4.2.2.2 geschätzten kompletten Massen der aufstockenden Bestände.

### **5.3.1 Motormanuelles Fällen – Hacken handbeschickt**

#### **Zeitanteile und Leistung Motormanuelles Fällen**

Bei der Teilarbeit „Motormanuelles Fällen“ erreichte die reine Arbeitszeit (RAZ) mit den Ablaufabschnitten „Fällen“ und „Gehen“ zum Anfang der nächsten Parzellenreihe 81 Prozent der Arbeitszeit. Den zweitgrößten Anteil nehmen die persönlichen Verteilzeiten ein. Hier sind vor allem kurze Erholzeiten zusammengefasst. Die sachlichen Verteilzeiten beinhalten das

Betanken der Motorsäge und das Nachspannen der Kette. Die sonstigen Zeiten bestehen im Wesentlichen aus Unterbrechungen, in denen die Arbeiter während der Zeitstudie eingewiesen wurden (Abbildung 43).

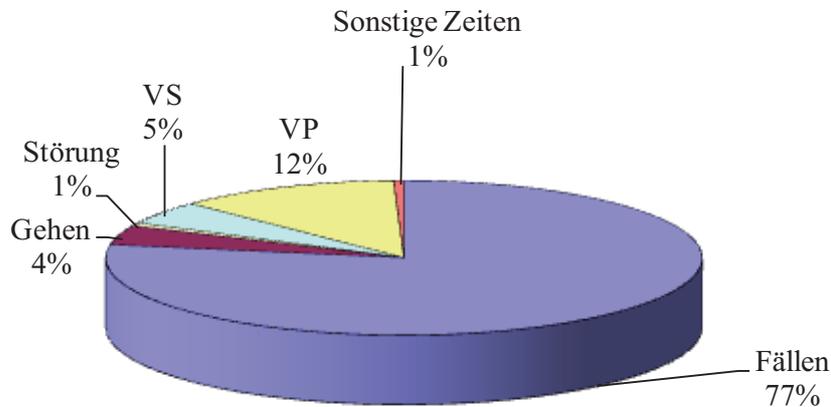


Abbildung 43: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „Motormanuelles Fällen“

Die gesamte Zeitstudie umfasste 1242,55 Minuten. Insgesamt wurden 178 Parzellenreihen mit ca. 20 Metern Länge gefällt. Der durchschnittliche Zeitbedarf pro Parzellenreihe betrug 5,42 Minuten (Tabelle 23).

Tabelle 23: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Motormanuelles Fällen“

	Anzahl N	Minimum (min)	Maximum (min)	Summen (min)	Mittelwerte (min)
<b>Fällen</b>	178	2,27	17,14	965,40	5,42
<b>Gehen</b>	163	0,05	3,00	50,59	0,31
<b>Störung</b>	4	0,15	6,87	8,32	2,08
<b>VS</b>	23	0,20	6,68	60,76	2,64
<b>VP</b>	27	0,13	14,44	150,58	5,58
<b>Sonstige Zeiten</b>	5	0,23	3,28	6,92	1,38
<b>Gesamtergebnis</b>				1242,55	

Tabelle 24: Leistungswerte der Teilarbeit „Motormanuelles Fällen“

	Anzahl N	Minimum	Maximum	Mittelwert
<b>TAP (t FM/h GAZ)</b>	178	1,8	12,76	5,83

Die Durchschnittsleistung eines Fälltrupps lag bei 5,83 Tonnen Frischmasse in der Stunde (Tabelle 24). Der durchschnittliche Wassergehalt der gefällten Parzellenreihen betrug 60,2 Prozent. Bezogen auf absolut trockene Biomasse ergibt sich daraus eine durchschnittliche TAP von 2,32 Tonnen/Stunde GAZ.

**Zeitanteile und Leistung Hacken handbeschickt**

Die Arbeitsstudie dauerte 899,51 Minuten. Der Hackvorgang nimmt nach Abbildung 44 nur einen Anteil von 46 Prozent ein. Der Ablaufabschnitt Anhängerwechsel/EZ (Erholzeit) wurde bewusst erfasst, weil es bei dieser körperlich extrem belastenden Teilarbeit wichtig war, eine Erholungsphase einzubauen. Der Ablaufabschnitt nahm dementsprechend immerhin 29 % ein. Rechnet man noch die persönlichen Verteilzeiten mit vier Prozent dazu, so entfällt ein Drittel der erfassten Zeiten auf Erholzeiten.

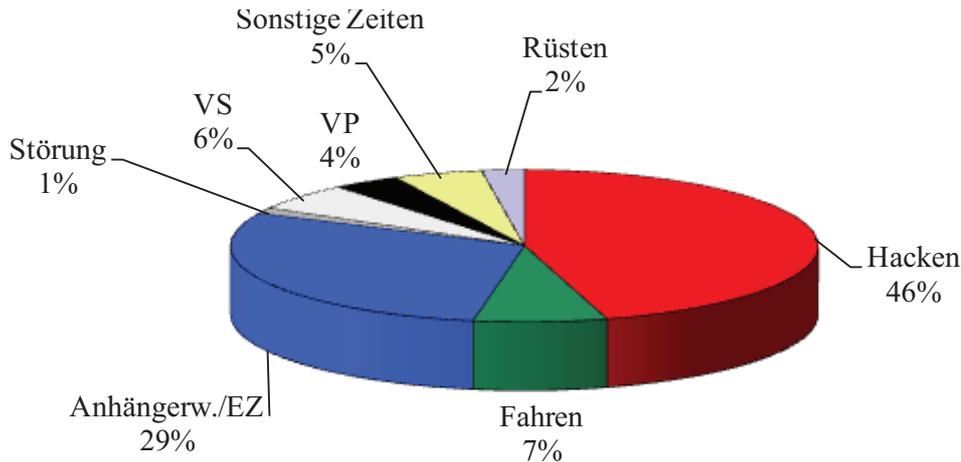


Abbildung 44: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „handbeschicktes Hacken“

Tabelle 25: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Hacken handbeschickt“

	Anzahl N	Minimum (min)	Maximum (min)	Summe (min)	Mittelwerte (min)
<b>Hacken</b>	69	0,55	12,12	409,02	5,93
<b>Fahren</b>	45	0,10	3,10	65,90	1,46
<b>Anhängewechsel/EZ</b>	15	8,35	24,18	262,90	17,53
<b>VS</b>	6	0,52	29,13	51,90	8,65
<b>VP</b>	10	0,43	12,52	33,42	3,34
<b>Störung</b>	5	0,45	3,93	11,20	2,24
<b>Sonstige Zeiten</b>	13	0,28	11,63	44,16	3,40
<b>Rüsten</b>	9	0,20	6,70	21,02	2,34
<b>Gesamtergebnis</b>				899,51	

Da bei den Arbeitsstudien zum Hacken keine Zyklen definiert wurden, erfolgte die Herleitung der technischen Arbeitsproduktivität (TAP) nach Tagen getrennt (Tabelle 26).

Tabelle 26: Leistungswerte der Teilarbeit „Hacken handbeschickt“

	1. Aufnahmetag	2. Aufnahmetag	3. Aufnahmetag	4. Aufnahmetag	Mittelwert
<b>TAP (t FM/h GAZ)</b>	8,14	4,04	3,93	3,34	4,86

Zur Ermittlung der TAP, bezogen auf die GAZ, wurde bei dem händisch beschickten Hacker, abweichend von den anderen Erntelinien, für die allgemeinen Zeiten ein pauschaler Zuschlag von 25 Prozent gewählt. Dieser erhöhte Zuschlag ergibt bei diesem sehr anstrengenden Arbeitsverfahren realistischere Werte als die in der kurzen Zeitstudie gemessenen Zeiten.

In Tabelle 25 fällt der sehr hohe Leistungswert am ersten Tag der Zeitstudie auf. Dieser Wert muss als zu hoch angesehen werden, da an diesem Tag nur am Vormittag gehackt wurde und die Arbeiter sich während einer längeren Reparaturarbeit am Hacker gut erholen konnten. Die Werte der folgenden Tage liegen erstaunlich nahe zusammen und spiegeln die realistisch zu erwartende Leistung besser wider. Der massegewichtete Wassergehalt der gehackten Biomasse lag bei 60,6 Prozent. Für absolut trockene Biomasse errechnet sich daraus eine TAP von 1,92 Tonnen atro pro Stunde GAZ.

### 5.3.2 Motormanuelles Fällen – Hacken kranbeschickt

#### Zeitanteile und Leistung motormanuelles Fällen

Für diese Erntelinie wurde beim Fällen keine eigene Arbeitsstudie erstellt, siehe deshalb Kapitel 5.3.1.

#### Zeitanteile und Leistung Hacken kranbeschickt

Die Arbeitsstudie beim kranbeschickten Hacken dauerte 751,26 Minuten (Tabelle 27). Betrachtet man in Abbildung 45 die Zeitanteile, so fällt sofort der relativ hohe Anteil des Abschnitts Hacken auf. Außerdem gab es keine persönlichen oder systembedingten Verteilzeiten, was auf den guten – Wartungszustand der Maschine zurückgeführt werden kann.

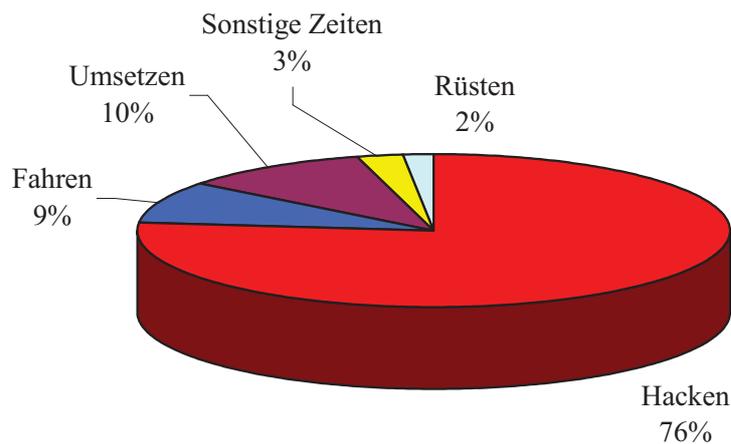


Abbildung 45: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „kranbeschicktes Hacken“

Tabelle 27: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Hacken kranbeschickt“

	Anzahl N	Minimum (min)	Maximum (min)	Summen (min)	Mittelwerte (min)
<b>Hacken</b>	221	0,40	6,61	575,01	2,60
<b>Fahren</b>	184	0,10	2,64	68,12	0,37
<b>Umsetzen</b>	26	0,72	7,13	76,64	2,95
<b>Sonstige Zeiten</b>	16	0,13	5,84	19,43	1,21
<b>Rüsten</b>	8	0,20	3,62	12,07	1,51
<b>Gesamtergebnis</b>				751,26	

Tabelle 28: Leistungswerte der Teilarbeit „Hacken kranbeschickt“

	1. Aufnahmetag	2. Aufnahmetag	3. Aufnahmetag	Mittelwert
<b>TAP (t FM/h GAZ)</b>	7,59	8,71	6,43	7,58

Die TAP der Teilarbeit „Hacken kranbeschickt“ wurde wie in Kapitel 5.3.1 auf die GAZ bezogen. Die durchschnittliche TAP liegt nach Tabelle 28 bei 7,58 Tonnen Frischmasse pro Stunde GAZ. Da die Allgemeinen Zeiten bei der Arbeitsstudie nur den geringen Wert von fünf Prozent aufwiesen, wurden stattdessen 15 Prozent auf die RAZ aufgeschlagen um die GAZ zu erhalten. Bezieht man die Leistung mit dem ermittelten Wassergehalt von 59,8 Prozent auf absolut trockene Biomasse so liegt die TAP bei 3,05 Tonnen atro pro Stunde GAZ.

### 5.3.3 Motormanuelles Fällen – Vorkonzentrieren – Hacken kranbeschickt

#### Zeitanteile und Leistung Motormanuelles Fällen und Vorkonzentrieren

In diesem Verfahren folgt auf den Fällvorgang sofort der nächste Verfahrensschritt „Vorkonzentrieren“. Deshalb wurde für diese Erntelinie eine um diese Teilarbeit erweiterte Arbeitsstudie durchgeführt. Die ermittelten Zeiten sind in Abbildung 46 dargestellt.

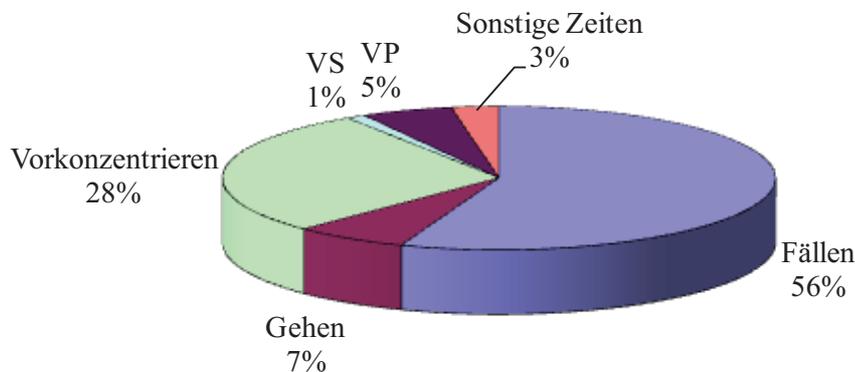


Abbildung 46: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „Fällen und Vorkonzentrieren“

Tabelle 29: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Fällen und Vorkonzentrieren“

	Anzahl N	Minimum (min)	Maximum (min)	Summen (min)	Mittelwerte (min)
<b>Fällen</b>	72	1,07	10,46	405,43	5,63
<b>Gehen</b>	72	0,1	2,75	48,8	0,68
<b>Vorkonzentrieren</b>	72	1,03	6,29	206,11	2,86
<b>VS</b>	7	0,35	3,17	8,21	1,17
<b>VP</b>	13	0,56	10,2	38,96	3,00
<b>Sonstige Zeiten</b>	6	0,39	10,15	20,11	3,35
<b>Gesamtergebnis</b>				727,62	

Die Zeitstudie umfasste insgesamt 727,62 Minuten (Tabelle 29). 72 Parzellenreihen wurden gefällt und in Ernteschlaufen vorkonzentriert. Die Frischmasse der Parzellenreihen schwankte stark zwischen 144,42 und 1356,16 Kilogramm. Für Fällen und Vorkonzentrieren einer Parzellenreihe wurden durchschnittlich 8,49 Minuten benötigt. Der Anteil der persönlichen Verteilzeit betrug im Vergleich zu der Fällstudie in Kapitel 5.3.1 nur noch fünf statt zwölf Prozent. Möglicherweise wirkten sich die abwechselnden Tätigkeiten Fällen und Vorkonzentrieren günstig hinsichtlich des Erholungseffektes aus.

Tabelle 30: Leistungswerte der Teilarbeit „Fällen und Vorkonzentrieren“

	Anzahl N	Minimum	Maximum	Mittelwert
<b>TAP (t FM/h GAZ)</b>	72	1,69	6,18	4,18

Nach Tabelle 30 fällt und vorkonzentrierte der Zwei-Mann-Trupp durchschnittlich 4,18 Tonnen erntefrische Pappeln pro Stunde GAZ (incl. 20 Prozent allgemeine Zeiten). Dies entspricht mit dem gewichteten Wassergehalt von 61,2 Prozent auf trockene Biomasse bezogen einer Leistung von 1,62 Tonnen atro pro Stunde GAZ. Gegenüber der Zeitstudie mit reinem Fällvorgang (siehe Kapitel 5.3.1) verringerte sich die Leistung um etwa 30 Prozent.

### **Zeitanteile und Leistung Hacken vorkonzentriert**

Die Arbeitsstudie dauerte 336,51 Minuten. Abbildung 47 stellt die Prozentanteile der einzelnen Ablaufabschnitte dar. Wie in Kapitel 5.3.2 fällt der mit 80 Prozent sehr hohe Anteil des reinen Hackens auf, was die gute Auslastung des Hackers verdeutlicht. Der Ablaufabschnitt Fahren steht für die Fahrbewegungen während des Hackens einer Ernteschlaue. Unter Umsetzen sind die Zeiten zu verstehen, die für das Wechseln zur nächsten Ernteschlaue benötigt wurden.

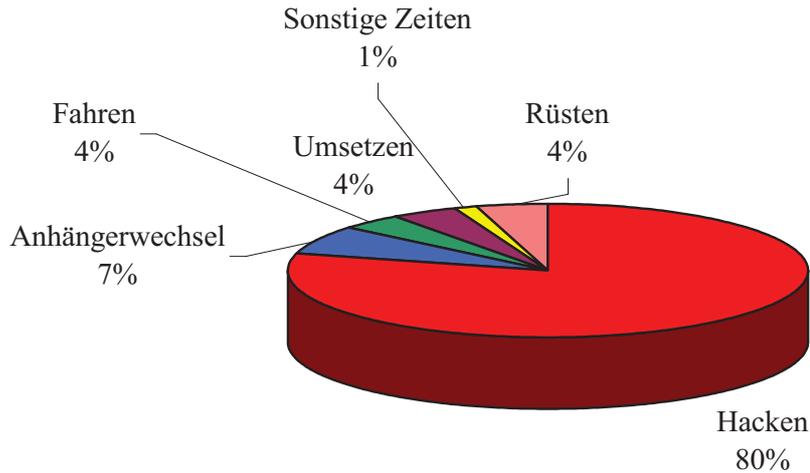


Abbildung 47: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „Hacken vorkonzentriert“

Tabelle 31: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Hacken vorkonzentriert“

	Anzahl N	Minimum (min)	Maximum (min)	Summen (min)	Mittelwerte (min)
<b>Hacken</b>	25	2,43	20,58	265,98	10,64
<b>Anhängerwechsel</b>	17	0,23	3,39	23,93	1,41
<b>Fahren</b>	12	0,49	2,22	13,00	1,08
<b>Umsetzen</b>	3	1,05	10,92	14,35	4,78
<b>Sonstige Zeiten</b>	1	4,66	4,66	4,66	4,66
<b>Rüsten</b>	6	0,52	9,86	14,59	2,43
<b>Gesamtergebnis</b>				336,51	

Bei den allgemeinen Zeiten traten nur Rüstzeiten auf, die sachlichen und persönlichen Verteilzeiten lagen jeweils unter der Einprozent-Marke. Für die Leistungsberechnung wurde deshalb ein Zuschlag von 15 Prozent der reinen Arbeitszeit als allgemeine Zeit auf die RAZ aufgeschlagen.

Tabelle 32: Leistungswerte der Teilarbeit „Hacken vorkonzentriert“

	1. Aufnahmetag	2. Aufnahmetag	Mittelwert
<b>TAP (t FM/h GAZ)</b>	10,45	8,36	9,41

Vergleicht man die Leistungswerte der Teilarbeit „Hacken vorkonzentriert“ mit dem kranbeschiekten Hacken in Kapitel 5.3.2, so kann man eine gut 20-prozentige Leistungssteigerung feststellen (Tabelle 32). Verallgemeinerungen sind wegen des geringen Umfangs der Arbeitsstudie aber nicht statthaft. Bezieht man die Leistung mit dem

Wassergehalt von 61,2 Prozent auf absolut trockene Biomasse so erhält man eine TAP von 3,65 Tonnen atro pro Stunde GAZ.

### 5.3.4 Fäller-Bündler – Rücken – Hacken am zentralen Platz

#### Zeitanteile und Leistung beim Fällen mit dem Fäller-Bündler

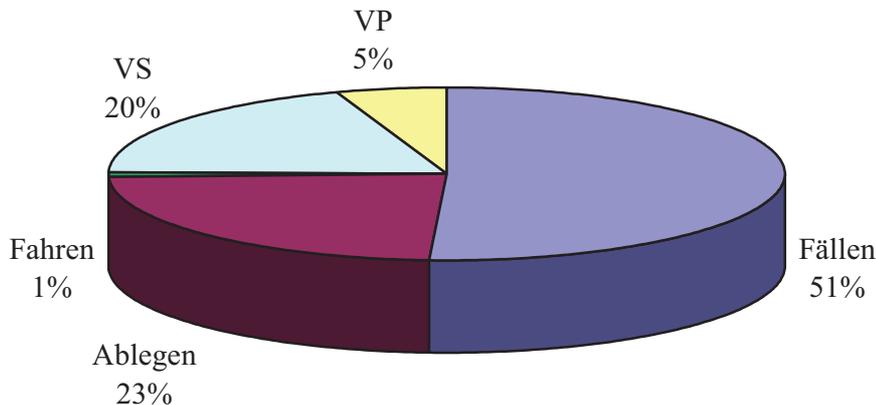


Abbildung 48: Ablaufabschnitte in prozentualen (Zeit-)Anteilen der Teilarbeit „Fällen mit dem Fäller-Bündler“

Tabelle 33: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Fällen mit dem Fäller-Bündler“

	Anzahl N	Minimum (min)	Maximum (min)	Summen (min)	Mittelwerte (min)
<b>Fällen</b>	12	22,59	46,65	446,7	37,23
<b>Ablegen</b>	12	10,76	22,88	205,27	17,11
<b>Fahren</b>	4	0,09	4,42	8,09	2,02
<b>VS</b>	3	18,17	131,44	171,74	57,25
<b>VP</b>	6	0,22	17,3	45,18	7,53
<b>Gesamtergebnis</b>				876,99	

Die reine Arbeitszeit (RAZ), in Abbildung 48 mit den Ablaufabschnitten Fällen, Ablegen und Fahren dargestellt, nahm 75 Prozent der gesamten Arbeitszeit (GAZ) ein. Auffallend ist der für eine vollmechanisierte Ernte hohe Anteil an systembedingten Verteilzeiten (VS), was am schlechten Wartungszustand der Maschine lag.

Die Zeitstudie umfasste 876,99 Minuten (Tabelle 33). Insgesamt wurden zwölf Parzellen der Versuchsfläche in die Studie einbezogen. Die durchschnittliche Leistung beim Fällen lag nach Tabelle 34 bei 7,16 Tonnen Frischmasse pro Stunde GAZ, bezogen auf Trockenmasse (Wassergehalt 57,5 Prozent) bei 3,04 Tonnen atro.

Tabelle 34: Leistungswerte der Teilarbeit „Fällen mit dem Fäller-Bündler“

	Anzahl N	Minimum	Maximum	Mittelwert
TAP (t FM/h GAZ)	12	5,39	9,21	7,16

### Leistung bei den Teilarbeiten Rücken und Hacken

Die Teilarbeiten Rücken und Hacken wurden nur summarisch mittels einfacher Zeitaufschriebe erfasst. Beim Hacken hatten die Pappeln nach circa zweimonatiger Lagerzeit einen Wassergehalt von 52 Prozent. Da das Rücken kurz vorher stattfand, wird hier derselbe Wassergehalt unterstellt. Die TAP des Rückegerätes lag bei 20,84 Tonnen Frischmasse pro Stunde GAZ. Die TAP des Hackers betrug 13,14 Tonnen Frischmasse pro Stunde GAZ. Bezieht man diese Werte auf die Trockenmasse liegt die TAP des Rückegerätes bei 10 Tonnen atro, die des Hackers bei 6,31 Tonnen atro pro Stunde GAZ.

### 5.3.5 Gehölmähhäcksler

#### Zeitanteile und Leistung

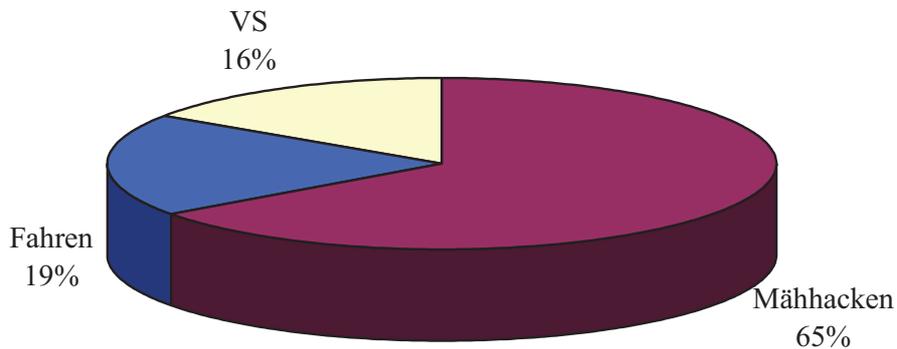


Abbildung 49: Ernte mit dem Gehölmähhäcksler: Ablaufabschnitte in prozentualen Zeitanteilen

Abbildung 49 zeigt die Ablaufabschnitte in ihren prozentualen Anteilen. Mit 65 Prozent nimmt der eigentliche Arbeitsvorgang Mähhacken einen großen Teil ein. Die Fahrzeiten sind, wie in Kapitel 5.2.3.5 beschrieben, durch die Hanglage bedingt und könnten bei geringerer Steigung reduziert werden. Die sachlichen Verteilzeiten beruhen auf Störungen der noch nicht ausgereiften Maschine, wie aus der Hackvorrichtung herausfallende Bäume oder verstopftes Auswurfrohr. Auffallend ist das Fehlen von persönlichen Verteilzeiten, die Maschinenfahrer führten die Erntemaßnahmen ohne Pausen durch. Die sonstigen Zeiten nehmen einen Anteil von weniger als ein Prozent ein und wurden in der Darstellung nicht berücksichtigt.

Die Zeitstudie in Kammern dauerte insgesamt 651,62 Minuten. 56 Reihen mit jeweils 180 Meter Länge wurden während der Arbeitsstudie beerntet (Tabelle 35).

Tabelle 35: Ernte mit dem Gehölmähhäcksler: Kennwerte zu den Zeitanteilen

	Anzahl N	Minimum (min)	Maximum (min)	Summen (min)	Mittelwerte (min)
<b>Mähhacken</b>	56	4,05	21,62	421,43	7,53
<b>Fahren</b>	56	0,5	4,23	126,32	2,26
<b>VS</b>	19	0,87	20,22	101,82	5,36
<b>Sonstige Zeiten</b>	4	0,23	0,8	2,05	0,51
<b>Gesamtergebnis</b>				651,62	

Die Berechnung der Produktivität wurde in Anhalt an HARTMANN und THUNEKE (1997) auf zweierlei Weise durchgeführt, um sowohl das Leistungsvermögen des Gehölmähhäckslers als auch die Leistung des gesamten Erntesystems detailliert zu erfassen. Dabei wurde zunächst nur der Anteil des „Mähhackens“ an der reinen Arbeitszeit (RAZ) ins Verhältnis zur produzierten Menge an Hackschnitzeln gesetzt. Für die so errechnete Bezugszeit wird der Begriff „RAZ/HN“ (Reine Arbeitszeit/Hauptnutzung) verwendet. Die auf Grund dieser Zeit berechneten Leistungswerte stellen das reine Leistungsvermögen des Mähhackers dar, ohne Störungen oder verfahrensbedingte Besonderheiten zu berücksichtigen.

Tabelle 36: Leistungswerte Gehölmähhäcksler (Tonnen Frischmasse pro Stunde RAZ/HN)

	Anzahl N	Minimum	Maximum	Mittelwert
<b>TAP (t FM/h RAZ (HN))</b>	56	3,59	22,36	12,77

Die TAP des Gehölmähhäckslers beträgt nach Tabelle 36 12,77 Tonnen Frischmasse pro Stunde, bei einem massegewichteten Wassergehalt der Balsampappeln von 59 Prozent entspricht dies einer TAP von 5,24 Tonnen atro pro Stunde RAZ (HN).

In einer zweiten Variante werden mit der GAZ auch die Fahrzeiten sowie die persönlichen und sachlichen Verteilzeiten als Bezugsmaß für die Leistung des Erntesystems verwendet. Das Ergebnis zeigt Tabelle 37.

Tabelle 37: Leistungswerte Gehölmähhäcksler (pro Stunde GAZ)

	Anzahl N	Minimum	Maximum	Mittelwert
<b>TAP (t FM/h GAZ)</b>	56	2,32	14,46	8,26

Die durchschnittliche TAP bezogen auf die Gesamtarbeitszeit beträgt 8,26 Tonnen Frischmasse pro Stunde, bezogen auf Trockenmasse 3,39 Tonnen pro Stunde GAZ.

### 5.3.6 Fällen – Rücken – Hacken am zentralen Platz (10-jähriger Umtrieb)

#### Zeitanteile und Leistung „motormanuelles Fällen 10-jähriger Umtrieb“

Die Arbeitsstudie dauerte 1215,48 Minuten. In dieser Zeit wurden 578 Parzellenreihen geerntet. Die Ergebnisse zeigen Abbildung 50 und Tabelle 38. Der Ablaufabschnitt „Fällen“ ist mit 80 Prozent Zeitanteil an der GAZ dem aus der motormanuellen Zeitstudie in Kapitel 5.3.1 mit 77 Prozent gut vergleichbar. Unterschiedlich ist der Anteil der persönlichen Verteilzeiten. Hier sind die Anteile mit vier Prozent relativ niedrig, bei der Studie im fünfjährigen Umtrieb lagen diese bei zwölf Prozent.

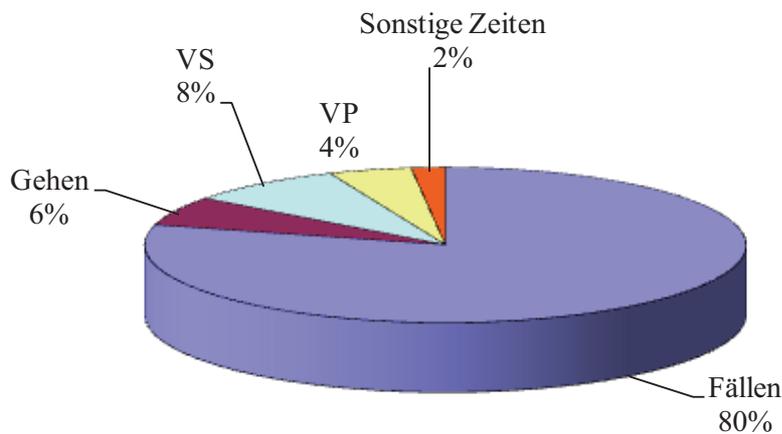


Abbildung 50: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „Motormanuelles Fällen“

Deutlicher werden die Unterschiede zwischen beiden Arbeitsstudien, wenn man den mittleren Zeitbedarf für das Fällen der 20 Meter langen Parzellenreihen betrachtet. Dieser liegt im zehnjährigen Umtrieb bei 1,66 Minuten (Tabelle 38), im fünfjährigen mit 5,42 Minuten bei mehr als dem Dreifachen.

Tabelle 38: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Motormanuelles Fällen“

	Anzahl N	Minimum (min)	Maximum (min)	Summen (min)	Mittelwerte (min)
<b>Fällen</b>	578	0,22	5,38	958,76	1,66
<b>Gehen</b>	563	0,02	1,20	74,08	0,13
<b>Störung</b>	6	0,20	1,31	3,99	0,67
<b>VS</b>	25	0,15	16,18	102,47	4,10
<b>VP</b>	17	0,10	15,67	54,05	3,18
<b>Sonstige Zeiten</b>	16	0,23	10,96	22,14	1,38
<b>Gesamtergebnis</b>				1215,48	

Tabelle 39: Leistungswerte der Teilarbeit „Motormanuelles Fällen“

	Anzahl N	Minimum	Maximum	Mittelwert
TAP (t FM/h GAZ)	578	1,93	72,07	18,05

Nach Tabelle 39 beträgt die durchschnittliche Leistung beim Fällvorgang 18,05 Tonnen Frischmasse pro Stunde gesamte Arbeitszeit (GAZ). Bezogen auf die Trockenmasse liegt die TAP bei 7,81 Tonnen atro pro Stunde GAZ (massegewichteter Wassergehalt 56,7 %). Sie ist etwa um das Dreifache höher als in der vergleichbaren Arbeitsstudie im fünfjährigen Umtrieb in Kapitel 5.3.1. Dies kann vor allem mit den wesentlich höheren Stückmassen der zehn Jahre alten Bäume gegenüber der fünfjährigen Rotation begründet werden. Weiterhin wurde in der zehnjährigen Rotation der erste Aufwuchs gerntet, während das Fällen des mehrtriebigen Bestandes der zweiten Umtriebszeit in Kapitel 5.3.1 sich viel schwieriger gestaltete und die Fällschnitte präziser geführt werden mussten.

**Zeitanteile und Leistung „Rücken 10-jähriger Umtrieb“**

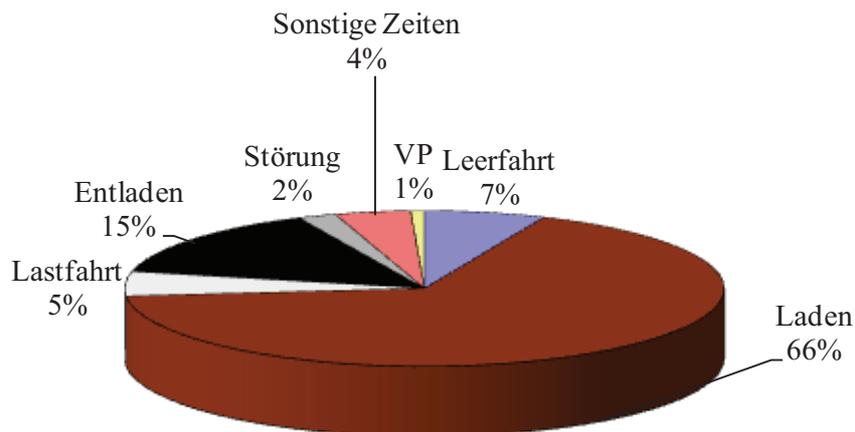


Abbildung 51: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit Rücken

Bei den Zeitanteilen der Rückestudie fallen die sehr niedrigen Verteilzeiten auf. Die sachlichen Verteilzeiten liegen unter einem Prozent und sind in Abbildung 51 nicht berücksichtigt. Den größten Zeitanteil nimmt mit 66 Prozent das Beladen des Rückewagens ein. Dies liegt daran, dass die Bäume nur gefällt und nicht vorkonzentriert wurden und das Aufsammeln der Stämme sehr zeitaufwändig war.

Die Zeitstudie umfasste insgesamt 2815,28 Minuten. Während dieser Zeit wurden 109 Zyklen (Rückewagen Ladungen) erfasst. Die Fahrer legten die Abladeplätze in acht Fällen so, dass die Frachten direkt nach dem Beladen ohne Lastfahrt wieder entladen werden konnten. Deswegen entspricht die Anzahl der Lastfahrten nicht der der Zyklen. Weiterhin achteten die

Fahrer darauf, mit beladenem Wagen möglichst kurze Strecken zurück zu legen und nahmen dafür längere Leerfahrten in Kauf. Die Leerfahrten dauerten deshalb im Mittel länger als die Lastfahrten (Tabelle 40).

Tabelle 40: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Rücken“

	Anzahl N	Maximum (min)	Minimum (min)	Summen (min)	Mittelwerte (min)
Leerfahrt	109	3,95	0,13	183,92	1,69
Laden	109	35,79	6,33	1882,62	17,27
Lastfahrt	101	4,25	0,08	143,16	1,42
Entladen	109	8,10	1,03	411,45	3,77
Störung	20	15,35	0,15	58,34	2,92
Sonstige Zeiten	39	18,65	0,03	115,02	2,95
VP	14	7,30	0,07	20,77	1,48
Gesamtergebnis				2815,28	

Nach Tabelle 41 betrug die durchschnittliche TAP 7,42 t Tonnen Frischmasse pro Stunde (GAZ). Da das Rücken einige Tage nach dem Fällen stattfand, wird hier der Bezug auf Trockenmasse mit einem etwas niedrigeren Wassergehalt von 50 % vorgenommen. Dies entspricht Erfahrungswerten aus Trocknungsversuchen (BURGER und WEIBENBÖCK 2006). Auf Trockenmasse bezogen liegt die TAP demnach bei 3,71 t atro pro Stunde (GAZ).

Tabelle 41: Leistungswerte der Teilarbeit „Rücken“

	Anzahl N	Minimum	Maximum	Mittelwert
TAP (t FM/h GAZ)	12	4,77	9,63	7,42

### Zeitanteile und Leistung „Hacken 10-jähriger Umtrieb“

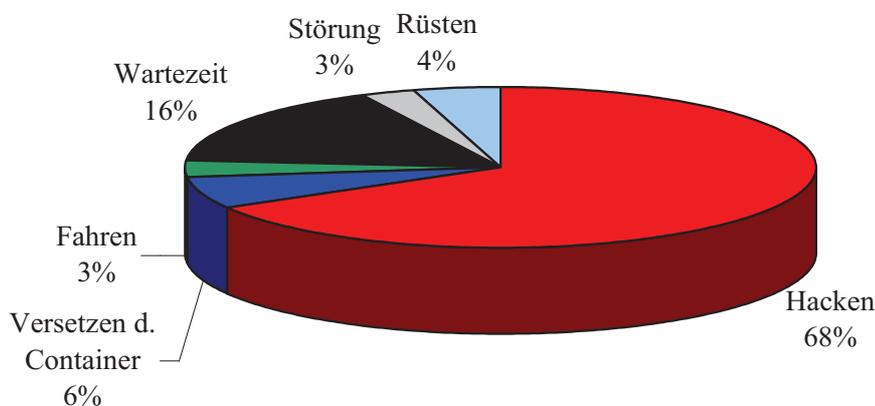


Abbildung 52: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „Hacken 10-jähriger Umtrieb“

Bei der Teilarbeit „Hacken 10-jähriger Umtrieb“ entfällt mit 68 Prozent der größte Teil auf das Hacken, was ein Beleg für die gute Auslastung des Hackers gelten kann. Der Ablaufabschnitt „Fahren“ enthält die Fahrbewegungen des Hackers, die notwendig waren, um das Holz greifen zu können. Der Abschnitt „Versetzen der Container“ resultierte aus dem Austausch gefüllter gegen leere LKW-Container. Der Anteil an „Wartezeit“ war mit 16 Prozent relativ groß, da der parallel laufende Hackschnitzeltransport Wartezeiten wegen fehlender Container verursachte. Ohne diese Verzögerungen wäre eine Auslastung des Hackers von über 80 Prozent möglich gewesen. Die persönlichen und sachlichen Verteilzeiten lagen unter der Einprozent-Marke. Lediglich die Rüstzeiten machten vier Prozent der Gesamtzeit aus (Abbildung 52).

Tabelle 42: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Hacken 10-jähriger Umtrieb“

	Anzahl N	Minimum (min)	Maximum (min)	Summen (min)	Mittelwerte (min)
<b>Hacken</b>	6	31,45	45,05	221,22	36,87
<b>Versetzen d. Container</b>	3	5,93	9,32	21,42	7,14
<b>Fahren</b>	4	1,72	3,85	10,77	2,69
<b>Wartezeit</b>	2	11,72	42,75	54,47	27,23
<b>Störung</b>	1	9,17	9,17	9,17	9,17
<b>Rüsten</b>	2	4,72	10,00	14,72	7,36
<b>Gesamtergebnis</b>				331,75	

Die Zeitstudie beim Hacken dauerte insgesamt 331,75 Minuten (Tabelle 42). Die durchschnittliche Leistung des Hackers erreichte laut Tabelle 43 mit 8,83 Tonnen Frischmasse pro Stunde GAZ die höchsten Werte aller bisher eingesetzten Systeme. Da das Material über den Sommer vorgetrocknet war, hatte es nach Angaben des abnehmenden Heizkraftwerkes nur noch einen Wassergehalt von 24,6 Prozent. Die TAP, bezogen auf Trockenmasse, lag demnach bei 6,66 Tonnen atro pro Stunde, was bei den in Kapitel 5.2.3.6 dargestellten Baumartenanteilen einer Produktion von 45 Schüttraummeter Hackschnitzel pro Stunde entspricht.

Tabelle 43: Leistungswerte der Teilarbeit „Hacken 10-jähriger Umtrieb“

	Anzahl N	Minimum	Maximum	Mittelwert
<b>TAP (t FM/h GAZ)</b>	6	6,22	11,51	8,83

### 5.3.7 Harvesterfällung – Rücken – Hacken (10-jähriger Umtrieb)

Wie in Kapitel 5.2.3.7 beschrieben, arbeitete der Harvester in sogenannten Erntestreifen, d. h. er konnte bei einer Überfahrt drei Reihen fällen und vorkonzentriert ablegen. Die ermittelten Zeitanteile der Ablaufabschnitte sind in Abbildung 53 dargestellt.

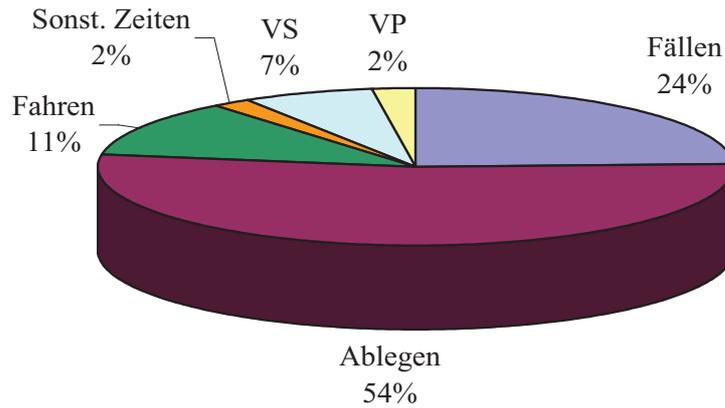


Abbildung 53: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „Harvesterfallung“

Die Zeitstudie dauerte insgesamt 794,24 Minuten (Tabelle 44). Während dieser Zeit wurden 74 Erntestreifen beerntet. Ein Erntestreifen war durchschnittlich mit circa 2,5 Tonnen Frischmasse bestockt. Der massegewichtete Wassergehalt betrug 57,4 Prozent.

Tabelle 44: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Harvesterfallung 10-jähriger Umtrieb“

	Anzahl N	Minimum (min)	Maximum (min)	Summen (min)	Mittelwerte (min)
<b>Fällen</b>	74	0,68	8,08	194,01	2,62
<b>Ablegen</b>	74	1,4	10,66	422,6	5,71
<b>Fahren</b>	74	0	5,24	90,92	1,23
<b>Sonst. Zeiten</b>	17	0,18	7,94	17,07	1
<b>VS</b>	6	0,52	23,85	52,9	8,82
<b>VP</b>	14	0,24	3,14	16,74	1,2
<b>Gesamtergebnis</b>				794,24	

Die Technische Arbeitsproduktivität des Harvesters streute mit den Massen der Erntestreifen ziemlich stark von 0,32 bis 27,32 Tonnen Frischmasse je Stunde GAZ (Tabelle 45). Der Grund für die sehr stark schwankenden Massen lag im klonspezifischen Befall einiger Parzellen mit dem Pappelblattrost (*Melampsora larici-populina*) und dem daraus folgenden schlechteren Wuchs bzw. Absterben von Pappelreihen. Um die Maschine in ihrem Arbeitsfortschritt nicht zu behindern, entschloss man sich, diese Parzellen in der Zeitstudie zu behalten. Die Leistungswerte des Harvesters sind, bedingt durch das Versuchsdesign, als etwas niedriger anzusehen als unter Praxisbedingungen.

Tabelle 45: Leistungswerte der Teilarbeit „Harvesterfallung 10-jähriger Umtrieb“

	Anzahl N	Minimum	Maximum	Mittelwert
<b>TAP (t FM/h GAZ)</b>	74	0,32	27,32	13,71

Die durchschnittliche TAP lag bei 13,71 Tonnen Frischmasse pro Stunde GAZ, auf Trockenmasse bezogen (massegewichteter Wassergehalt 57,6 Prozent) bei 5,81 t atro.

Tabelle 46: Technische Arbeitsproduktivität des Harvesters nach Baumarten bzw. Klonen

Baumart/Klon	Wuchsleistung t atro/ha+a	Mittlere TAP (t FM/h GAZ)
Ahle	5,74	12
Androscoggin	6,73	10,72
Beauprè	4,4	9,5
Fritzi Pauley	10,84	22,75
Max 1	11,5	16,67
Max 4	7,12	10,82
Max 5	7,54	16,69
Muhle Larsen	11,6	17,44
Münden	9,9	16,94
Robinie	4,23	10,65
Unal	1,85	4,86

Tabelle 46 verdeutlicht den oben angesprochenen Zusammenhang zwischen der TAP und dem schlechteren Wuchs bedingt durch den Pappelblattrost. Bei den beiden vom Pilz beeinträchtigten Klonen Unal und Beauprè war die TAP des Harvesters am niedrigsten, am höchsten war sie bei den gut gewachsenen Sorten Fritzi-Pauley und Muhle-Larsen.

Beim Rücken und Hacken der durch den Harvester gefällten Bäume wurden keine genauen Arbeitsstudien durchgeführt. Deshalb wurden die Zeitstudien der Teilarbeiten Rücken und Hacken der motormanuellen Erntelinie (Kapitel 5.3.6) auch für die Ökobilanzierung der Harvesterlinie herangezogen. Wegen der sonst gleichen Bedingungen erlaubt dies einen exakten ökobilanziellen Vergleich von motormanueller Fällung und Harvester.

## 5.4 Diskussion

Die **motormanuelle Fällung** mit Zwei-Mann-Trupps und anschließendem Rücken bzw. Hacken der Bäume hat sich in den vorgestellten Arbeitsstudien bewährt. Dieses teilmechanisierte Verfahren ist problemlos sowohl in fünfjährigen als auch in zehnjährigen Kurzumtriebsplantagen einsetzbar. Bei allen Arbeitsstudien wechselten sich die Arbeitskräfte mit den Tätigkeiten „Fällen“ und „Zufallbringen mit der Fällgabel“ ab, so dass die ergonomischen Belastungen vertretbar waren. Durch die etwa zwei Meter lange Fällgabel befand sich die zweite Arbeitskraft immer außerhalb des Gefahrenbereichs der Motorsäge. WIPPERMANN & STAMPFER (1995) sehen zwar Vorteile im Einsatz der sogenannten Bügelmotorsäge. Diese erwies sich bei eigenen Versuchen nur im ersten Umtrieb als tauglich. Die mehrtriebigen Aufwüchse der folgenden Rotationsperioden können mit der Bügelmotorsäge nicht gefällt werden. Für das anschließende Rücken und Hacken steht bei

den forstlichen Unternehmern und Maschinenringen eine breite Palette von Maschinen zur Verfügung. Die Größe und Leistungsfähigkeit sollte an die Energieholzmenge angepasst werden. Große und kostenintensive Hacker erreichen gute Leistungen nur bei vorkonzentrierten bzw. gepolterten Bäumen (Kapitel 5.3.6). Ein Vorteil der teilmechanisierten Verfahren ist ihre große Flexibilität. Im Falle der ersten drei vorgestellten Erntelinien (motormanueller Fällvorgang mit hand- bzw. kranbeschicktem Hacker und der Variante Vorkonzentrieren, Kapitel 5.3.1, 5.3.2 und 5.3.3) wurden Hackschnitzel mit einem hohen Wassergehalt erzeugt, die entweder sofort ins Heizwerk geliefert oder technisch getrocknet werden müssen. Durch das Rücken der Bäume unmittelbar nach der Fällung und Hacken im folgenden Herbst, wie im Verfahren in Kapitel 5.3.6, konnte das Erntematerial gut abtrocknen. Die Hackschnitzel, die im Verfahren „Motormanuelles Fällen, Rücken, Hacken 10-jähriger Umtrieb“ produziert wurden, hatten einen Wassergehalt von rund 24 Prozent und waren damit problemlos lagerfähig.

Der **Fäller-Bündler**-Kopf TJ 720 war durch die Stückmasse der fünfjährigen Pappel-KUP unterfordert. Höhere Stückmassen würden mit Sicherheit die Produktivität des Systems erhöhen und die Kosten senken. Der zehnjährige Bestand der **Harvester**ernte in Kapitel 5.3.7 war nach Einschätzung des Timberjack Projektleiters bereits zu stark, um mit dem Fäller-Bündler-Aggregat beerntet werden zu können. Ein direkter Vergleich der in den Arbeitsstudien ermittelten Leistungswerte von Fäller-Bündler und Harvester ist wegen der unterschiedlichen Umtriebszeiten der beernteten Bestände nicht statthaft. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass unter gleichen Voraussetzungen die Fäller-Bündler-Technik dem Harvester bei der Ernte von Kurzumtriebsplantagen überlegen ist.

Der Einsatz des **Gehölmähhackers** war von verschiedenen Störungen begleitet. Die Balsampappeln der Versuchsfläche waren gut gewachsen und stellten im Alter von fünf Jahren für die Maschine bereits die Grenze dar. Bedingt durch die Höhe lag der Schwerpunkt der Bäume zum Teil über der Führungsgabel der Maschine, so dass sie nach hinten wegkippten. Die Pappeln hatten außerdem in der Gabel zu viel Spielraum, so dass sie zum Teil nach dem Trennschnitt nicht in die Hackschnecke transportiert wurden. Mit dem Vom-Stock-Trennen der nächsten Bäume in der Reihe wurden dann oft mehrere Pappeln gleichzeitig in das Hackaggregat transportiert, was das System überlastete und häufig zum Verstopfen des Auswurfrohres führte. Die Störungen sind z. T. durch das vorne offene Hack-System des Mähhackers bedingt. Ein weiterer Nachteil des Gehölmähhackers ist die inhomogene Struktur des produzierten Hackgutes. Es ist für kleinere Hackschnitzelheizungen ungeeignet und kann nur von größeren Werken mit Schubboden-Zuführung verwertet werden.

Will man die **Leistungsfähigkeit** der beschriebenen Erntelinien miteinander vergleichen, so muss man die Einzelleistungen zu einer Systemleistung zusammenführen. Nach der Formel

$$M = 1/(1/TAP_1+1/TAP_2+1/TAP_3)$$

wobei M die Mengeneinheit oder Masse bedeutet und  $TAP_{1-3}$  die Technische Arbeitsproduktivität der maximal drei Teilarbeiten, erhält man einen theoretischen Wert, der angibt, wie viel Tonnen Hackschnitzel mit dem jeweiligen System pro Stunde erzeugt werden können. Tabelle 47 gibt diese Werte für die sieben untersuchten Erntelinien in t atro/h (GAZ) an.

Tabelle 47: Systemleistungen der untersuchten Erntelinien

Umtriebszeit (Jahre)	5	5	5	5	5	10	10
Erntelinie	Motor-manuelles Fällen - Hacken manuell	Motor-manuelles Fällen - Hacken kran-beschickt	Motor-manuelles Fällen - Vorkonz. - Hacken kran-beschickt	Fäller-Bündler - Rücken - Hacken am zentralen Platz	Gehölmäh-häcksler	Fällen - Rücken - Hacken am zentralen Platz	Harvester-fällung - Rücken - Hacken am zentralen Platz
Systemleistung t atro/h (GAZ)	1,04	1,32	1,12	1,70	3,39	1,83	1,69

Das Erntesystem mit motormanuellem Fällen und handbeschicktem Hacker im fünfjährigen Umtrieb schneidet mit 1,04 t atro/h (GAZ) am schlechtesten ab, am besten der vollautomatische Gehölmähhäcksler mit mehr als der dreifachen Leistung von 3,39 t atro/h (GAZ). Die Leistung im zehnjährigen Umtrieb ist im Schnitt höher als in der fünfjährigen Rotation, doch fällt der Zwei-Mann-Trupp den zehnjährigen Bestand schneller als der Harvester.

HARTMANN und THUNEKE (1997) berechneten bei Feldversuchen mit einem anderen Prototyp des Gehölmähhäckslers eine durchschnittliche TAP von circa acht Tonnen absolut trockene Biomasse pro Stunde reiner Hackzeit. Dies übertrifft die in der eigenen Studie festgestellte TAP von 5,24 Tonnen atro pro Stunde RAZ/HN (Reine Arbeitszeit/Hauptnutzung in Kapitel 5.3.5).

TEXTOR (2003) führte in Baden-Württemberg eine KUP-Ernte mit dem in Kapitel 5.1.3 beschriebenen **Claas-Jaguar 860** durch. Als maximalen Trenndurchmesser gibt er 70 bis 80 Millimeter an, was sich gut mit den Angaben von SCHOLZ et al. (2009) deckt. TEXTOR (2003) ermittelte in seiner Arbeitsstudie eine Technische Arbeitsproduktivität von 41,7 Schüttraummeter Hackschnitzel pro Stunde bezogen auf die GAZ. Rechnet man diese Angaben mit dem vom Autor angegebenen Faktor in Tonnen absolut trockene Biomasse um,

so ergibt sich eine TAP von 6,13 t atro/h (GAZ). Der Claas Jaguar 860 hat demnach fast die doppelte TAP als der Gehölmähhäcksler in der hiesigen Zeitstudie mit 3,39 Tonnen atro.

Die Ernte ist nach SCHOLZ et al. (2009) bei der Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen der Verfahrensabschnitt mit den größten Unsicherheiten. Dies wiegt umso schwerer, wenn man bedenkt, dass die Erntetechnik bereits bei der Anlage einer KUP bekannt sein sollte (SCHOLZ et al. 2007). Die erstgenannten Autoren unterscheiden drei Verfahrenslinien in der Ernte von KUP: die Hackgut-, die Bündel- und die Stammholzlinie. Während für die letzten beiden Linien konventionelle Forstmaschinen mit allerdings geringer Flächenleistung eingesetzt werden können, gibt es für die Hackgutlinie einige leistungsfähige Gehölz-Schneidwerke, die sich aber nur für die Ernte von Weiden und für Pappeln bis 70 Millimeter Schnittdurchmesser eignen. Diese Aussage zeigt, dass die vollautomatische Ernte von Balsampappel-KUP im zuwachsoptimalen Durchmesserbereich bis jetzt noch nicht gelöst ist. Nach SCHOLZ et al. (2009) können wegen „mangelnder bzw. begrenzter Maschinenprüfungen und Praxiserfahrungen“ zur Zeit „kaum gesicherte Empfehlungen für Erntemaschinen gegeben werden“, sondern nur „prinzipiell geeignete technische Lösungen aufgezeigt“ werden.

Auf die Kosten der Erntemaßnahmen wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, die Zeitstudien werden vor allem hinsichtlich der Ökobilanzierung aufbereitet. Es soll hier aber erwähnt werden, dass die Ernte mit dem Gehölmähhäcksler die mit Abstand kostengünstigste Erntelinie darstellt. Der Fäller-Bündler schneidet im fünfjährigen Umtrieb von den Kosten her nicht besser ab als die motormanuellen Verfahren „Fällen-Hacken (Kran)“ und „Fällen-Vorkonzentrieren-Hacken (Kran)“. Das teilmechanisierte Verfahren „Fällen-Rücken-Hacken“ ist im zehnjährigen Umtrieb sogar deutlich kostengünstiger als der Harvester und nach dem Gehölmähhäcksler das günstigste Verfahren. Eine Rationalisierung der Ernte von Kurzumtriebsplantagen kann also entweder durch den Einsatz von vollautomatischen Erntemaschinen erfolgen oder durch die Produktion von größeren Stückmassen in höheren Umtriebszeiten.

## 6. Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen

### 6.1 Einführung und Überblick

Die ersten Ökobilanzen im Forstbereich datieren aus der Mitte der neunziger Jahre. Zu nennen sind hier vor allem die Arbeiten von SCHWEINLE (1996 und 2000), FRÜHWALD et al. (1996 und 1997) und WEGENER et al. (1997). Sie bildeten die Grundlage für spätere Produkt-Ökobilanzen, wie z. B. von NEBEL (2002) oder TIEDEMANN (2000).

Die Holzgewinnung in Kurzumtriebsplantagen wurde im gleichen Zeitraum erstmals in ihren ökologischen Auswirkungen erfasst (HARTMANN und STREHLER 1995, KALTSCHMITT und REINHARDT 1997, SCHOLZ 1997 a, b). Allerdings war zum damaligen Zeitpunkt die Datenlage zur Produktion von Holzhackschnitzeln mit Pappeln und Weiden in Deutschland noch lückenhaft. DUBUISSON und SINTZOFF (1998) erstellten Energie- und Kohlendioxidbilanzen für unterschiedlich intensiv bewirtschaftete Short Rotation Coppice Systeme (SRC) in Belgien. Die Arbeiten von HELLER et al. (2003) und DRUHAN et al. (2003) sind beide LCAs (Life Cycle Analysis bzw. Life Cycle Assessment) von Weiden-Kurzumtrieb-Systemen in den USA bzw. Irland von der Bereitung des Saatbeetes bis zur Ernte. Hier liegen bereits Berechnungen der Energie-Inputs über die gesamte Nutzungsdauer von Weiden-Kurzumtriebsplantagen vor. Eine umfassende Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen mit Balsampappel, Robinie und Weide im deutschsprachigen Raum stellte RÖDL (2008) im Rahmen des Projekts „Agrowood“ vor.

### 6.2 Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit werden die auf bayerischen Kurzumtriebs-Versuchsflächen erhobenen Daten ökobilanziell aufbereitet und dargestellt. Dabei werden vor allem drei Ziele verfolgt:

1. Die relativ neue Bodennutzungsart Kurzumtriebsplantage wird umfassend in einer Ökobilanz dargestellt und bewertet. Alle Produktionsschritte von der Anlage der Plantage bis zur Ernte und Verwertung der Hackschnitzel sowie der Rodung der Fläche werden mit ihren Stoffflüssen und Auswirkungen einbezogen. Es wird ausschließlich die energetische Verwertung des erzeugten Holzes bilanziert, die Bewertung einer stofflichen Nutzung z. B. im Zellstoff- oder Spanplattenbereich erfolgt nicht.
2. Die in Kapitel 5 dargestellten, mit Zeitstudien begleiteten Erntelinien werden in ihren ökologischen Auswirkungen verglichen. Zusätzlich erfolgt ein Vergleich von fünf- und zehnjährigem Umtrieb.

3. Zum ersten Mal wird eine vergleichende Energiebilanz von forstlichen Kurzumtriebsplantagen und landwirtschaftlichen Energiepflanzen dargestellt. Als landwirtschaftliche Energiekulturen werden Winterraps für die Veresterung zu Biodiesel sowie Mais zur Biogasproduktion herangezogen (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK UND DATENVERARBEITUNG 2007, HARTMANN et al. 2000). Die gewonnene Nutzenergie dient dabei als Vergleichsbasis (BYSTRICKY und BURGER 2008). Weiterhin erfolgt ein Vergleich von forst- und landwirtschaftlichen Energiekulturen im Hinblick auf die Wirkungskategorien Klimaänderung und Eutrophierung (BYSTRICKY 2009). Funktionelle Einheit und Untersuchungsrahmen der Ökobilanzierung wurden in einem gemeinsamen Projekt mit der TU München erarbeitet und entsprechen sich. Zum Vergleich mit der Landwirtschaft und ihren jährlichen Produktionszyklen werden die Daten der KUP für die Gesamtnutzungsdauer von dreißig Jahren modelliert und anschließend auf ein Jahr bezogen. Wie in einer Art „Normalwaldmodell“ finden hier alle Arbeitsschritte und produktionstechnischen Maßnahmen innerhalb eines Jahres auf reduzierter Fläche statt.

### **6.3 Die Methodik der Ökobilanzierung**

#### **6.3.1 Aufbau gemäß ISO Norm**

Die Ökobilanz ist eine normierte Methode, die entwickelt wurde, um die „Umweltwirkungen, die mit Produktion und Anwendung von Produkten im Zusammenhang stehen“ (NAGUS 2006a) zu erfassen und zu analysieren. Um einen einheitlichen Standard zu gewährleisten wurde für die Erstellung von Ökobilanzen das internationale Normenwerk ISO 14040 – 14044 (NAGUS 2006 a und b) geschaffen.

Eine Ökobilanz gliedert sich nach ISO 14040 in vier Phasen:

1. Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen
2. Die Sachbilanz
3. Die Wirkungsabschätzung
4. Die Auswertung der Ökobilanz

Der Untersuchungsrahmen und damit die Ausführlichkeit und Genauigkeit einer Ökobilanz hängen von den gesteckten Zielen und der beabsichtigten Anwendung ab. Die Sachbilanz ist eine möglichst umfassende Sammlung der Stoffflüsse des untersuchten Systems. In der Wirkungsabschätzung werden die Input- und Outputflüsse der Sachbilanz auf bestimmte Umweltkategorien bezogen, um die Auswirkungen und die Umweltrelevanz des untersuchten

Produktes abschätzen zu können. In der Auswertungsphase erfolgen Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung, es werden Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Entscheidungshilfen getroffen (NAGUS 2006a).

### 6.3.2 Software und Datengrundlage

Die vorliegende Ökobilanz wurde mit dem Softwarepaket GaBi 4 professional und der dazugehörigen Datenbank (PE INTERNATIONAL 2007) durchgeführt. Um die Vorketten der beteiligten Maschinen, Kraftstoffe und Pflanzenschutzmittel besser erfassen zu können, wurde zusätzlich die wesentlich umfangreichere ecoinvent-Datenbank (SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES 2007) herangezogen. Die Abgase der eingesetzten Maschinen wurden mit der Offroad-Datenbank (BUNDESAMT FÜR UMWELT BAFU 2008) kalkuliert. Diese enthält für unterschiedliche land- und forstwirtschaftliche Maschinen nach Leistung differenzierte Abgasmengen per Zeiteinheit.

### 6.3.3 Datenqualität

Die Laufzeiten der Maschinen bei der Ernte der Kurzumtriebsplantagen wurden durch orientierende Arbeitsstudien (Zeitstudien) bei Erntemaßnahmen auf bayerischen Versuchsflächen erhoben. Insgesamt werden sieben Erntelinien von motormanuell bis vollmechanisiert in die Ökobilanzierung einbezogen. Auch die (Sub-)Module „maschinelle Pflanzung“ und „Rodung“ sind mit Daten aus Zeitstudien erfasst worden. Die Maschinen der restlichen Arbeitsprozesse stammen aus der KTBL Datensammlung Betriebsplanung Landwirtschaft (KTBL 2008), ihre Laufzeiten aus den Datenbanken von PE International und ecoinvent. Die GaBi Software verlangt die Mengenangaben der Kraftstoffe in kg. Für die Umrechnung Liter in kg wurde bei Diesel von einer Dichte von 0,8325 kg/l ausgegangen, bei Benzin von 0,7475 kg/l und bei Sägekettenöl auf Rapsölbasis von 0,92 kg/l.

## 6.4 Aufbau der Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen

### 6.4.1 Funktionelle Einheit, Untersuchungsrahmen und Parameter

Ein Ziel der vorliegenden Untersuchung ist der ökobilanzielle Vergleich von land- und forstwirtschaftlichen Energieplantagen. Als **funktionelle Einheit** der Ökobilanz wurde deshalb **ein Hektar Ackerland** für den Zeitraum eines Jahres gewählt. Alle Auswertungen und Ergebnisse beziehen sich auf die jährlichen Erträge eines Hektars Ackerland.

Nach HALAMA (2008) liegt die **durchschnittliche landwirtschaftliche Bearbeitungsgröße** (Schlaggröße) in Bayern bei **zwei Hektar**. Alle Standard-Bodenbearbeitungsmaßnahmen wie Pflügen und Eggen, das Ausbringen von Pflanzenschutzmitteln und die Pflege der Kurzumtriebs-Flächen wurden für diesen virtuellen Zwei-Hektar-Schlag mit 200 Meter Länge

und 100 Meter Breite kalkuliert. Anderes gilt für Arbeitsschritte, für die eigene Zeitstudien vorliegen. Die bei der maschinellen Pflanzung, der Ernte und der Rodung ermittelten Leistungs- und Verbrauchskennzahlen wurden unter den speziellen Bedingungen der Versuchsflächen ermittelt und direkt auf die funktionale Einheit von einem Hektar Ackerland bezogen.

Bilanziert werden die bei der Bewirtschaftung der Kurzumtriebsplantagen eingesetzten Maschinen und ihr Verbrauch an Kraftstoffen und Schmiermitteln. Die **Vorketten**, die sogenannte „Graue Energie“ von Maschinen und Kraftstoffen werden im Gegensatz zu einigen anderen Ökobilanzierungen (RÖDL 2008, ZIMMER 2010) in dieser Arbeit mit bewertet, liegen also **innerhalb des Untersuchungsrahmens**. Dies ist im Sinne einer möglichst ganzheitlichen Betrachtung, da die zur Produktion von Traktoren, Harvestern und Kraftstoffen aufgewendete Energie nicht als unerheblich angesehen werden darf.

Die **Sonnenenergie**, die im Anbausystem Kurzumtriebsplantage erst den Aufbau von Biomasse und damit die chemische Bindung von Energie möglich macht, wird nicht in die Bilanzierung einbezogen, sie bleibt **außerhalb des Untersuchungsrahmens**. Da es hier um die ökobilanzielle Charakterisierung von sieben Erntelinien für KUP und die Unterschiede von land- und forstwirtschaftlichen Energiekulturen geht, beide Produktionssysteme aber auf den Energielieferanten Sonne angewiesen sind und von dieser Seite aus betrachtet keine Unterschiede bestehen, ist diese Betrachtungsweise sinnvoll und macht die Ergebnisse mit anderen Arbeiten vergleichbar.

Die **menschliche Arbeitskraft** liegt wie bei DUBUISSON und SINTZHOFF (1998) ebenfalls **außerhalb des Bilanzrahmens**.

Für den Anbau in kurzen Umtrieben eignet sich eine ganze Reihe von Baumarten (Kapitel 3.1). Neben Klonen der Balsampappel wurden mit geringen Flächenanteilen auch Korbweide, Aspe, Robinie und Roterle in das bayerische Versuchsprogramm integriert. Die Zeitstudien, die während der Erntemaßnahmen durchgeführt wurden und die wesentliche Grundlage für die Ökobilanzierung bilden, beziehen sich fast ausschließlich auf die **Balsampappel**, zum Teil sind geringe Mengen an Aspen und Roterlen in den Erntemassen enthalten. Die massegewichteten Baumartenprozentage der Zeitstudien sind in Kapitel 5 bei jeder Erntelinie angegeben. Wegen des unterschiedlichen Baumhabitus können vor allem Korbweide, aber auch Robinie erntetechnisch kaum mit der Balsampappel verglichen werden. Die hier vorgestellte Ökobilanzierung gilt deshalb strenggenommen nur für Kurzumtriebsplantagen mit der Baumart Balsampappel.

Wie in Kapitel 4 dargestellt, leistet die Balsampappel auf vielen bayerischen Standorten Zuwächse von 10 - 13 Tonnen absolut trockene Biomasse pro Hektar und Jahr. Bei

Kurzumtriebsplantagen ist allerdings, im Gegensatz zu den annuellen Kulturen der Landwirtschaft, nicht die gesamte Fläche des virtuellen Zwei-Hektar-Schlages mit Bäumen bestockt. Aus nachbarschaftsrechtlichen Gründen, für Vorgewende oder Lagerplatz zum Poltern der geernteten Bäume muss ein gewisser Teil des Ackers freigehalten werden. In der vorliegenden Arbeit wird deshalb von einem unbestockten Randstreifen von zwei Metern um die gesamte Fläche ausgegangen. Dies verringert den mit Balsampappeln bestockten Anteil auf circa 94 %. SCHWEINLE et al. (2009) gehen in ihrer betriebswirtschaftlichen Kalkulation von einem Wert in ähnlicher Größenordnung aus (95 %). Die auf den Versuchsflächen ermittelten Biomasse-Zuwächse müssen deshalb für eine praxisnahe Kalkulation etwas abgesenkt werden. Für die Ökobilanzierung wird deshalb von einem vereinheitlichten **Zuwachs** von **zehn Tonnen** absolut trockener Biomasse pro Jahr und Hektar ausgegangen. Dies scheint nach den bisherigen Erfahrungen als mindestens erreichbar und entspricht der angenommenen Biomasseleistung der gedüngten Variante von RÖDL (2008). SCHOLZ und ELLERBROCK (2002) gehen in ihrer Studie, die auf Versuchsergebnissen von sandigen Böden Brandenburgs beruht, von etwas geringeren Zuwächsen aus.

Die **Umtriebszeiten** liegen bei **fünf** und **zehn** Jahren. Die **Gesamtnutzungsdauer** der Plantage wird mit **30 Jahren** angenommen, was auch den Angaben von BOELKE (2006) und HOFMANN (2004) nahe kommt. Bei fünfjährigem Umtrieb erfolgen also sechs Ernten, bei zehnjährigem Umtrieb wird die Plantage dreimal genutzt. Nach der letzten Ernte wird die Plantage mit einer Rodungsfräse wieder in Ackerland umgewandelt und so der Ausgangszustand vor der Begründung wieder hergestellt.

Die bei maschineller Pflanzung, Ernte und Rodung ermittelten Kennzahlen spiegeln immer nur die speziellen Bedingungen der Versuchsflächen wider, auf denen die Arbeitsstudien durchgeführt wurden. Da die Bodenverhältnisse und Neigungen der Versuchsflächen durchaus Unterschiede aufweisen, ist ein Vergleich der Erntelinien nur unter Beachtung dieser Tatsachen möglich.

### **6.4.2 Die Module der Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen**

#### **6.4.2.1 Modul: Biologische Produktion**

Das Modul „Biologische Produktion“ ist ein zentraler Bestandteil forstlicher Ökobilanzen. Dieses Modul unterscheidet die forstliche Produktion wesentlich von industriellen Fertigungsprozessen mit ihrem Verbrauch endlicher Ressourcen. Hier vollzieht sich die nachhaltige Umwandlung von Kohlendioxid und Wasser zu Holzbiomasse mit Hilfe der Sonnenenergie. In diesem Modul „werden die positiven Umweltwirkungen eines nachwachsenden Rohstoffes verbucht“ (ZIMMER und WEGENER 1996), wie z. B. die Bindung

des Treibhausgases Kohlendioxid im Holz oder die Umwandlung von Sonnenenergie in chemisch gebundene Energie.

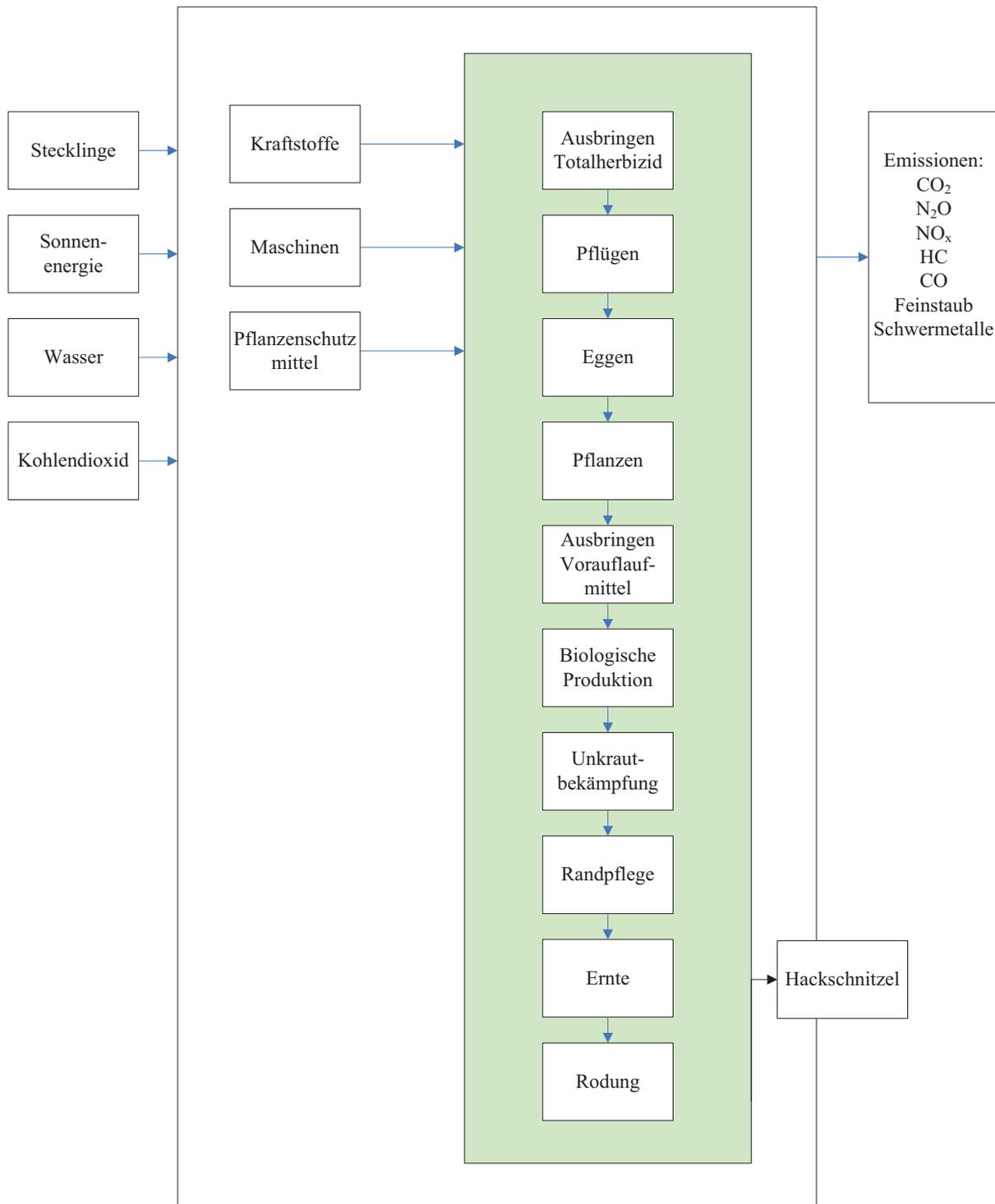
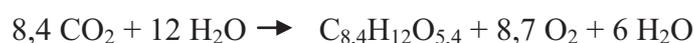


Abbildung 54: Ökobilanzierung des Anbaus von Kurzumtriebsplantagen, Darstellung der Module und Systemgrenzen

Die allgemeine Photosynthese Gleichung



beschreibt die Zusammensetzung von Holzbiomasse nur unzureichend, da die Massenanteile der Elemente im Traubenzuckermolekül  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  nicht denen im Holz entsprechen. Holz besteht nach FENGEL und WEGENER (1984) zu 50 % aus Kohlenstoff, zu 43 % aus Sauerstoff, zu 6 % aus Wasserstoff (und zu 1 % aus Spurenelementen). ZIMMER und WEGENER (1996) stellten daher eine Modellgleichung auf, die die Elementzusammensetzung von Holz besser wiedergibt. Diese modifizierte Photosynthese Gleichung ist inzwischen Standard bei vielen weiteren Ökobilanzen im forstlichen Bereich wie bei FRÜHWALD et al. 1996, NEBEL 2002 und RÖDL 2008. Sie lautet:



Über die Molmassen der Modellgleichung können nun die Stoffmengen errechnet werden, die zum Aufbau von einer Tonne Holz notwendig sind:



(ZIMMER und WEGENER 1996). Die zum Aufbau des Holzmoleküls verbrauchte Energie ist nicht bekannt (ZIMMER und WEGENER 1996). Sie wird deshalb mit der im Holz enthaltenen Energie gleichgesetzt. Diese ist für alle Laubhölzer gleich und beträgt demnach für Pappelholz aus Kurzumtriebsplantagen 18100 MJ pro Tonne atro. Sie entspricht dem unteren Heizwert (RÖDL 2008).

### 6.4.2.2 Modul: Technische Produktion

Die Module der technischen Produktion beschreiben alle Arbeitsschritte, die während der Nutzungsdauer einer Kurzumtriebsanlage durchgeführt werden müssen. Für jedes dieser Module werden die Stoff- und Energieflüsse erfasst und die Emissionen in Luft, Wasser und Boden quantifiziert. Einbezogen werden auch die Stoff- und Energieflüsse, die durch die Bereitstellung der Energie und die Produktion der eingesetzten Maschinen aufgewendet worden sind, die sogenannte „Graue Energie“.

#### Submodul Ausbringen des Totalherbizids

Das Ausbringen eines Totalherbizids im Herbst vor der Pflanzung ist die erste Maßnahme bei der Anlage einer Kurzumtriebsanlage, falls eine konkurrenzkräftige Acker-Begleitvegetation auf der Fläche vorhanden ist (Kapitel 3). Wie aus Tabelle 48 zu ersehen ist, verbraucht der Traktor in 0,29 Stunden Arbeit 0,87 kg Dieselkraftstoff pro Hektar landwirtschaftlicher Fläche. Nach Erfahrungen aus dem Versuchsflächenanbau sollten bei

einer Stilllegungsfläche mit starkem Grasbewuchs vier Liter pro Hektar aufgewendet werden (Tabelle 49). Der Wirkstoffgehalt liegt bei 36 Prozent, absolut werden also 1,44 Liter des Wirkstoffs Glyphosat ausgebracht (BUNDESAMT FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND LEBENSMITTELSICHERHEIT 2008). Ökobilanziell einbezogen werden weiterhin die Umweltauswirkungen der Produktion von Traktor und PSM-Spritze im Verhältnis der Einsatzzeit zur Lebensdauer der Geräte und die bei der Produktion des Kraftstoffes verursachten Umweltwirkungen. Da der Herbizideinsatz nur einmal während der gesamten Nutzungsdauer der Plantage durchgeführt werden muss, müssen die o. g. Werte, um sie auf ein Jahr zu beziehen, durch 30 geteilt werden.

Tabelle 48: Bei der technischen Produktion eingesetzte Maschinen incl. Leistungsangaben, Verbrauch an Kraftstoff und Arbeitszeitbedarf pro ha bearbeiteter Fläche (Quellen: <sup>1</sup>KTBL 2006, <sup>2</sup> Eigene Zeitstudien, <sup>3</sup>HANDLER und BLUMAUER 2008) (zum Bezug auf die funktionelle Einheit von einem Hektar und Jahr müssen alle Verbrauchswerte, bis auf die Randpflege, durch die Nutzungsdauer der Plantage von 30 Jahren geteilt werden)

Arbeitsprozess	Maschinen	Nennleistung in KW	Gewicht in kg	Kraftstoffverbrauch kg pro ha	Arbeitszeit in h/100
<b>Ausbringen Totalherbizid<sup>1)</sup></b>	Traktor	45	2850	0,87	0,29
	PSM Spritze, 1000 l, 15 m Arbeitsbreite		700		
<b>Pflügen<sup>1)</sup></b>	Traktor Anbaudrehpflug, 4-scharig	67	4000 1200	19,2	1,88
<b>Ausbringen Voraufmittel<sup>1)</sup></b>	Traktor	45	2850	0,87	0,29
	PSM Spritze		700		
<b>Eggen<sup>1)</sup></b>	Traktor Saatbeetkombination 4 m Arbeitsbreite	67	4000 1150	4,85	0,53
<b>Maschinelles Stecken<sup>2)</sup></b>	Traktor Steckling-Pflanzmaschine	40	2600 300	9,62	5,65
<b>Regulierung Begleitvegetation<sup>3)</sup></b>	Traktor	50	3500	7,34	1,38
	Heckrübenhackgerät		600		
<b>Randpflege<sup>1)</sup></b>	Traktor Sichelmäher	45	2850 400	0,79	0,16
<b>Rodung<sup>2)</sup></b>	Traktor Rodungsfräse	226	10607 3650	423	8,95

Tabelle 49: Die eingesetzten Herbizide, Aufwandmengen und Wirkstoffe pro ha (Quellen: <sup>1)</sup> (BUNDESAMT FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND LEBENSMITTELSICHERHEIT 2008)) (zum Bezug auf die funktionelle Einheit von einem Hektar und Jahr müssen die Wirkstoffmengen durch die Nutzungsdauer der Plantage von 30 Jahren geteilt werden)

Pflanzenschutzmittel	Wirkstoff	Aufwand- menge (l)	Wirkstoff- menge (l)
Totalherbizid <sup>1)</sup>	Glyphosat	4	1,44
Vorauflaufmittel <sup>1)</sup>	Methamitron	4	1,4

### Submodul Pflügen

Nachdem die Wirkung des Totalherbizids eingetreten ist, wird die Fläche gepflügt. Nach den in GaBi hinterlegten Prozessen braucht der Landwirt auf dem virtuellen Zwei-Hektar-Schlag dafür 1,88 Stunden pro Hektar. Der 67-KW-Schlepper mit Anbaudrehpflug benötigt in dieser Zeit 19,2 kg Dieselkraftstoff (Tabelle 48). Mit einbezogen werden wie im Submodul „Ausbringen des Totalherbizids“ die graue Energie von Traktor, Pflug und Dieselkraftstoff. Für den Vergleich mit der annuellen landwirtschaftlichen Produktion werden die Werte wieder durch die Gesamtnutzungsdauer der KUP von 30 Jahren geteilt.

### Submodul Eggen

Um die Stecklinge leicht in den Boden einbringen zu können, wird die Fläche kurz vor dem Abstecken mit einer Kreiselegge bearbeitet. Auf dem angenommenen Zwei-Hektar-Schlag braucht der 67 KW-Traktor mit Egge nach Tabelle 48 dafür 0,53 Stunden und benötigt 4,85 Kilogramm Dieselkraftstoff pro Hektar Ackerfläche. Die Vorketten von Traktor, Saatbeetkombination und Dieselkraftstoff gehen wieder in die Ökobilanzierung mit ein. Die Umweltwirkungen werden zum Vergleich mit den landwirtschaftlichen Energieplantagen durch die Nutzungsdauer der Kurzumtriebsplantage geteilt.

### Submodul Pflanzen

Stecklinge werden, wie in Kapitel 3 beschrieben, manuell oder mit einer Pflanzmaschine gesetzt. Da die menschliche Arbeitskraft außerhalb des Bilanzrahmens liegt, können im Fall einer **manuellen Pflanzung** lediglich die bei Produktion und Transport der Stecklinge entstandenen Umweltwirkungen bilanziert werden. Daten dazu liegen kaum vor. Lediglich BISKUPEK et al. (1997) geben für die Vorkette der Stecklinge sehr geringe Mengen an Diesel, Kohlendioxid und Benzo(a)pyren an. Diese Angaben sind aus heutiger Sicht unzureichend. In Ermangelung von Arbeitsstudien zur Stecklingsproduktion und auf Grund der sehr geringen Auswirkungen wird deshalb auf die Bilanzierung der Vorkette der Stecklinge verzichtet. Das

Submodul „Pflanzen“ wird nur aus Gründen der Vollständigkeit in der Übersicht der Bilanzierung (Abbildung 54) dargestellt, es enthält keine Daten zu Umweltwirkungen.

Auch im Fall einer **maschinellen Pflanzung** bleiben die Umweltwirkungen der Stecklingsproduktion außen vor. Bilanziert wird im Anhalt an eine Pflanz-Zeitstudie mit einer österreichischen Pflanzmaschine. Die Plantage wurde mit Einzelreihen und einem Pflanzverband von 2,5 \* 0,6 Meter begründet, was einer Pflanzzahl von 6660 Stück pro Hektar entspricht. Eingesetzt war ein umgebautes Feldherr-Maissetzgerät an einem Geräteträger mit 37 KW. Der Dieserverbrauch pro Hektar betrug 9,62 Kilogramm (Tabelle 48). In die Ökobilanzierung einbezogen werden Vorketten von Traktor, Pflanzmaschine und Dieseldieselkraftstoff. Die Umweltwirkungen werden auf ein Jahr bezogen.

### **Submodul Ausbringen des Voraufmittels**

Um die im Boden überliegenden Samen am Keimen zu hindern, wird unmittelbar nach Absteckung der Fläche ein Voraufmittel ausgebracht (Tabelle 49). Auf der angenommenen Arbeitsfläche von zwei Hektar braucht der eingesetzte 45 KW Traktor dazu 0,29 Stunden pro Hektar. Der Dieserverbrauch beträgt auf dem Hektar 0,87 Kilogramm. Die Wirkstoffmenge liegt bei 1,4 l pro Hektar (BUNDESAMT FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND LEBENSMITTELSICHERHEIT 2008). Die Vorketten von Traktor, PSM-Spritze und Voraufmittel werden in die Ökobilanzierung einbezogen. Die Umweltwirkungen werden für ein Jahr berechnet.

### **Submodul Regulierung der Begleitvegetation**

Trotz der oben geschilderten Bodenbearbeitungsmaßnahmen und Herbizideinsätze kann es auf unkrautwüchsigen Standorten zu einem Auflaufen der Begleitvegetation kommen, was die Kultur behindert oder gefährdet. In diesem Fall ist eine mechanische Regulierung der Begleitvegetation notwendig. HANDLER und BLUMAUER (2008) testeten auf österreichischen Flächen mehrere Anbaugeräte an Traktoren und begleiteten diese Arbeitseinsätze mit Zeitstudien. Am effektivsten arbeitete ein Rübenhackgerät mit 3,4 Meter Arbeitsbreite, das an das Heck eines 50 KW-Allradtraktors angebaut war. Für die Regulierung der Beikräuter waren zwei Arbeitsdurchgänge notwendig. Das Hacken auf dem angenommenen Zwei-Hektar-Schlag dauerte 1,38 Stunden pro Hektar. Dabei wurden 7,34 Kilogramm Diesel pro Hektar verbraucht (Tabelle 48). Wie bei den anderen Modulen werden auch hier die Vorketten der Geräte und der verbrauchten Kraftstoffe mit in die Ökobilanzierung einbezogen und die Umweltwirkungen für ein Jahr errechnet.

### Submodul Randpflege

Wie in Kapitel 6.4.1 erläutert ist eine Kurzumtriebsplantage nicht zu hundert Prozent bestockt. Für Randstreifen und Vorgewende werden circa sechs Prozent der Fläche benötigt. Damit diese nicht verunkrauten, müssen sie einmal im Jahr gemäht werden. Dieser Arbeitsschritt wird von einem Traktor mit Sichelmäher durchgeführt. Er benötigt dafür 0,16 Stunden und verbraucht dabei 0,79 Kilogramm Dieselkraftstoff (Tabelle 48). Da diese Arbeit jährlich durchgeführt wird, können die genannten Werte direkt in die Ökobilanz einfließen. Bilanziert werden auch die Vorketten der Geräte sowie des verbrauchten Dieselkraftstoffs.

### Submodul Ernte

Sieben Erntelinien zur Produktion von Hackschnitzeln werden in die Ökobilanzierung einbezogen, davon fünf im fünfjährigen Umtrieb und zwei in der zehnjährigen Rotation. Tabelle 50 zeigt die bei den Zeitstudien eingesetzten Maschinen und ihre Verbräuche an Kraftstoffen und Schmiermitteln bezogen auf die funktionelle Einheit von einem Hektar beerntete KUP. Für Rücken und Hacken in Erntelinie 7 wurden die Zeitstudien aus der Nr. 6 heran gezogen, da bei diesen Teilarbeiten der Ernte mit dem Harvester im zehnjährigen Umtrieb keine differenzierten Aufnahmen durchgeführt wurden. Die Arbeitsstudien zu Rücken und Hacken der Erntekette „Motormanuelles Fällen, Rücken, Hacken“ sind wegen der gleichen Umtriebszeit von zehn Jahren gut für die Harvesterstudie zu verwenden. Die Verbrauchswerte der Teilarbeit Fällen sind bei den Erntelinien 1 und 2 ebenfalls identisch. Hier wurde eine Zeitstudie beim Fällen erstellt und die gefällte Erntemasse dann in zwei verschiedenen Hackerstudien, nämlich mit hand- und mit kranbeschicktem Hacker getrennt erfasst.

Die Diesel-Verbräuche der **Traktoren** wurden nach FRÖBA und FUNK (2004) sowie FRÖBA (2009) mit 230 g pro Stunde und KW kalkuliert und mit der Motorenleistung in Prozent der Nennleistung errechnet. Zur Abschätzung der für die betreffenden Arbeiten benötigten Motorenleistung in Prozent der Nennleistung erfolgte eine Befragung der eingesetzten Unternehmer. Der spezielle Dieselbedarf der **Rückemaschinen** und **Harvester** wurde nach KWF-ONLINE (2009) ermittelt, die Verbräuche der **Motorsägen** nach KLUGMANN (2006) berechnet.

Die maximalen Nutzungsdauern der Forstmaschinen zur Ermittlung der Vorketten („Graue Energie“) stammen aus DREWES und JACKE (2005), die der Hacker aus JACKE (2007). Die Nutzungsdauern der Traktoren wurden nach KTBL (2008) ermittelt. Zur Berechnung der Vorketten der Motorsägen wurde die maximale Lebensdauer nach KLUGMANN (2006) heran gezogen.

## Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen

Tabelle 50: Übersicht der bei der Ernte eingesetzten Maschinen und ihres Kraftstoffverbrauchs bezogen auf die funktionelle Einheit von einem Hektar und Jahr

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	10-jähriger Umtrieb	10-jähriger Umtrieb
<b>Erntelinie</b>	<b>Motor-manuelles Fällen - Hacken manuell</b>	<b>Motor-manuelles Fällen - Hacken kranbeschickt</b>	<b>Motor-manuelles Fällen - Vorkonzentrieren - Hacken kranbeschickt</b>	<b>Fäller-Bündler - Rücken - Hacken am zentralen Platz</b>	<b>Gehölmähhäcksler</b>	<b>Fällen - Rücken - Hacken am zentralen Platz</b>	<b>Harvesterfällung - Rücken - Hacken am zentralen Platz</b>
<b>Gerät</b>	Motorsäge (2,6 KW)	Motorsäge (2,6 KW)	Motorsäge (2,6 KW)	Fäller-Bündler TJ 720 an Timberjack TJ 870 (114 KW)	-	Motorsäge (2,6 KW)	Harvester Timberjack 870
<b>Verbrauch</b>	<b>3,19 kg</b> Zweitaktgemisch	<b>3,19 kg</b> Zweitaktgemisch	<b>2,99 kg</b> Zweitaktgemisch	<b>23,41 kg</b> Diesel	-	<b>0,93 kg</b> Zweitaktgemisch	<b>12,28 kg</b> Diesel
	<b>1,91 kg</b> Sägenkettenöl	<b>1,91 kg</b> Sägenkettenöl	<b>1,77 kg</b> Sägenkettenöl	-	-	<b>0,55 kg</b> Sägenkettenöl	-
<b>Gerät</b>	-	-	Traktor mit Frontgabel (74 KW)	Rückemaschine Ponsse S16 (158 KW)	-	Rückemaschine HSM 805 (85 KW)	Rückemaschine HSM 805 (85 KW)
<b>Verbrauch</b>	-	-	<b>7,30 kg</b> Diesel	<b>8,68 kg</b> Diesel	-	<b>12,54 kg</b> Diesel	<b>12,54 kg</b> Diesel
<b>Gerät</b>	Hacker Pöttinger WI-DU an Traktor (96 KW)	Hacker Eschlböck Biber 7 an Traktor (110 KW)	Hacker Eschlböck Biber 7 an Traktor (110 KW)	Hacker Heizomat an Traktor (147 KW)	Gehölmähhäcksler an JCB Fastrac (96 KW)	Hacker Heizomat mit eigenem Motor (137 KW)	Hacker Heizomat mit eigenem Motor (137 KW)
<b>Verbrauch</b>	<b>40,49 kg</b> Diesel	<b>49,05 kg</b> Diesel	<b>46,96 kg</b> Diesel	<b>59,50 kg</b> Diesel	<b>36,44 kg</b> Diesel	<b>29,85 kg</b> Diesel	<b>29,85 kg</b> Diesel
<b>Gerät</b>	Traktor mit Anhänger (66 KW)	Traktor mit Anhänger (66 KW)	Traktor mit Anhänger (66 KW)	-	Traktor mit Anhänger (66 KW)	Traktor zum Versetzen der Container (66KW)	Traktor zum Versetzen der Container (66KW)
<b>Verbrauch</b>	<b>3,39 kg</b> Diesel	<b>1,33 kg</b> Diesel	<b>1,32 kg</b> Diesel	-	<b>3,79 kg</b> Diesel	<b>0,29 kg</b> Diesel	<b>0,29 kg</b> Diesel
<b>Gerät</b>	-	-	-	-	-	Traktor als Zugmaschine für Hacker (121 KW)	Traktor als Zugmaschine für Hacker (121 KW)
<b>Verbrauch</b>	-	-	-	-	-	<b>0,28 kg</b> Diesel	<b>0,28 kg</b> Diesel

### **Submodul Rodung**

Wie lange Kurzumtriebsplantagen Holz produzieren können ist noch nicht bekannt. Die Nutzungsdauer hängt von den Längen der Ernteintervalle, der Pfléglichkeit der Erntefahren und den angebauten Klonen ab. Für die vorliegende Ökobilanzierung wurde ein Zeitrahmen von dreißig Jahren gewählt, der nach den bisherigen Erfahrungen höchstwahrscheinlich erreicht werden kann.

Irgendwann aber wird die Wiederausschlagsfähigkeit der Stöcke nachlassen und die Fläche muss einer sinnvollen Verwendung zugeführt werden. Die Rückumwandlung von KUP in landwirtschaftliche Nutzfläche durch Zerschlagen der Stöcke mit einer Tieffräse ist mit hohen Kosten verbunden (Kapitel 3.6). Ob diese Maßnahme von einem betriebswirtschaftlich denkenden Landwirt tatsächlich durchgeführt würde, scheint fraglich. Möglicherweise wird er sich eher für die Anlage einer Nachfolge-KUP durch Abstecken der Zwischenräume der alten Reihen entscheiden.

In die vorliegende Ökobilanzierung wird das Submodul „Rodung“ einbezogen. Zum einen erfordert eine Ökobilanz die möglichst vollständige Abbildung aller Umweltwirkungen, zum anderen werden Veränderungen im Boden-Kohlenstoffhaushalt in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt (Kapitel 6.4.3), was zumindest im Modell die Wiederherstellung des Ausgangszustandes „landwirtschaftliche Nutzung“ nach dem Ende der Bewirtschaftung als KUP notwendig macht.

Datengrundlage für das Submodul „Rodung“ bildet eine Zeitstudie, die bei der Rückumwandlung einer KUP-Versuchsfläche mit Balsampappeln durchgeführt wurde. Die Versuchsfläche befand sich zu diesem Zeitpunkt in der dritten Rotationsperiode. Eingesetzt war eine Tieffräse an einem Traktor mit 226 KW (Tabelle 48). Die abgeerntete Plantage wurde in zwei Arbeitsgängen gerodet. Zuerst wurde der Boden oberflächlich gefräst, um eine glatte Arbeitsfläche herzustellen. In einem zweiten Gang erfolgte das Tieffräsen der Fläche. Der Arbeitszeitbedarf pro Hektar betrug 8,95 Stunden. Während dieser Zeit arbeitete der Traktor fast ausschließlich in einem hohen Leistungsbereich. Der Verbrauch an Dieselkraftstoff war mit 423 Litern pro Hektar sehr hoch. Die Umweltwirkungen der Rodung werden wegen der Vergleichbarkeit mit der landwirtschaftlichen Produktion auf ein Jahr bezogen, also durch die angenommene Gesamtnutzungsdauer der Plantage von dreißig Jahren geteilt. Mit einberechnet werden auch die Vorketten von Traktor und Tieffräse sowie die Vorketten des verbrauchten Dieselkraftstoffs.

### **6.4.2.3 Modul: Verbrennung der Hackschnitzel**

Die Ökobilanzierung der Verbrennung der Hackschnitzel erfolgte in zwei Varianten, einer 300 KW Hackschnitzelheizung und einer 1,4 MW Kraft-Wärme-Kopplung-Anlage. Für die Anlieferung der Hackschnitzel an das Heizwerk wurden landwirtschaftliche Schlepper mit Hänger bilanziert, als Transportentfernung zehn Kilometer als realistisch angenommen. Bei der Versorgung der 1,4 MW KWK-Anlage wurden LKW mit Containern heran gezogen, die Entfernung mit 20 Kilometern kalkuliert. Die verwendeten Prozesse stammen aus der ecoinvent Datenbank. Sie wurden hinsichtlich des Wirkungsgrads der Anlagen an bayerische Verhältnisse angepasst (HIENDLMEIER 2009, LEUCHTWEIS 2010).

### **6.4.3 Boden-Kohlenstoffhaushalt**

Genau und quantitativ abgesicherte Aussagen zu den Auswirkungen des Anbaus von KUP auf den Boden-Kohlenstoffhaushalt liegen nicht vor. RÖDL (2008) zitiert einige Arbeiten, die eine Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes im Boden feststellten. STETTER und MAKESCHIN (1999) fanden in einem deutschlandweiten Verbundprojekt auf drei Standorten keine signifikanten Unterschiede bei den Humus- und Stickstoffvorräten im Solum unter Pappeln und Weiden im Vergleich zu landwirtschaftlich genutzten Böden. Nach QUINKENSTEIN et al. (2008) stellt sich durch den Anbau von KUP ein neues Gleichgewicht im Kohlenstoff-Kreislauf ein. Bis dieses erreicht ist, kann es, abhängig von den Ausgangsbedingungen sowohl zu einer Speicherung als auch zu einer Freisetzung von Kohlenstoff kommen. Zumeist kann allerdings von einer zusätzlichen Festlegung von Kohlenstoff ausgegangen werden. Nach MAKESCHIN (1995) schwanken die Veränderungen des Kohlenstoffgehaltes je nach Tiefenstufe. Eine einheitliche Zu- oder Abnahme kann er nicht feststellen.

In ihrer Ökobilanzierung von KUP ließ RÖDL (2008) die Kohlenstoffspeicherung im Boden deshalb unberücksichtigt. Auch HELLER et al. (2003) gingen nicht von Veränderungen beim Kohlenstoff-Haushalt in Böden unter KUP aus. In der vorliegenden Arbeit wird deshalb ebenfalls eine stabile Humusbilanz angenommen. Dies ist insbesondere auch unter der Annahme statthaft, dass bei dem hier dargestellten Ökobilanzierungs-Modell nach Abschluss der Nutzung als Energieplantage die Fläche gerodet und die vormalige Ackernutzung wieder aufgenommen wird. Das ursprüngliche Gleichgewicht stellt sich also nach dreißig Jahren wieder ein.

### **6.4.4 Düngung von Kurzumtriebsplantagen**

Da die Ernte von Kurzumtriebsplantagen ausschließlich in der laubfreien Zeit erfolgt, ist der Nährstoffentzug wesentlich geringer als bei landwirtschaftlichen Kulturen. Nach RÖHRICHT und RUSCHER (2004) sind allein im Laub der Bäume 30 % der aufgenommenen Nährstoffe

gebunden. Die gleichen Autoren weisen weiterhin nach, dass die Nährstoffgehalte im Erntegut, also in den Hackschnitzeln, mit steigender Umtriebszeit stark abnehmen.

Die Düngung von Kurzumtriebsplantagen wird kontrovers diskutiert. Während BOELKE (2006) während der ersten drei bis vier Rotationen keine Grunddüngung für notwendig erachtet, sollte nach KAUTER et al. (2001) eine standortangepasste Düngung vorgenommen werden. RÖHRICHT und RUSCHER (2004) geben für verschiedene Ertragsniveaus Nährstoffentzüge der Elemente Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium an. RÖDL (2008) berechnete auf Grund dieser Werte eine zweite Ökobilanzierungs-Variante, in die die Düngung einbezogen wird. Nach SCHOLZ et al. (2009a) wirken sich Düngergaben bei Balsampappel-KUP nur in der Begründungsphase ertragssteigernd aus, so dass später keine Düngung mehr notwendig ist.

JUG (1998) untersuchte im Rahmen eines Düngeversuches die Nährelementgehalte in den Blättern von zwei Balsampappelklonen und jeweils einem Aspen- und Weidenklon. Die Düngergaben in verschiedenen Varianten bewirkten beim Element **Stickstoff** nur zum Teil einen tendenziellen Anstieg der N-Blattspiegelwerte. Nur bei der Balsampappelsorte Max erhöhten sich die N-Gehalte in den Blättern in der ersten Rotation bei einer der drei Düngevarianten signifikant. Insgesamt waren über beide Rotationen die Blattspiegelwerte der ungedüngten Nullvariante ausreichend mit Stickstoff versorgt. Beim Element **Phosphor** war die Versorgung ohne Düngergabe bei fast allen Klonen über beide Rotationen ausreichend. Lediglich bei der Balsampappel Max erreichten die Blattspiegelwerte in einem Jahr nicht die angegebenen Gehalte für eine optimale Ernährung. In diesem Fall führten allerdings auch die Düngergaben nicht zu einer Verbesserung des Ernährungszustandes bei Phosphor. Die **Kalium**versorgung zeigt ein ähnliches Bild. Die Blattspiegelwerte der beiden Balsampappeln waren in der Regel im optimalen Bereich, nur der Klon Muhle-Larsen unterschritt in einem Jahr den einschlägigen Grenzwert. Auch hier erhöhte keine der Düngevarianten während beider Rotationen die Kaliumgehalte in den Muhle Larsen Blättern. Beide Balsampappelklone sind auch mit **Calcium** gut versorgt. Nur in einem Jahr lag der Blattgehalt des Klons Muhle-Larsen in der ungedüngten Variante unter dem angegebenen optimalen Bereich. Die **Magnesium**gehalte des Klons Muhle-Larsen lagen durchwegs im Bereich einer optimalen Ernährung. Bei der Sorte Max lagen die Mg-Gehalte meist im Mangelbereich; nach Aussage von JUG (1998) ist die Definition der optimalen Ernährungsgrenze hier jedoch nicht klonspezifisch und vermutlich zu hoch gewählt.

Auch KERN et al. (2009) finden in einem neu angelegten Düngeversuch mit Pappeln und Weiden im ersten Vegetationsjahr keine signifikanten Wachstumsunterschiede zwischen den Düngegraden.

Die gute Nährstoffversorgung der Pappeln spiegelt sich auch in den ertragskundlichen Ergebnissen von JUG (1998) wider. Weder die Stickstoff- noch die Volldüngung hatten einen Einfluss auf das Höhenwachstum der Pappeln. Nur die Weiden zeigten auf drainierten Standorten ein signifikant besseres Höhenwachstum nach Stickstoffdüngung. Zum gleichen Ergebnis kommen auch SCHOLZ und ELLERBROCK (2002): Der Einfluss von Düngergaben auf das Wachstum der Balsampappel ist viel geringer als bei der Weide.

JUG (1998) analysierte den Ernährungszustand der angebauten Baumarten auf drei Versuchsstandorten in Deutschland in den ersten beiden Rotationsperioden. In den Plantagen wurden jährlich in der ersten Augushälfte, die bezüglich der Nährstoffversorgung der Blätter eine Phase der Stabilität darstellt, Blattproben vom Gipfeltrieb der Bäume genommen. Dreißig Blätter ergaben eine Mischprobe, die im Trockenschrank bei 65 ° C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und im Labor mit einer Mühle gemahlen wurde. Anschließend erfolgte die Analyse im Labor.

Tabelle 51: Bereiche einer ausreichenden Ernährung von Pappeln anhand der Blattspiegelwerte, nach VAN DEN BURG (1985 und 1990) und BERGMANN (1993)

Baumart	N (mg/g)	P (mg/g)	K (mg/g)	Ca (mg/g)	Mg (mg/g)
<b>Populus trichocarpa (Muhle-L.)</b>	17,1 - 25,3	1,0 - 4,4	7,0 - 17,6	3,0 - 6,8	1,4 - 3,0
<b>Populus (Androscoggin und Max)</b>	18,0 - 25,0	1,8 - 3,0	12,0 - 18,0	3,0 - 15,0	2,0 - 3,0

Auf den geschilderten Versuchsergebnissen von JUG (1998) sollte im hiesigen Projekt aufgebaut werden. Deshalb wurden auf der ältesten Versuchsfläche Wöllershof, beginnend 2003, dem ersten Jahr der dritten Rotation nach o. g. Methode Blattproben genommen, getrocknet, gemahlen und im Labor analysiert. Beprobte wurden die Balsampappelklone Androscoggin, Muhle-Larsen, Max 3 und Max 4 des fünfjährigen Umtriebes. Die Untersuchungen wurden 2003 und 2007, also im ersten und letzten Jahr der dritten Umtriebszeit und 2008, dem ersten Jahr des vierten Umtriebes durchgeführt. Um eventuelle Tendenzen in der Nährstoffausstattung festzustellen, wurde zunächst geprüft, ob die Voraussetzungen für eine Varianzanalyse (ANOVA) vorliegen. Anschließend wurden die Blattspiegelwerte mittels einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit den unabhängigen Faktoren Jahr und Klon und dem abhängigen Faktor Nährelementkonzentration auf Signifikanzen untersucht (siehe Anhang).

Die beiden zweiseitigen  $H_0$ -Hypothesen lauten:

1. Es bestehen **keine** signifikanten Unterschiede in der Ernährung zwischen den Jahren 2003 und 2008.

2. Es bestehen **keine** signifikanten Unterschiede in der Nährelementausstattung zwischen den Klonen.

Im Folgenden wird anhand der Nährelemente Stickstoff, Phosphor und Kalium der Ernährungszustand des Wiederaustriebs von vier Pappelklonen der Versuchsfläche Wöllershof in den Jahren 2003 und 2008, also elf und 16 Jahre nach der Begründung dargestellt. Die Versuchsfläche wurde in diesem Zeitraum nicht gedüngt.

Tabelle 52: Stickstoff-Blattspiegelwerte von vier Balsampappelklonen in den Jahren 2003 und 2008, Versuchsfläche Wöllershof, Oberpfalz

Jahr	Klon	Mittelwert N in mg/g	Standard- abweichung	N
2003	Androscoggin	25,05	4,15	6
	Muhle-Larsen	22,06	2,98	7
	Max3	28,77	1,46	6
	Max4	30,89	3,59	8
	Gesamt	26,83	4,69	27
2008	Androscoggin	27,08	2,29	6
	Muhle-Larsen	28,00	1,35	6
	Max3	30,06	1,97	6
	Max4	29,48	2,42	8
	Gesamt	28,72	2,28	26
2003 und 2008	Androscoggin	26,07	3,36	12
	Muhle-Larsen	24,80	3,83	13
	Max3	29,42	1,78	12
	Max4	30,18	3,04	16
	Gesamt	27,76	3,80	53

Tabelle 52 zeigt die gemittelten Blattspiegelwerte von **Stickstoff** in den Blättern von vier Balsampappelklonen in den Jahren 2003 und 2008, also im ersten Jahr der dritten und vierten Rotationsperiode. Zunächst fällt auf, dass die Balsampappeln auch elf bzw. 16 Jahre nach Begründung der Plantage ausreichend mit Stickstoff versorgt sind. In keinem Fall werden die in Tabelle 51 genannten Werte unterschritten, sondern zum Teil sogar übertroffen. Im Vergleich der **Jahre** ist keine abnehmende Tendenz bei den Stickstoffgehalten der Blätter festzustellen. Vielmehr steigen die Blattspiegelwerte von 2003 bis zum Jahr 2008, mit Ausnahme des Klones Max 4 an. Dieser Eindruck der deskriptiven Statistik wird durch die Varianzanalyse bestätigt. Die ANOVA zeigt für 2008 einen signifikant anderen Gehalt an Stickstoff als 2003. Die  $H_0$ -Hypothese 1 muss daher verworfen werden. Die Varianzanalyse zeigt außerdem einen signifikanten Einfluss des **Klons** auf die Ausstattung mit Stickstoff. Auch die  $H_0$ -Hypothese 2 kann daher nicht bestätigt werden. Der letzte Teil der Tabelle mit den Durchschnittswerten unabhängig von den Jahren 2003 und 2008 verdeutlicht diese

Unterschiede. Muhle-Larsen und Androscoggin sind schlechter mit Stickstoff versorgt als die beiden Max-Klone, allerdings immer noch in einem optimalen Bereich bzw. darüber. Insgesamt ist keine abnehmende Tendenz in der Versorgung mit Stickstoff festzustellen, der Ernährungszustand der Pappeln bzgl. Stickstoff ist hervorragend und steigt in dem untersuchten Zeitraum sogar an.

Auch die Darstellung der **Phosphorversorgung** der Blätter in Tabelle 53 lässt keinen Nährstoffmangel erkennen. Die Spiegelwerte liegen in beiden **Jahren** bei allen Klonen im optimalen Bereich, z.T. darüber. Im Gegensatz zur Stickstoffausstattung zeigt die deskriptive Darstellung hier allerdings keine klaren Tendenzen zwischen 2003 und 2008. Dies wird durch die schließende Statistik bestätigt. Die ANOVA konnte zwischen den Jahren keine signifikanten Unterschiede in der Phosphorausstattung feststellen. Die  $H_0$ -Hypothese 1 kann also bestätigt werden.

Tabelle 53: Phosphor-Blattspiegelwerte von vier Balsampappelklonen in den Jahren 2003 und 2008, Versuchsfläche Wöllershof, Oberpfalz

Jahr	Klon	Mittelwert P in mg/g	Standard- abweichung	N
2003	Androscoggin	3,42	0,20	6
	Muhle-Larsen	3,75	0,48	7
	Max3	4,34	0,99	6
	Max4	4,02	0,31	8
	Gesamt	3,89	0,62	27
2008	Androscoggin	3,60	0,21	6
	Muhle-Larsen	4,04	0,49	6
	Max3	4,32	1,29	6
	Max4	3,95	0,22	8
	Gesamt	3,98	0,68	26
2003 und 2008	Androscoggin	3,51	0,22	12
	Muhle-Larsen	3,88	0,49	13
	Max3	4,33	1,09	12
	Max4	3,98	0,26	16
	Gesamt	3,93	0,65	53

Betrachtet man die Ausstattung der **Klone** mit Phosphor, zeigt sich, dass die Durchschnittswerte für beide Jahre bei allen Klonen bis auf Muhle-Larsen über dem in Tabelle 51 als ausreichend angegebenen Bereich liegen. Jedoch zeigt sich eine schlechtere Ausstattung von Androscoggin und Muhle-Larsen im Vergleich zu Max 3 und 4. Bestätigt wird dies durch die Ergebnisse der Varianzanalyse. Zwischen den Klonen bestanden signifikante Unterschiede in der Nährstoffausstattung mit Phosphor. Die  $H_0$ -Hypothese 2 muss demnach verworfen werden.

Die Ausstattung mit **Kalium** lag, wie Tabelle 54 zeigt, bei allen Klonen und in beiden Jahren über den als ausreichend angesehenen Werten. Weiterhin konnte kein Einfluss des **Jahres** festgestellt werden. Die schließende Statistik ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Jahren 2003 und 2008 (Bestätigung der  $H_0$ -Hypothese 1). Der Ernährungszustand der vier Balsampappelklone hat sich in fünf Jahren nicht verschlechtert, er ist nach wie vor hervorragend. Ein signifikanter Unterschied besteht allerdings zwischen den **Klonen**, was zur Ablehnung der  $H_0$ -Hypothese 2 führt. Wie der Vergleich der Mittelwerte über beide Jahre am Ende von Tabelle 54 zeigt, sind Androscoggin und Muhle-Larsen deutlich besser versorgt als Max 3 und 4.

Tabelle 54: Kalium-Blattspiegelwerte von vier Balsampappelklonen in den Jahren 2003 und 2008, Versuchsfläche Wöllershof, Oberpfalz

Jahr	Klon	Mittelwert K in mg/g	Standard- abweichung	N
2003	Androscoggin	23,08	1,04	6
	Muhle-Larsen	21,31	2,03	7
	Max3	21,41	1,34	6
	Max4	20,64	1,07	8
	Gesamt	21,53	1,62	27
2008	Androscoggin	24,16	1,67	6
	Muhle-Larsen	22,05	2,77	6
	Max3	20,55	1,52	6
	Max4	19,62	0,84	8
	Gesamt	21,44	2,42	26
2003 und 2008	Androscoggin	23,62	1,44	12
	Muhle-Larsen	21,65	2,32	13
	Max3	20,98	1,44	12
	Max4	20,13	1,07	16
	Gesamt	21,49	2,03	53

Die hier dargestellten Ergebnisse belegen schlüssig, dass selbst auf einem relativ flachgründigen Boden in der Oberpfalz zwischen den Jahren elf und 16 der Standzeit der Plantage keine abnehmenden Tendenzen in der Nährstoffausstattung zu erkennen sind. Alle Balsampappelklone waren hervorragend versorgt. Im Fall der Stickstoffernährung ist sogar eine zunehmende Tendenz zu erkennen. Die Blattspiegelwerte liegen meist **über** den als ausreichend angegebenen Bereichen der Tabelle 51. Angesichts dieser Ergebnisse ist während der im Ökobilanzierungs-Modell angenommenen Nutzungsdauer von 30 Jahren mit Sicherheit nicht mit einem Nährstoffmangel zu rechnen. Eine Düngung von Kurzumtriebsplantagen ist nicht notwendig und wird somit **nicht** bilanziert.

### 6.4.5 Stickstoffaustrag mit dem Sickerwasser

Seit den fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts ist der Stickstoffeinsatz in der Landwirtschaft stark gestiegen. FLAIG und MOHR (1996) errechneten für das Jahr 1991 einen durchschnittlichen Überschuss in der Stickstoffbilanz der BRD von 100 Kilogramm pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche. Überschüssiger Nitrat-Stickstoff gelangt durch Versickerung in das Grundwasser und kann über die Aufnahme mit dem Trinkwasser insbesondere bei Neugeborenen zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen.

Für die Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen stellt sich die Frage, ob ein nennenswerter, mit der Bewirtschaftung als KUP in Zusammenhang stehender Nitrataustrag, der die Grenzen des Systems Richtung Grundwasser verlässt, existiert und in die LCA einbezogen werden muss oder nicht.

Der Anbau von Kurzumtriebsplantagen auf vormalig landwirtschaftlich genutzten Böden und der Verzicht auf Düngung lässt eine Verbesserung des Nitratgehaltes im Sickerwasser erwarten. Wie sich der Nitratgehalt im Sickerwasser unter KUP im Vergleich zur landwirtschaftlichen Nutzung verändert, wurde auf einer Versuchsfläche der Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft untersucht.

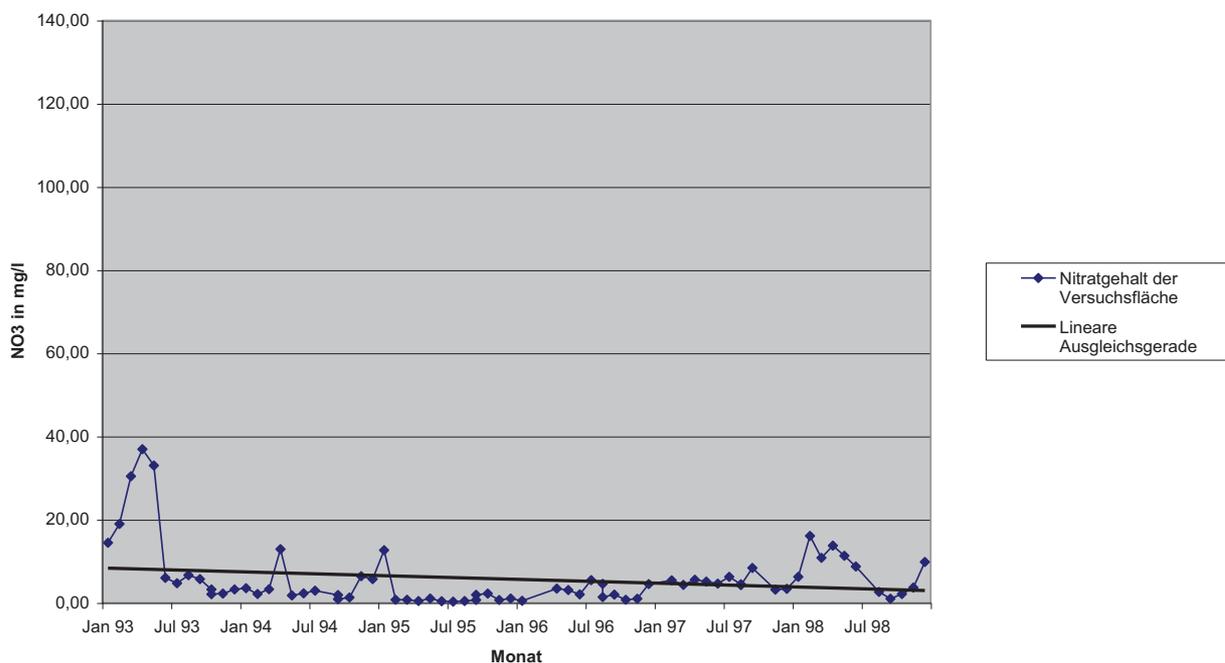


Abbildung 55: Nitratkonzentrationen im Sickerwasser der KUP-Versuchsfläche von Januar 1993 bis Dezember 1998

Auf einer Kurzumtriebs-Versuchsfläche in der Oberpfalz sowie auf der angrenzenden landwirtschaftlich genutzten Fläche wurden zwei Saugkerzenanlagen installiert mit deren Hilfe über einen Zeitraum von sechs Jahren im Vier-Wochen-Turnus Sickerwasserproben direkt aus dem Solum in 0,2 und 0,6 Meter Tiefe entnommen wurden. Die Sickerwasserproben wurden im Labor auf ihre Nitratgehalte analysiert.

Abbildung 55 zeigt den Verlauf der Nitratkonzentration im Sickerwasser der im Mai 1992 begründeten KUP-Versuchsfläche. Im Jahr 1993 stieg der Nitratgehalt noch einmal bis 40 mg Nitrat pro Liter an, fiel dann stark ab und erreichte im gesamten Zeitraum bis 1998 Werte von maximal 15 mg pro Liter. Insbesondere in den für die Grundwasserbildung wichtigen Wintermonaten lag der Wert nur in einem Jahr (1995) über zehn Milligramm. Die lineare Ausgleichsgerade zeigt einen langsam fallenden Verlauf, der von knapp zehn Milligramm Anfang 1993 bis unter vier Milligramm Nitrat pro Liter am Ende des Betrachtungszeitraumes abfällt. Der Anstieg der Nitratwerte ab Anfang 1998, also drei Monate vor der Ernte ist mit den vorliegenden Daten nicht zu erklären.

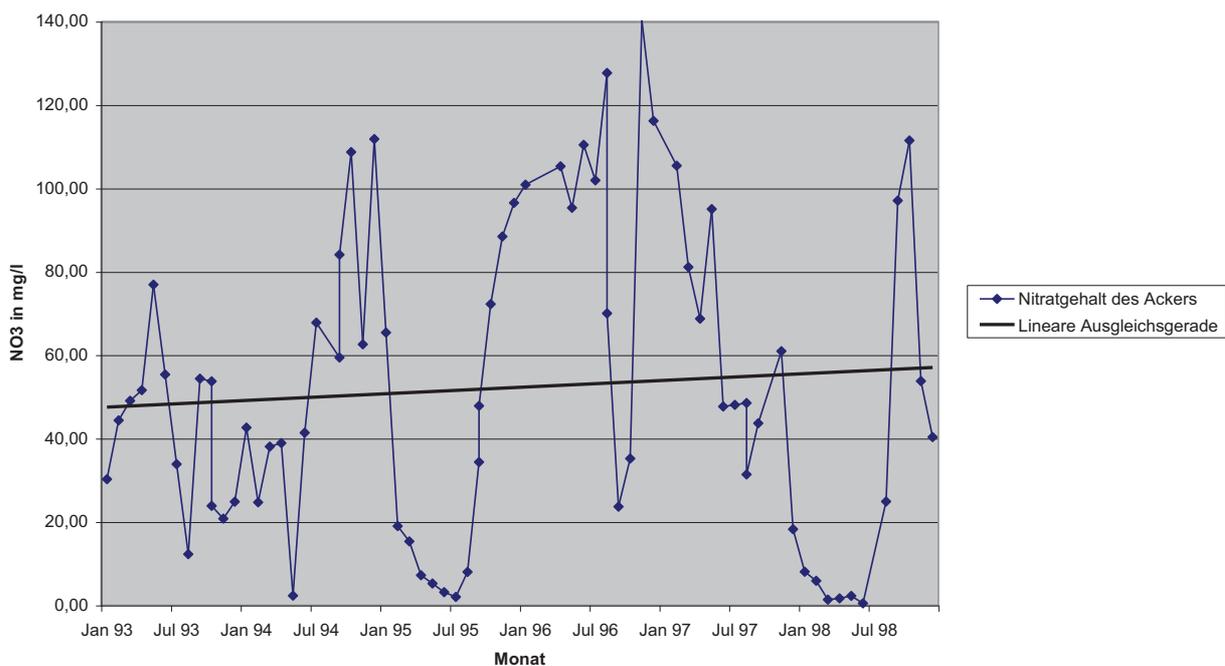


Abbildung 56: Nitratkonzentrationen im Sickerwasser des angrenzenden Ackers von Januar 1993 bis Dezember 1998

Ganz anders verläuft die Kurve des benachbarten Ackers. Die Nitratkonzentration in Abbildung 56 schwankt sehr stark zwischen nahe Null und im Maximum 140 Milligramm Nitrat pro Liter. Die Ausgleichsgerade zeigt sehr gut, dass der Durchschnittswert sich zwischen etwas unter 50 und knapp 60 Milligramm Nitrat pro Liter bewegt.

MAKESCHIN et al. (1989) kamen bei ihren Untersuchungen zu Stofffrachten im Sickerwasser einer KUP-Versuchsfläche bei Regensburg zum gleichen Ergebnis. Die Nitratgehalte sanken in dem beprobten Zeitraum von 1984 bis 1987 stark ab. Erstaunlicherweise waren in der vorrangig als Düngeversuch konzipierten Arbeit keine signifikanten Unterschiede zwischen den Nitratfrachten von gedüngten und ungedüngten Versuchspartzen festzustellen.

Auch EVERS (2001) stellt in seiner Untersuchung zur Nitrat-Stickstoff-Konzentration in der Bodenlösung einer Erstaufforstungsfläche die gleiche Tendenz fest. Am Anfang der Untersuchung lagen die Konzentrationen noch über dem Trinkwassergrenzwert, in einem Zeitraum von drei Jahren sanken sie bis unter die Nachweisgrenze.

Aktuelle Ergebnisse zum Nitratatrag mit dem Sickerwasser stellen STOLL und DOHRENBUSCH (2010) im Rahmen des Projekts NOVALIS vor. Auch hier sinkt der Nitratatrag auf der KUP-Fläche innerhalb kurzer Zeit stark ab und bleibt wegen der Bodenruhe dauerhaft auf einem niedrigen Niveau.

Die aufgeführten Untersuchungen zeigen alle ein schnelles Absinken der Nitratfrachten im Sickerwasser unter Kurzumtriebsplantagen. Die geringen Mengen Nitrat, die das System auch noch nach Jahren verlassen, sind mit Sicherheit Folgen der vormaligen landwirtschaftlichen Nutzung. In die vorliegende Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen wird deshalb ein Nitratatrag **nicht** einbezogen.

### **6.5 Ergebnisse der Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen**

Um einen ökobilanziellen Vergleich mit den landwirtschaftlichen Energiekulturen zu ermöglichen, werden alle während der Gesamtnutzungsdauer einer Kurzumtriebsplantage notwendigen Bewirtschaftungsmaßnahmen auf ein Jahr bezogen und auf einer reduzierten Fläche virtuell durchgeführt („Normalwaldmodell“). Die Umweltwirkungen des Anbaus können so, wie in der Landwirtschaft, den jährlichen Erträgen eines Hektars gegenüber gestellt werden. Es findet modellhaft eine Anpassung von forst- und landwirtschaftlichen Produktionszyklen statt.

Landwirtschaftliche Energiekulturen werden allerdings nicht jedes Jahr auf demselben Standort angebaut, sondern sind Bestandteil einer Fruchtfolge. Der Vergleich von einem Hektar KUP mit einem Hektar Winterraps spiegelt deshalb nicht die Realität der landwirtschaftlichen Produktion wider. Die in einer Ökobilanzierung vorgesehenen Möglichkeiten, mit Hilfe einer Systemraumerweiterung den Kurzumtriebsplantagen die Umweltwirkungen der äquivalenten Menge von z. B. Winterweizen zuzuschlagen oder mit einer sogenannten Allokation die Umweltwirkungen einer Fruchtfolge auf die beteiligten Feldfrüchte zu verteilen (GÄRTNER et al. 2008), lassen keinen exakten Vergleich zu.

Für den Vergleich der Umweltwirkungen von KUP mit den für die landwirtschaftlichen Energiekulturen berechneten Daten von BYSTRICKY (2009) wird deshalb jeweils eine annuelle Kultur aus der Fruchtfolge herausgegriffen. Bei Winterraps wird nur der Raps selbst betrachtet, da diese Kultur die Fläche ein Jahr bedeckt, bei den anderen Kulturen zusätzlich eine Zwischenfrucht einbezogen. Da die Berechnung des Düngedarfs einer landwirtschaftlichen Kultur nur möglich ist, wenn Vorfrucht und eventuelle Zwischenfrüchte berücksichtigt werden, sind die Wirkungen der Fruchtfolgen zum Teil in den Vergleichen enthalten (BYSTRICKY 2009). Die landwirtschaftlichen Ertragsdaten für den Vergleich in der Energiebilanz stammen aus dem landwirtschaftlichen Erzeugungsgebiet Steigerwald-Vorland, die Daten zum Vergleich von Treibhauspotenzial und Eutrophierungspotenzial aus dem Erzeugungsgebiet Regensburg-Straubinger-Gäu (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK UND DATENVERARBEITUNG 2007).

### **6.5.1 Ergebnisse der Sachbilanz**

Dargestellt werden die Sachbilanz-Ergebnisse des Anbaus und der Ernte von Kurzumtriebsplantagen im Vergleich zu landwirtschaftlichen Energiekulturen. Als Energieoutput wird bei den KUP der untere Heizwert ( $H_u$ ) von absolut trockenem Holz angenommen, bei den landwirtschaftlichen Vergleichskulturen Winterraps, Winterweizen, und Silomais ebenfalls der  $H_u$  in absolut trockenem Zustand.

#### **6.5.1.1 Energieeinsatz und Energiebilanz des Anbaus und der Ernte von KUP**

Den jährlichen Energieinput in eine Kurzumtriebsplantage differenziert nach sieben Erntelinien stellt Abbildung 57 dar. Der Energieinput umfasst auch die Rodung am Ende der Nutzungsdauer der Plantage, die mit 30 Jahren kalkuliert wurde. Den geringsten Energieaufwand mit 3300 MJ pro Hektar und Jahr erfordert der Anbau von KUP in der fünfjährigen Rotation mit vollautomatischer Ernte durch den Gehölmähmäcksler, gefolgt vom zehnjährigen Umtrieb mit motormanueller Ernte und anschließendem Rücken und Hacken an einem zentralen Platz mit 3450 MJ Energiebedarf. Den höchsten Energieinput mit über 6000 MJ pro Jahr und ha benötigt der fünfjährige Umtrieb bei Ernte mit dem Fäller-Bündler und anschließendem Rücken und Hacken am zentralen Platz. Den größten Energieverbrauch bei dieser Erntelinie verursachte die Teilarbeit Hacken (Tabelle 57). Eine zweite, sehr viel kürzere Zeitstudie mit einem anderen Hacker wies bei gleichem Kraftstoffverbrauch eine wesentlich höhere Produktivität auf. Zieht man diese Zeitstudie zur Ökobilanzierung heran, so sinkt der Energieinput des KUP-Anbaus mit Fäller-Bündler-Ernte auf 4950 MJ pro Jahr und Hektar und liegt dann nicht mehr wesentlich über dem Ernteverfahren mit motormanueller Ernte, Vorkonzentrieren und mobilem Kranhacker. Vergleicht man die beiden Umtriebszeiten miteinander, so ist der durchschnittliche Energiebedarf bei Anbau in der zehnjährigen Rotation geringer als im fünfjährigen Umtrieb.

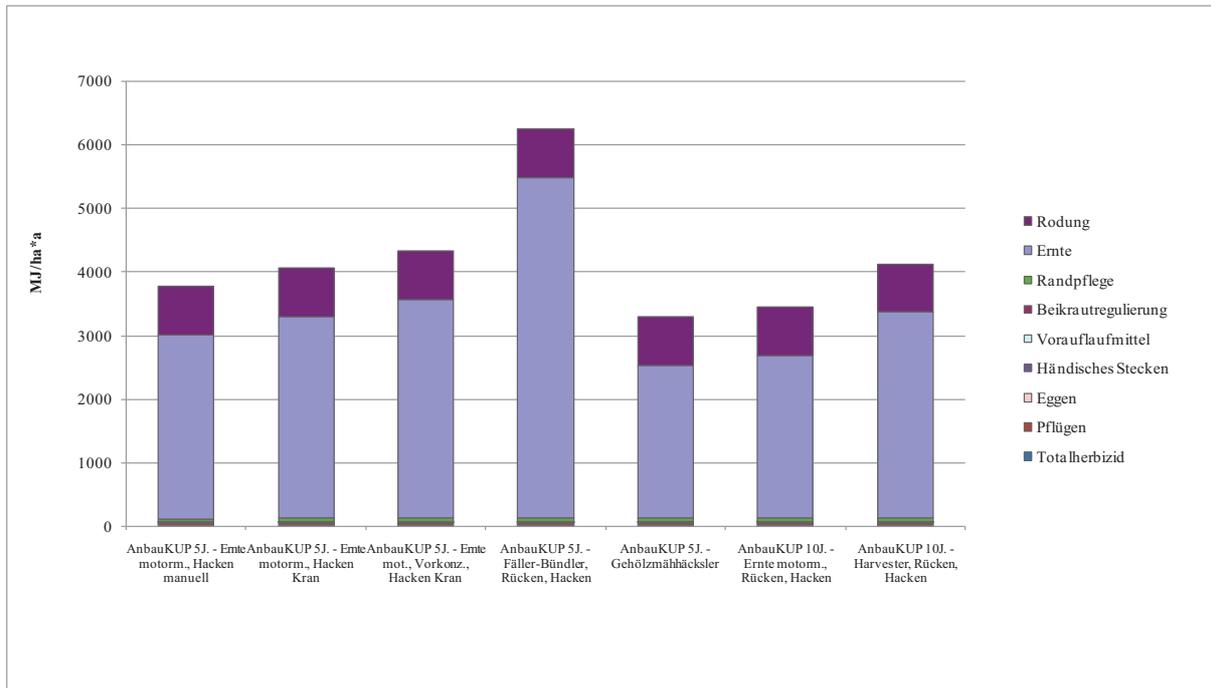


Abbildung 57: Energieinput pro Hektar und Jahr bei Anbau und Ernte von Kurzumtriebsplantagen differenziert nach sieben Erntelinien

Auffallend hoch ist der Anteil der für Ernte und Rodung aufgewendeten Energie. Die Abbildungen 58 und 59 zeigen den prozentualen Energieaufwand für die einzelnen Maßnahmen bei der Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen jeweils für die Erntelinie mit dem geringsten und dem höchsten Energieinput.

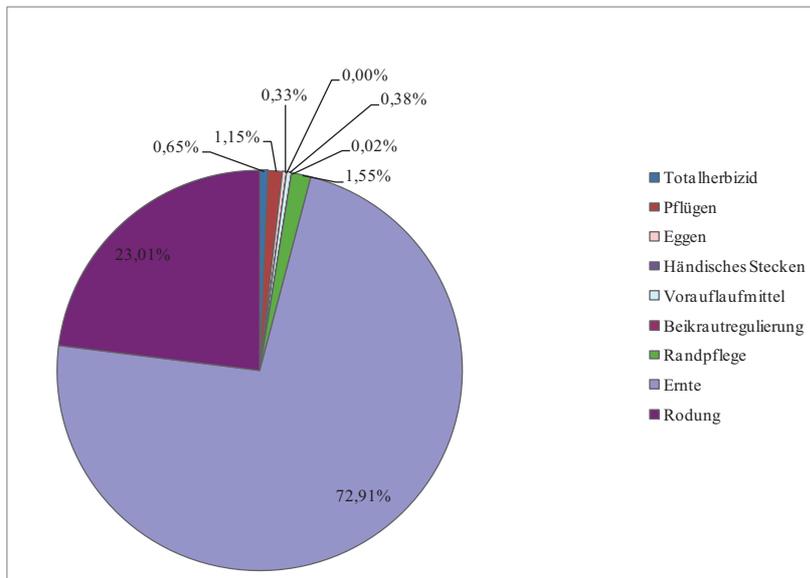


Abbildung 58: Der Energieinput bei Anbau und Ernte von KUP im fünfjährigen Umtrieb, Ernte mit dem Gehölzmähhäcksler, prozentual differenziert nach den Maßnahmen der Bewirtschaftung

Beim Anbau von KUP im fünfjährigen Umtrieb und vollautomatischer Ernte mit dem Gehölmähhäcksler liegt der prozentuale Energieanteil der Ernte bei 73 %. Zusammen mit der Rodung ist die Ernte für 96 % der gesamten Energieaufwendungen verantwortlich. Alle sonstigen Bewirtschaftungsmaßnahmen, vom Einsatz des Totalherbizids, Pflügen, Eggen bis zur Beikrautregulierung und Randpflege kommen zusammen auf nur 4 % des gesamten Energieinputs. Der Einsatz einer Pflanzmaschine statt händischen Einbringens der Stecklinge erhöht den Energieverbrauch nur um ca. 0,02 %. Bei einer Ernte mit dem Fäller-Bündler, der für das Anbausystem KUP einen fast doppelt so hohen Energieinput bedeutet, steigt der Anteil von Ernte und Rodung auf 98 %.

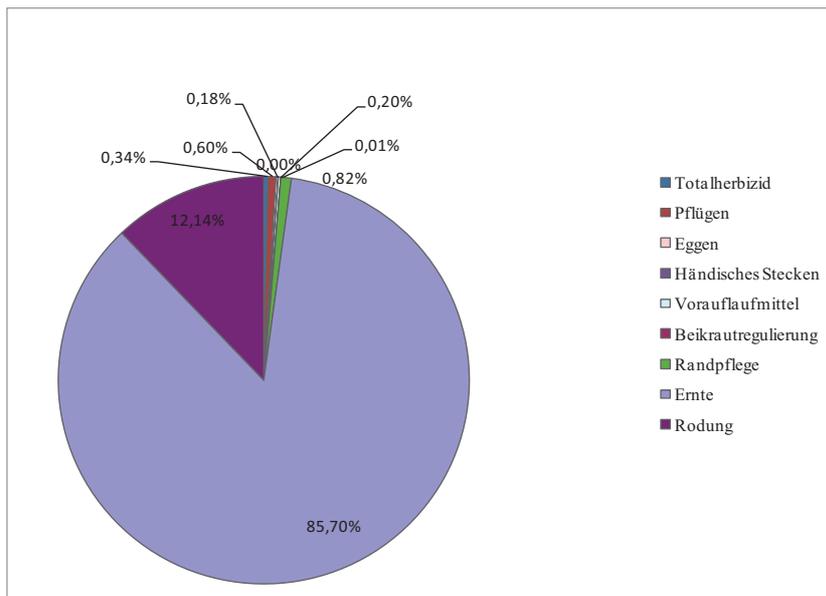


Abbildung 59: Der Energieinput bei Anbau und Ernte von KUP im fünfjährigem Umtrieb, Ernte mit dem Fäller-Bündler, Rücken und Hacken, prozentual differenziert nach den Maßnahmen der Bewirtschaftung

Abbildung 60 zeigt den Energiebedarf bei der Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen im Verhältnis zum Output an Energie, hier der untere Heizwert ( $H_u$ ) von absolut trockenem Holz. Der Vergleich Input-Output macht den extensiven Charakter der Bodennutzungsart KUP deutlich. Die Input-Output-Verhältnisse bewegen sich in einem Rahmen von 1 : 55 bei fünfjährigem Umtrieb und Ernte mit dem Gehölmähhäcksler und 1 : 29 bei der Ernte mit dem Fäller-Bündler und anschließendem Rücken und Hacken, ebenfalls in der fünfjährigen Rotation.

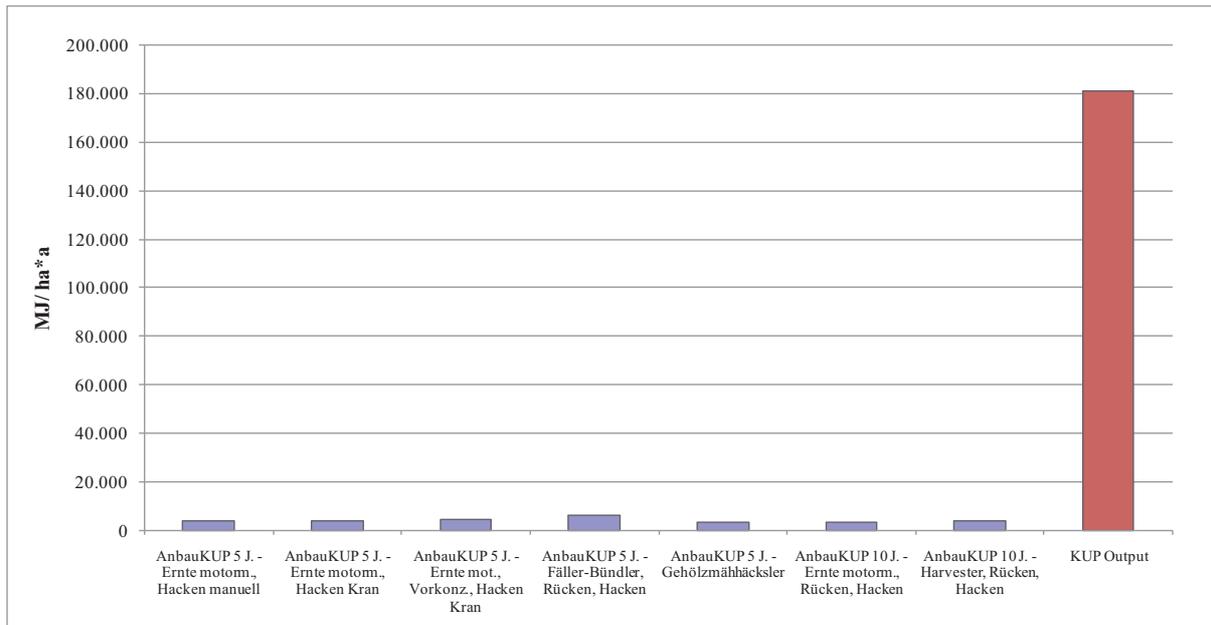


Abbildung 60: Verhältnis Energieinput-Output bei der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien

Abbildung 61 vergleicht die Energieinput-Output-Verhältnisse von KUP mit den von BIEDERMANN et al. (2010) für den Anbau von Winterweizen errechneten Werten. Die Ergebnisse von BIEDERMANN et al. (2010) sind gut mit der hier durchgeführten Ökobilanzierung zu vergleichen, da sie sich ebenfalls auf Hektar und Jahr beziehen und die Vorketten von Maschinen und Kraftstoffen einschließen.

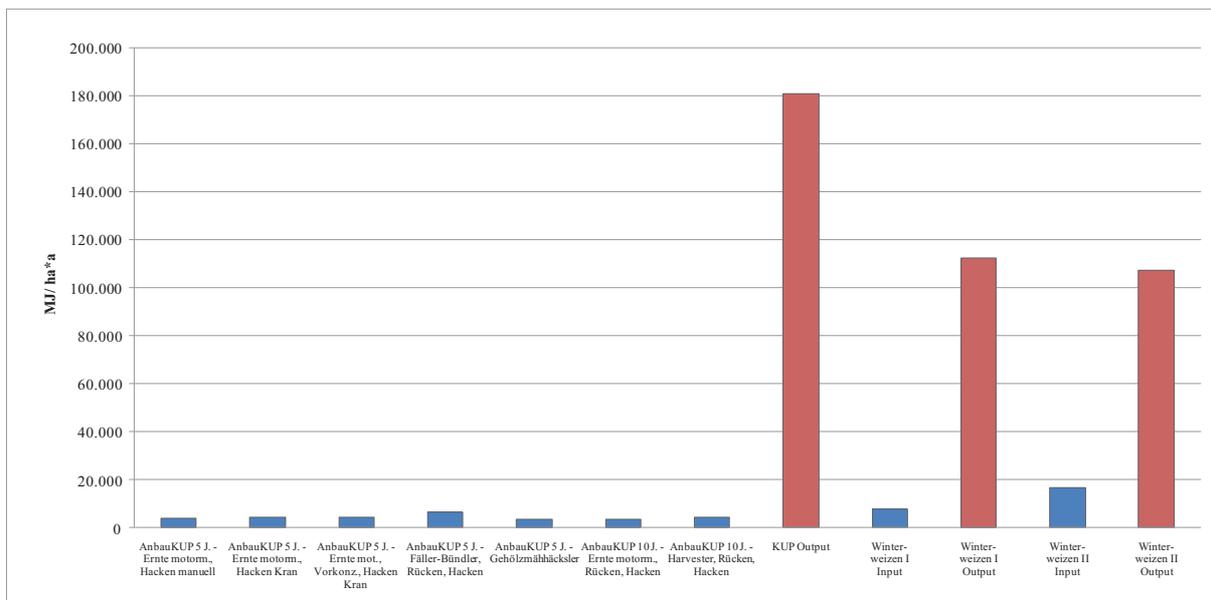


Abbildung 61: Verhältnis Energieinput-Output bei der Bewirtschaftung von KUP im Vergleich zu der Produktion von Winterweizen für die thermische Verwertung (Werte von Winterweizen nach BIEDERMANN et al. 2010)

Der dargestellte Output des Winterweizens resultiert aus den geernteten Körnern. Das Weizenstroh wurde im Rahmen der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft wieder in den Boden eingearbeitet. Winterweizen I und II stellen keine bestimmten Anbauvarianten dar, sondern die Spannweite der Ergebnisse vom besten bis zum schlechtesten Input-Output-Verhältnis. Die Input-Output-Verhältnisse von Winterweizen reichen von 1 : 15 (Winterweizen I) bis 1 : 6,5 (Winterweizen II) und sind damit wesentlich enger als bei KUP.

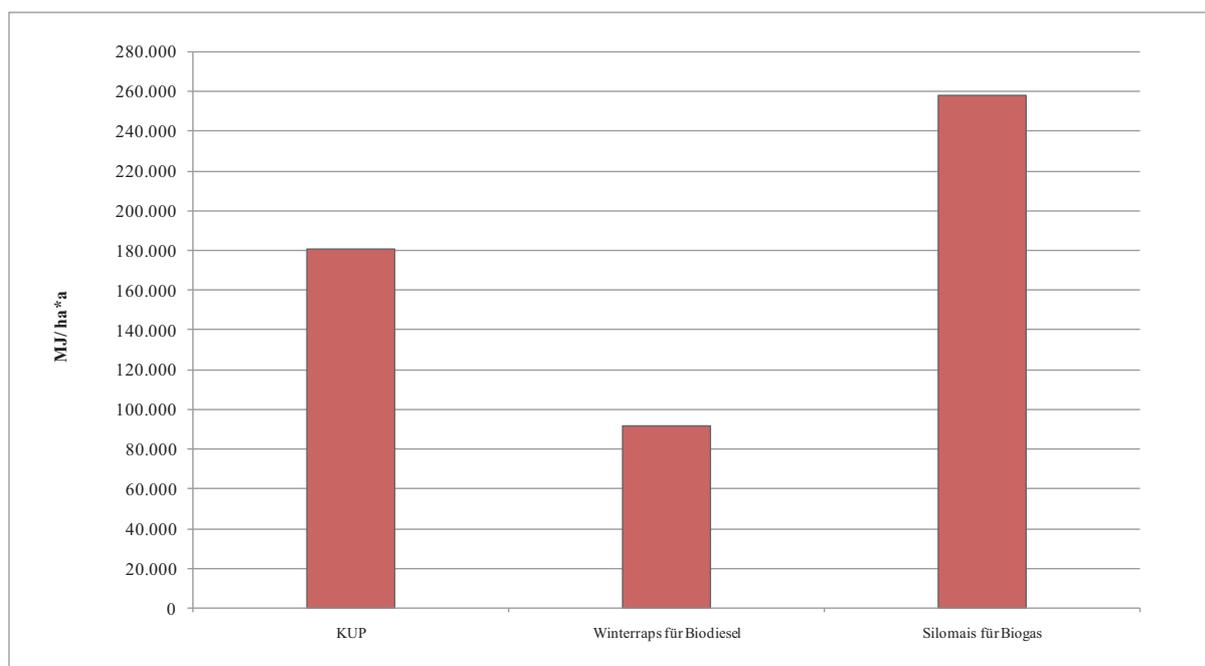


Abbildung 62: Energieoutput beim Anbau von KUP im Vergleich zu den landwirtschaftlichen Energiekulturen Winterraps und Silomais (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK UND DATENVERARBEITUNG 2007, Berechnung nach HARTMANN et al. 2000)

Vergleicht man den Energieoutput von Kurzumtriebplantagen mit dem von landwirtschaftlichen Energiekulturen, so liegen die KUP nur im Mittelfeld. Sie weisen zwar deutlich höhere Energieerträge auf als der Winterraps, liegen aber hinter dem Silomais für die Biogasproduktion zurück (Abbildung 62).

Den Input an Energie in % der erzeugten Energie stellt Tabelle 55 dar. Die Werte bewegen sich zwischen 1,91 und 3,45 %. Vergleicht man die Werte mit denen von RÖDL (2008), so liegen alle hier ermittelten Prozentangaben weit über den dort ermittelten 0,7 Prozent Energieaufwand für die Bewirtschaftung von KUP in der ungedüngten Variante. Erst durch die Gabe von Düngemitteln kommt RÖDL (2008) auf einen Prozentsatz von 1,99 %, was in etwa den prozentualen Energieaufwendungen der beiden energieextensiven Erntelinien 5 und 6 entspricht, für die hier allerdings keine Gaben von Dünger mit eingerechnet wurden.

Tabelle 55: Energieinput bei der **Bewirtschaftung** von KUP im Verhältnis zum Output ( $H_u$  von absolut trockenem Holz)

	1	2	3	4	5	6	7
	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	10-jähriger Umtrieb	10-jähriger Umtrieb
Erntelinie	Motor-manuelles Fällen - Hacken manuell	Motor-manuelles Fällen - Hacken kran-beschickt	Motor-manuelles Fällen - Vorkonz. - Hacken kran-beschickt	Fäller-Bündler - Rücken - Hacken am zentralen Platz	Gehölmäh-häcksler	Fällen - Rücken - Hacken am zentralen Platz	Harvester-fällung - Rücken - Hacken am zentralen Platz
% vom Output ( $H_u$ )	2,09	2,24	2,39	3,45	1,82	1,91	2,28

Tabelle 56 gibt die bei der **Ernte** aufgewendete Energie in absoluten Werten und als Prozentsatz der erzeugten Energie an. Die in den Vorketten (sog. „Graue Energie“ oder „indirekte Energie“) verbrauchte Energie wird getrennt dargestellt. Dadurch wird ein direkter Vergleich mit der Arbeit von ZIMMER (2009) möglich, der den Primärenergieeinsatz bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln in verschiedenen Mechanisierungsvarianten berechnete. Die bei den KUP ermittelte direkt eingesetzte Energie schwankt in einem Bereich zwischen 1,13 und 2,57 % der im Holz enthaltenen Energie ( $H_u$  von absolut trockenem Holz). Dies ist gut mit den Energieeinsätzen der Profi-Ernte-Szenarien von ZIMMER (2009) vergleichbar, die sich in einem Bereich von 1,4 bis 2,5 % des unteren Heizwertes bewegen. Auch bei dem genannten Autor benötigt der Fäller-Bündler unter den Profi-Szenarien den höchsten Energieinput. Wesentlich höher fällt der Energiebedarf bei ZIMMER (2009) allerdings im Kleinprivatwald-Szenario aus, er schwankt in einem Rahmen zwischen 4,2 und 6,5 %. Bezieht man dieses Szenario mit in den Vergleich ein, so ist der Energieinput bei der Gewinnung von Waldhackschnitzeln im Durchschnitt höher als bei der Produktion von Hackschnitzeln aus Kurzumtriebsplantagen. Die kahlschlagartige Ernte der KUP sowie ihre gute räumliche Ordnung durch exakte Pflanzverbände erhöhen die Produktivität der eingesetzten Maschinen und wirken sich positiv auf die Energiebilanz aus.

Die in der **Vorkette** aufgewendete Energie schwankt in absoluten Zahlen zwischen den Erntesystemen stark. Den höchsten Verbrauch an „Grauer Energie“ weist die Erntelinie mit dem Fäller-Bündler im fünfjährigen Umtrieb auf, den geringsten Verbrauch die motormanuelle Ernte mit anschließendem Rücken und Hacken in der zehnjährigen Rotation. Den höchsten prozentualen Anteil der „Grauen Energie“ am Gesamtenergieverbrauch der

Ernte verursacht die Linie 1 mit 16 %, den niedrigsten prozentualen Anteil die Erntelinie 6 mit 11,6 %.

Tabelle 56: Energieinput der **Ernte** von KUP differenziert nach direkt eingesetzter Energie und Vorketten der sieben Erntelinien, angegeben in MJ/ha \* a und in % der erzeugten Energie ( $H_u$ )

	1	2	3	4	5	6	7
	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	10-jähriger Umtrieb	10-jähriger Umtrieb
Ernte- linie	Motor- manuelles Fällen - Hacken manuell	Motor- manuelles Fällen - Hacken kran- beschickt	Motor- manuelles Fällen - Vorkonz. - Hacken kran- beschickt	Fäller- Bündler - Rücken - Hacken am zentralen Platz	Gehölz- mäh- häcksler	Motor- manuelles Fällen - Rücken - Hacken am zentralen Platz	Harvester- fällung - Rücken - Hacken am zentralen Platz
	[MJ/ha*a]	[MJ/ha*a]	[MJ/ha*a]	[MJ/ha*a]	[MJ/ha*a]	[MJ/ha*a]	[MJ/ha*a]
Ernte- verfahren gesamt	2.891	3.164	3.437	5.358	2.406	2.555	3.232
Direkt eingesetzte Energie	2.429	2.758	3.010	4.649	2.042	2.257	2.804
Vorkette	462	406	427	709	364	298	428
	% vom Output ( $H_u$ )	% vom Output ( $H_u$ )	% vom Output ( $H_u$ )	% vom Output ( $H_u$ )	% vom Output ( $H_u$ )	% vom Output ( $H_u$ )	% vom Output ( $H_u$ )
Ernte- verfahren gesamt	1,60	1,75	1,90	2,96	1,33	1,41	1,79
Direkt eingesetzte Energie	1,34	1,52	1,66	2,57	1,13	1,25	1,55
Vorkette	0,26	0,23	0,24	0,39	0,20	0,16	0,24

Tabelle 57 differenziert die eingesetzte Energie nach den Teilarbeiten bei der Ernte. Deutlich zu sehen ist, dass der größte Energieinput bei der Teilarbeit Hacken benötigt wird. Die Inputs beim Hacken der Erntelinien 1 bis 4 in der fünfjährigen Rotation liegen in einem Rahmen von 1,49 bis 1,87 % der im Holz gespeicherten Energie ( $H_u$ ) und damit recht nah zusammen. Deutlich besser fällt die Energiebilanz beim zehnjährigen Umtrieb aus, für das Hacken wird hier nur 0,92 % des unteren Heizwertes der erzeugten Hackschnitzel benötigt. Beim Fällen und Hacken durch den vollautomatischen Gehölzmähhäcksler wird weniger Energie benötigt als bei allen anderen Hackvorgängen im fünfjährigen Umtrieb. Auffällig ist auch die Überlegenheit der motormanuellen Fällung gegenüber der Fällung mit Fäller-Bündler und Harvester-Aggregat. Das motormanuelle Zu-Fall-Bringen benötigt ca. 0,11 %, im

zehnjährigen Umtrieb sogar nur 0,04 % der im absolut trockenen Holz gespeicherten Energie. Deutlich schlechter mit 0,79 % schneidet der Fäller-Bündler in der fünfjährigen Rotation ab, aber auch der Harvester im zehnjährigen Umtrieb mit 0,42 %.

Tabelle 57: Energieinput der Ernte von KUP differenziert nach den Teilarbeiten der sieben Erntelinien in MJ/ha \* a und in % der erzeugten Energie ( $H_u$ )

Erntelinie	1	2	3	4	5	6	7
	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	5-jähriger Umtrieb	10-jähriger Umtrieb	10-jähriger Umtrieb
	Motor-manuelles Fällen - Hacken manuell	Motor-manuelles Fällen - Hacken kranbeschickt	Motor-manuelles Fällen - Vorkonz. - Hacken kranbeschickt	Fäller-Bündler - Rücken - Hacken am zentralen Platz	Gehölmäh-häcksler	Fällen - Rücken - Hacken am zentralen Platz	Harvesterfällung - Rücken - Hacken am zentralen Platz
	[MJ/ha*a]	[MJ/ha*a]	[MJ/ha*a]	[MJ/ha*a]	[MJ/ha*a]	[MJ/ha*a]	[MJ/ha*a]
<b>Fällen</b>	202	202	189	1.437	-	77	754
<b>Vorkonzentrieren/Rücken</b>	-	-	458	541	-	807	807
<b>Hacken</b>	2.689	2.962	2.790	3.380	2.406	1.671	1.671
	% vom Output ( $H_u$ )	% vom Output ( $H_u$ )	% vom Output ( $H_u$ )	% vom Output ( $H_u$ )	% vom Output ( $H_u$ )	% vom Output ( $H_u$ )	% vom Output ( $H_u$ )
<b>Fällen</b>	0,11	0,11	0,10	0,79	-	0,04	0,42
<b>Vorkonzentrieren/Rücken</b>	-	-	0,25	0,30	-	0,45	0,45
<b>Hacken</b>	1,49	1,64	1,54	1,87	1,33	0,92	0,92

### 6.5.1.2 Energiebilanz bei variiertem Zuwachs

Die in Kapitel 6.5.1.1 dargestellten Ergebnisse weisen die Kurzumtriebsplantagen zwar als extensive Bodennutzungsform aus, mit der Biomasseproduktion insbesondere von Silomais für Biogasanlagen können sie allerdings nicht konkurrieren. Verschiedene Autoren (z. B. BONNEMANN 1978, BOHNENS 1992, FRIEDRICH und HOFMANN 1994) gehen bei den KUP von viel höheren Erträgen aus als die hier unterstellten zehn Tonnen. Deshalb soll hier in einer Art Sensitivitätsanalyse zusätzlich eine Energiebilanz für Zuwächse von 12,5 und 15 Tonnen  $atro/ha*a$  modelliert werden. Dies scheint auch unter dem Gesichtspunkt sinnvoll, als die züchterische Behandlung von Balsampappeln in Deutschland in den letzten Dekaden vernachlässigt wurde (MEYER et al. 2006) und von dieser Seite wesentliche Steigerungen in der Wuchsleistung möglich wären.

Ausgehend vom Balsampappelbestand der Versuchsfläche Dornwang II, deren erster Umtrieb mit dem Fäller-Bündler-Aggregat TJ 720 beerntet wurde, erfolgt die Modellierung einer Balsampappel-KUP mit einem Zuwachs von 12,5 und 15 t atro/ha\*a nach der Biomassefunktion, die RÖHLE et al. (2006) für den Klon Max 1 errechneten. Mit den Daten dieser modellierten Bestände wurden nach dem von EBERHARDINGER et al. (2009) erstellten Fäller-Bündler-Zeitbedarfsmodell die höheren Maschinenlaufzeiten des Fäller-Bündlers kalkuliert.

CREMER (2008) stellt für stark vorkonzentriertes Energieholz ein Produktivitätsmodell auf, das die Abhängigkeit der Produktivität von Forwardern beim Rücken vom BHD des ausscheidenden Bestandes darstellt. Die Vergleichbarkeit zu einer Pappel-KUP wird aber durch die Tatsache erschwert, dass es sich bei dem vorgenannten Autor um Kronenmaterial und nur zu geringem Teil um Vollbäume handelt. Außerdem enthält die von CREMER (2008) aufgestellte Formel Elemente, wie z. B. den anteiligen Energieholzanfall je Hektar, die ihre Anwendbarkeit auf die kahlschlagartige Ernte einer Kurzumtriebsplantage ausschließen. Für die Teilarbeit Rücken wird deshalb vereinfacht die dem erhöhten Zuwachs prozentual entsprechende Maschinenlaufzeit angenommen.

Für die Teilarbeit Hacken wurden die Produktivitätsmodelle von STAMPFER et al. (1997) und FELLER und RIEDLBERGER (2001) verglichen. Beide liefern ähnliche Werte. Für die Modellierung der variierten Energiebilanz wurde die Formel von STAMPFER et al. (1997) heran gezogen.

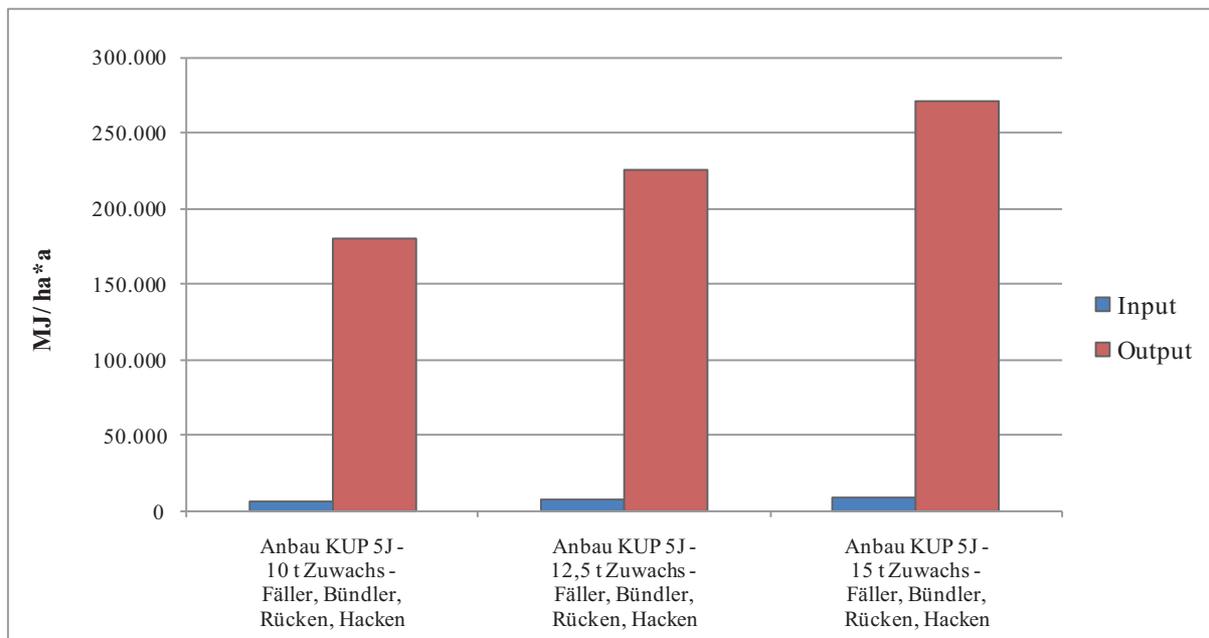


Abbildung 63: Verhältnis Energieinput-Output bei der Bewirtschaftung von KUP und Ernte mit dem Fäller-Bündler differenziert nach unterschiedlichen Zuwachsleistungen

In Abbildung 63 sind die Ergebnisse dieser Modellierung dargestellt. Der Energieoutput steigt proportional zum Zuwachs auf bis zu 270 000 MJ pro Hektar und Jahr und erreicht Werte, die dem Output von Silomais nach den Ertragsdaten des BAYERISCHEN LANDESAMTS FÜR STATISTIK UND DATENVERARBEITUNG (2007) ungefähr entsprechen. Der Energieinput nimmt mit dem Mehrzuwachs nur leicht unterproportional zu. Das Input-Output-Verhältnis steigt demnach leicht von 1 : 29 bei zehn Tonnen atro Zuwachs pro Jahr und Hektar auf 1 : 31 bei 15 Tonnen.

### 6.5.1.3 Lachgasemissionen

Lachgas ( $N_2O$ , Distickstoffmonoxid) ist mit einem  $CO_2$ -Äquivalent von 300 ein enorm klimarelevantes Gas. Nach MOSIER et al. (1983) zitiert in HUBER (2005) sind fünf Entstehungsprozesse mögliche Quellen der  $N_2O$ -Bildung: Nitrifikation und Denitrifikation, sowie in geringerem Umfang Chemodenitrifikation, dissimilatorische Reduktion von Ammonium zu Nitrat und assimilatorische Nitratreduktion. Nitrifikation und Denitrifikation stellen nach MOSIER et al. (1983) die Haupt-Emissionsquellen dar. Die höchsten Nitrifikationsraten werden bei moderaten Wassergehalten gemessen, bei der Denitrifikation wird insbesondere bei Sauerstoffmangel ein Teil des durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung ausgebrachten Stickstoffs zu Lachgas umgewandelt (HUBER, 2005). SCHOLZ und HELLEBRAND (2004) stellen fest, dass die akkumulierten Lachgasemissionen auf konventionell gedüngten Roggenflächen die auf ungedüngten Pappel-Versuchsflächen um 250 mg/ha\*a überschritten. Dies entspricht circa 30 % der anrechenbaren Gesamtemission klimawirksamer Gase bei der Erzeugung und Nutzung von pflanzlichen Festbrennstoffen. Der Aspekt der Lachgasemission darf also bei einer Ökobilanz nicht vernachlässigt werden. Nach HELLEBRAND (2008) können allerdings die Lachgasemissionen des o. g. Versuchs nicht verallgemeinert werden, da die brandenburgischen Böden relativ  $N_2O$ -emissionsarm sind.

Für die Einschätzung der  $N_2O$ -Ausgasung aus KUP wurden daher die IPCC-Default-Faktoren von DE KLEIN et al. (2006) verwendet (Chapter 11 „ $N_2O$  Emissions from managed soils, and  $CO_2$  Emissions from lime and urea application“). Nach HUBER (2005) ist der IPCC- Ansatz der einfachste unter den mathematischen Modellen zur Quantifizierung der  $N_2O$ - Emissionen und berücksichtigt die klimatische Variation innerhalb eines Jahres nicht. Die vorliegende Ökobilanzierung bezieht sich allerdings nicht auf einen konkreten Betrieb oder ein bestimmtes Jahr, so dass die von HUBER (2005) genannten Modelle oder Regionalisierungen von  $N_2O$ -Emissionen ausscheiden, zumal auch die Schwächen dieser Modelle insbesondere bei der Vorhersage von  $N_2O$ -Emissionen als problematisch angesehen werden müssen. DE KLEIN et al. beziehen folgende Stickstoff-Quellen in die Abschätzung der Lachgasemissionen aus bewirtschafteten Böden ein:

1. Die Gabe von synthetischem Dünger.

2. Die Ausbringung von organischem Dünger (Wirtschaftsdünger) und den Dung von Weidevieh.
3. Stickstoff in ober- und unterirdisch auf der Fläche belassenen Pflanzenrückständen.
4. Stickstoffmineralisation durch Humusschwund insbesondere bei Wechsel der Bodennutzungsart.
5. Stickstoffmineralisation durch Drainage bzw. Bewirtschaftung von organischen Böden.

Das IPCC-Modell unterscheidet zwischen direkten und indirekten N<sub>2</sub>O-Emissionen. Als direkte Emissionen werden die unmittelbaren Emissionen aus dem Boden bezeichnet, die indirekten Emissionen entstehen durch Auswaschung oder Verlagerung an anderer Stelle.

Für landwirtschaftliche Energiekulturen müssen die Faktoren 1. bis 3. in die Berechnung der direkten N<sub>2</sub>O-Emissionen einbezogen werden. Faktor Nr. 4 kann gleich Null gesetzt werden, da bei Anwendung von guter fachlicher Praxis in der Landwirtschaft kein Humusschwund angenommen wird. Emissionsquelle Nr. 5 fällt ebenfalls weg, da sie Histosole betrifft, hier aber durchschnittliche bayerische Ackerstandorte dargestellt werden sollen.

Da bei Kurzumtriebsplantagen, wie in Kapitel 6.4.4 erläutert, eine Düngung nicht notwendig ist, fallen hier auch die Punkte 1. und 2. weg. Bei KUP spielt lediglich Nr. 3. eine Rolle. Die Faktoren, die hier einfließen sind die Menge des Laubfalles, die Zersetzungsgeschwindigkeit des Laubes sowie sein Stickstoffgehalt.

STETTER und MAKESCHIN (1999) untersuchten in einem Streuversuch den Laubfall des Balsampappelklons Muhle-Larsen und eines Weidenklons. Im Dezember des betreffenden Jahres wurde unter der Balsampappel eine Streumenge in Höhe von 2,25 Tonnen Trockensubstanz pro Hektar ermittelt. Der Stickstoffgehalt der Blätter betrug 1,77 %. Von dem Pappellaub waren bis Juni des nächsten Jahres nur noch geringe Mengen vorhanden (0,2 Tonnen Trockensubstanz), die bis Januar des darauf folgenden Jahres komplett abgebaut wurden. Nach dem statisch-empirischen Modell von DE KLEIN et al. (2006) ergeben sich damit direkte Lachgasemissionen von 0,63 kg/ha\*a und indirekte Lachgasemissionen von 0,14 kg/ha\*a. Vergleicht man diese Werte mit den von HUBER (2005) mit dem dynamisch-mechanistischen DNDC-Modell anhand eines konkreten Standorts simulierten Lachgasemissionen, so liegen die Mittelwerte der Simulationen in den Jahren 1991 bis 1999 zwischen 1,03 kg/ha\*a und 2,44 kg/ha\*a, also wesentlich höher als die für KUP berechneten Werte. Ein Vergleich von Ergebnissen unterschiedlicher Modellen ist sicherlich schwierig, doch zeigen sie zumindest in der Tendenz die Extensivität von KUP bezüglich der N<sub>2</sub>O-Emissionen.

## 6.5.2 Wirkungsbilanz des Anbaus von Kurzumtriebsplantagen

Zur Darstellung der Umweltwirkungen in den verschiedenen Wirkungskategorien wurden die Charakterisierungsmodelle des CENTRUM VOOR MILIEUKUNDE LEIDEN 2001 - 2007 verwendet (CML 2001 - 2007).

### 6.5.2.1 Klimaänderung

Die Wirkungskategorie Klimaänderung ist definiert als der Einfluss menschlich bedingter Emissionen auf die Strahlungsabsorption in der Atmosphäre. Dies führt zu einer verminderten langwelligen Abstrahlung in das Weltall und damit zu einer Aufheizung des Weltklimas. Der zugeordnete Wirkungsindikator ist die Verstärkung der Infrarotstrahlung. Den verschiedenen Treibhausgasen werden in den Charakterisierungsmodellen (z. B. IPCC, CML) unterschiedliche Klimawirksamkeiten zugeordnet, definiert nicht in absoluten Zahlen, sondern relativ zum Kohlendioxid (Charakterisierungsfaktor) und im Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP 100) zusammengefasst. Beispielsweise verfügt das in Kapitel 6.5.1.3 dargestellte Lachgas über eine Klimawirksamkeit des ca. 300-fachen von Kohlendioxid. Das GWP 100 wird in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (Indikatorergebnis) angegeben.

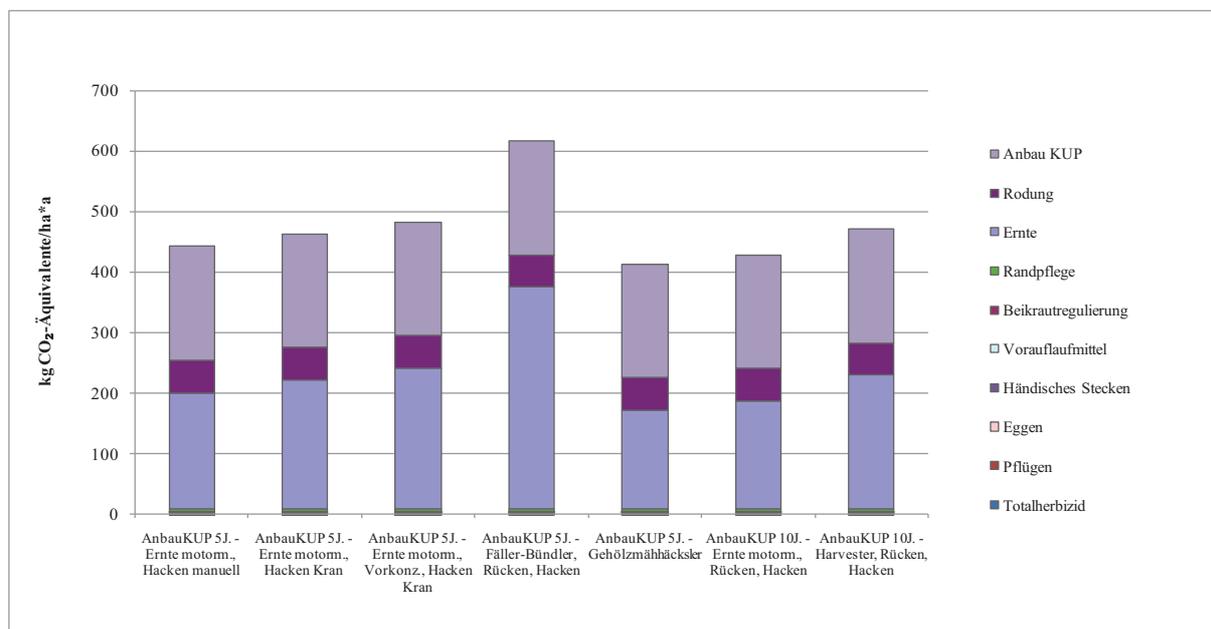


Abbildung 64: Treibhauspotenzial (GWP 100) bei der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien

Anbau und Ernte von Kurzumtriebsplantagen sind nicht komplett CO<sub>2</sub>-neutral. Bei der Bewirtschaftung werden fossile Energieträger verbraucht, was die Emission klimarelevanter Gase zur Folge hat. Abbildung 64 zeigt den Output an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, der bei der Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen entsteht. Insgesamt schwankt der Output

zwischen 410 und 620 kg CO<sub>2</sub> pro Jahr und Hektar. Auffällig hoch ist der Anteil des Anbaus von KUP. Dies ist auf die hohe Klimawirksamkeit der Lachgasemissionen zurückzuführen, die nach dem IPCC-Schema von DE KLEIN et al. (2006) berechnet wurden. Auch Ernte und Rodung nehmen, proportional zum Energieeinsatz, einen großen Anteil an den Gesamtemissionen von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten ein. Am günstigsten schneidet die Erntelinie mit dem vollautomatischen Gehölmähhäcksler ab, am schlechtesten der Fäller-Bündler mit anschließendem Rücken und Hacken. Alle anderen Bewirtschaftungsmaßnahmen fallen mit ihrem Beitrag zum Treibhauspotenzial kaum ins Gewicht.

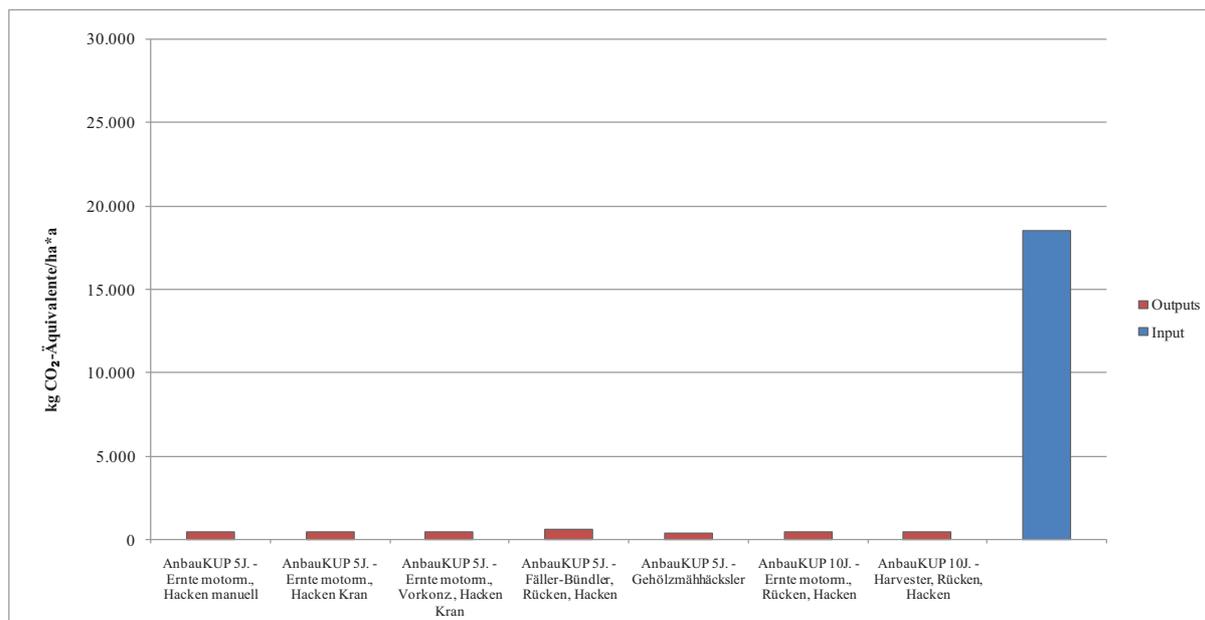


Abbildung 65: Treibhauspotenzial von KUP: CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen bei der Bewirtschaftung von KUP (Output) im Vergleich zur im Holz gespeicherten Masse an CO<sub>2</sub> (Input)

Der Output an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten bei der Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen ist im Vergleich zu der im Holz gespeicherten Menge an CO<sub>2</sub> ziemlich gering (Abbildung 65). Einem Input von 18500 kg CO<sub>2</sub> stehen Outputs von 410 kg bis zu 620 kg gegenüber. Die Input-Output-Verhältnisse liegen zwischen 45:1 und 30:1.

Abbildung 66 stellt die Klimawirksamkeit von Kurzumtriebsplantagen der des Anbaus der landwirtschaftlichen Energiekulturen Winterraps, Zuckerrübe und Silomais gegenüber. Die landwirtschaftlichen Daten stammen von BYSTRICKY (2009), sie beziehen sich auf das Erzeugungsgebiet Regensburg-Straubinger-Gäu und wurden unter den gleichen ökobilanziellen Voraussetzungen ermittelt wie die Werte für die Kurzumtriebsplantagen. Hier wird ebenfalls der extensive Charakter des KUP-Anbaus deutlich. Die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen beim Anbau der Feldfrüchte übersteigen die der Kurzumtriebsplantagen um ein Vielfaches. Am schlechtesten schneidet der Anbau von Zuckerrüben ab, mit einem Output von ca. 10.000 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Jahr und Hektar.

## Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen

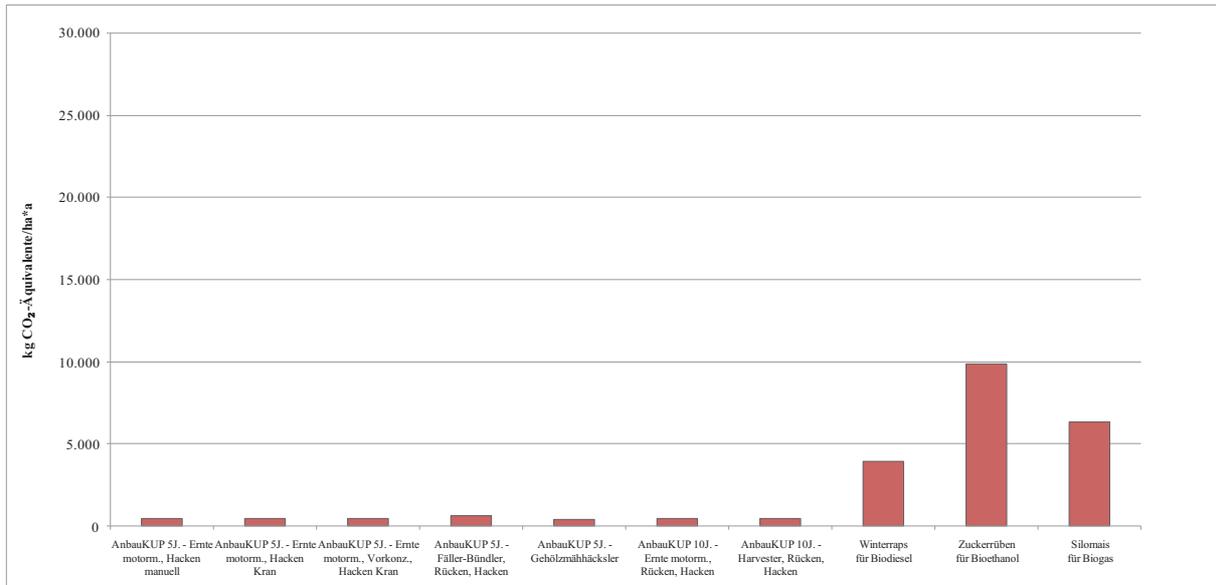


Abbildung 66: Treibhauspotenzial von KUP im Vergleich zu Winterraps, Zuckerrübe und Silomais: CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen beim Anbau (Daten für die landwirtschaftlichen Kulturen nach BYSTRICKY 2009)

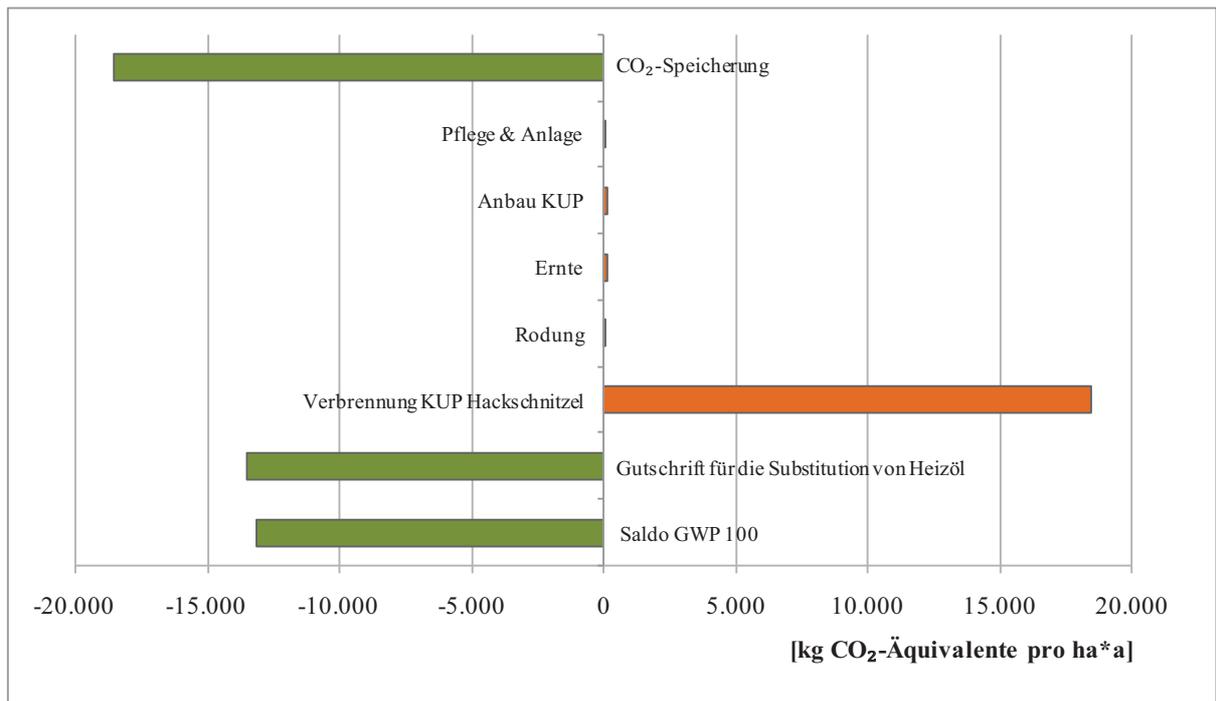


Abbildung 67: CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Bilanz des Anbaus von Kurzumtriebsplantagen am Beispiel der Ernte mit dem Gehölzmähmäcksler (Darstellung in Anhalt an ZIMMER 2010)

In Abbildung 67 ist die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Bilanz der Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen dargestellt, Referenzsystem ist die Verbrennung von Heizöl. Der oberste grüne Balken repräsentiert die im Holz gespeicherte Menge an CO<sub>2</sub>. Diese Menge

wird durch die Verbrennung der KUP-Hackschnitzel wieder frei (oranger Balken). Die kleinen Balken mit der Bezeichnung „Pflege und Anbau“, „Anbau KUP“, „Ernte“ und „Rodung“ stellen die Höhe der CO<sub>2</sub>-Äquivalente dar, die durch diese Bewirtschaftungsmaßnahmen emittiert werden. Ein Grundprinzip von Ökobilanzen ist, dass der in einem Prozess entstehende Nutzen durch Systemraumerweiterung ausgeglichen wird (GÄRTNER et al. 2008). Wird durch die Verbrennung der Hackschnitzel Heizöl ersetzt, so erfolgt eine Gutschrift für die entsprechende Menge Heizöl. Der grüne Balken „Gutschrift für die Substitution von Heizöl“ repräsentiert die Höhe der Emissionen, die durch die Substitution von Heizöl eingespart wurden. Die Berechnung erfolgte mit einem Emissionsfaktor von 2,7 nach der Übersicht in SCHÄCHTELE und HERTLE (2007). Die zu Herstellung und Transport des Heizöls notwendige indirekte Energie (Graue Energie) wurde nicht berücksichtigt, da die Umweltwirkungen der KUP-Hackschnitzel nur bis zur Feldgrenze bilanziert wurden und hier ebenfalls ein Transport zum Heiz(kraft-)werk nicht enthalten ist. Von der Höhe der Gutschrift wurden die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen abgezogen, die durch Anlage, Pflege, Ernte und Rodung entstanden sind. Der resultierende untere grüne Balken entspricht der Netto-CO<sub>2</sub>-Äquivalentersparnis.

### 6.5.2.2 Eutrophierung

Die Wirkungskategorie Eutrophierung umfasst alle Auswirkungen von hohen Konzentrationen von Makronährelementen (v. a. Stickstoff und Phosphor). Eutrophierung kann zu unerwünschten Veränderungen in der Artenzusammensetzung von Ökosystemen oder zu einer höheren Biomasseproduktion führen. Außerdem führen hohe Nährstoffkonzentrationen zu einer qualitativen Beeinträchtigung von Oberflächengewässern und des Grundwassers, vor allem im Hinblick auf die Eignung als Trinkwasser (GUINEE 2002). Das Eutrophierungspotenzial (Eutrophication Potential, EP) beinhaltet alle Emissionen in Luft, Wasser und Erdboden. Gemessen wird es in kg PO<sub>4</sub>-Äquivalenten.

Bei der Eutrophierung zeigt sich ein ähnliches Bild in der Reihenfolge der sieben Erntelinien wie bei Energiebilanz und Klimaänderung. Das Verfahren mit dem geringsten Eutrophierungspotenzial ist der fünfjährige Umtrieb mit Ernte durch den Gehölmähmäcker, am schlechtesten schneidet die Fäller-Bündler-Linie im fünfjährigen Umtrieb ab. Die anderen Erntelinien zeigen keine großen Unterschiede. Die Eutrophierung, die durch den Anbau von KUP hervorgerufen wird, ist in den Lachgasemissionen begründet. Am stärksten wirken sich die Erntemaßnahmen aus. Auch der Anteil der Rodung ist in Abbildung 68 noch erkennbar. Alle anderen Bewirtschaftungsmaßnahmen fallen nicht ins Gewicht. Insgesamt kann der Eutrophierungseffekt durch die Bewirtschaftung von KUP allerdings vernachlässigt werden, was der Vergleich mit den landwirtschaftlichen Energiekulturen in Abbildung 69 verdeutlicht.

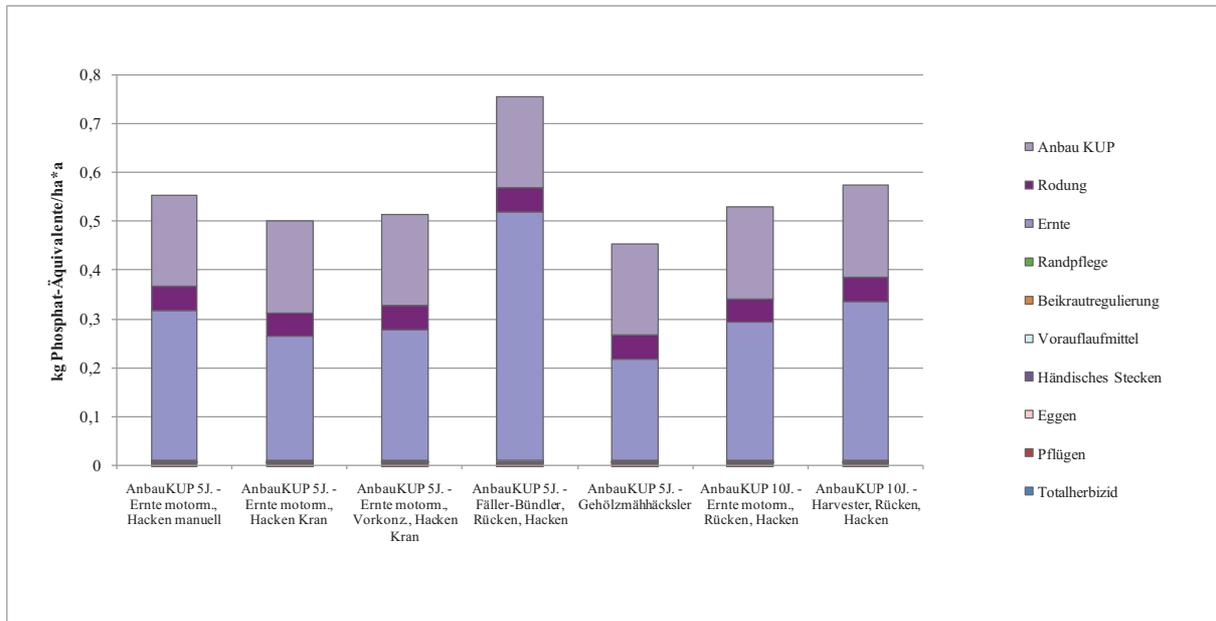


Abbildung 68: Eutrophierungspotenzial der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien: Phosphat-Äquivalent-Emissionen

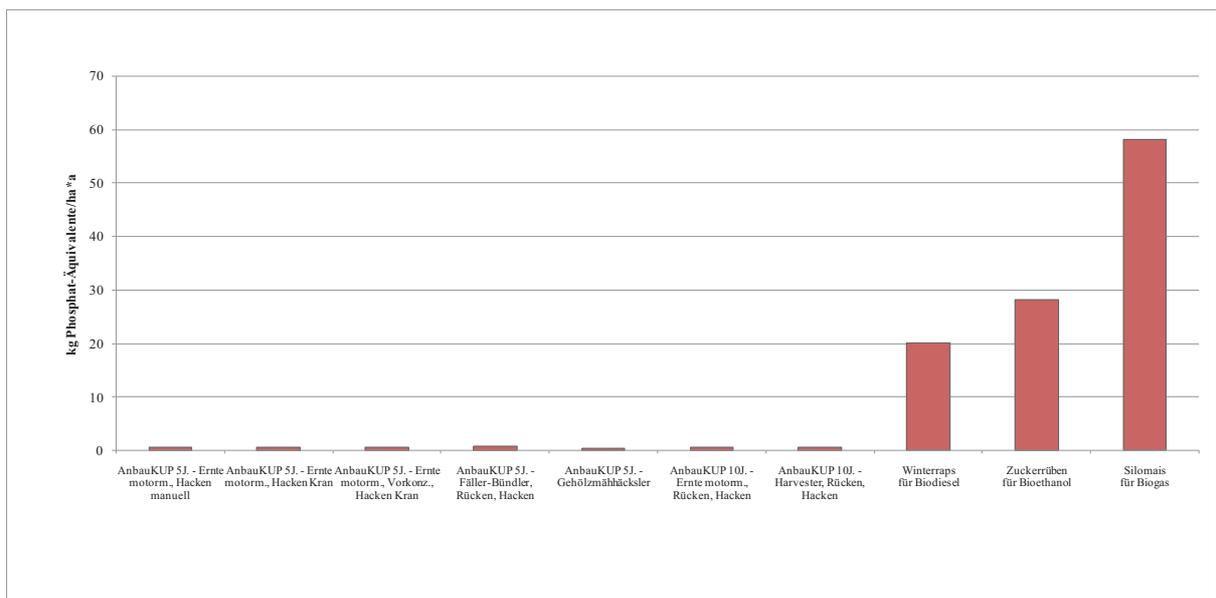


Abbildung 69: Eutrophierungspotenzial von KUP im Vergleich zu Winter rapss, Zuckerrübe und Silomais (Daten für landwirtschaftliche Kulturen nach BYSTRICKY 2009)

Das Eutrophierungspotenzial der Landwirtschaft ist vor allem durch die Düngergaben um ein Vielfaches höher als das von KUP. Während der Anbau von Kurzumtriebsplantagen in der ungünstigsten Erntevariante ein Eutrophierungspotenzial von knapp 0,8 kg Phosphatäquivalenten verursacht, kommt die günstigste landwirtschaftliche Kultur, der Winter rapss auf ca. 20 kg, die Kultur mit dem höchsten Eutrophierungspotenzial, der Anbau von Silomais, auf fast 60 kg PO<sub>4</sub>-Äquivalente.

### 6.5.2.3 Abiotischer Ressourcenverbrauch

Abiotische Ressourcen sind natürliche Ressourcen, eingeschlossen Energieressourcen. Der Verbrauch von abiotischen Ressourcen (Depletion of abiotic resources) ist eine der am meisten diskutierten Wirkungskategorien (GUINEE, 2002). Dementsprechend groß ist die Vielfalt der methodischen Ansätze. Für die vorliegende Arbeit wurde das Charakterisierungsmodell von CML (CML 2001 - Dez. 2007, Abiotischer Ressourcenverbrauch (Abiotic Depletion Potential (ADP)) gewählt. Das ADP wird in kg Antimon-Äquivalenten (Sb-Äquivalente) angegeben.

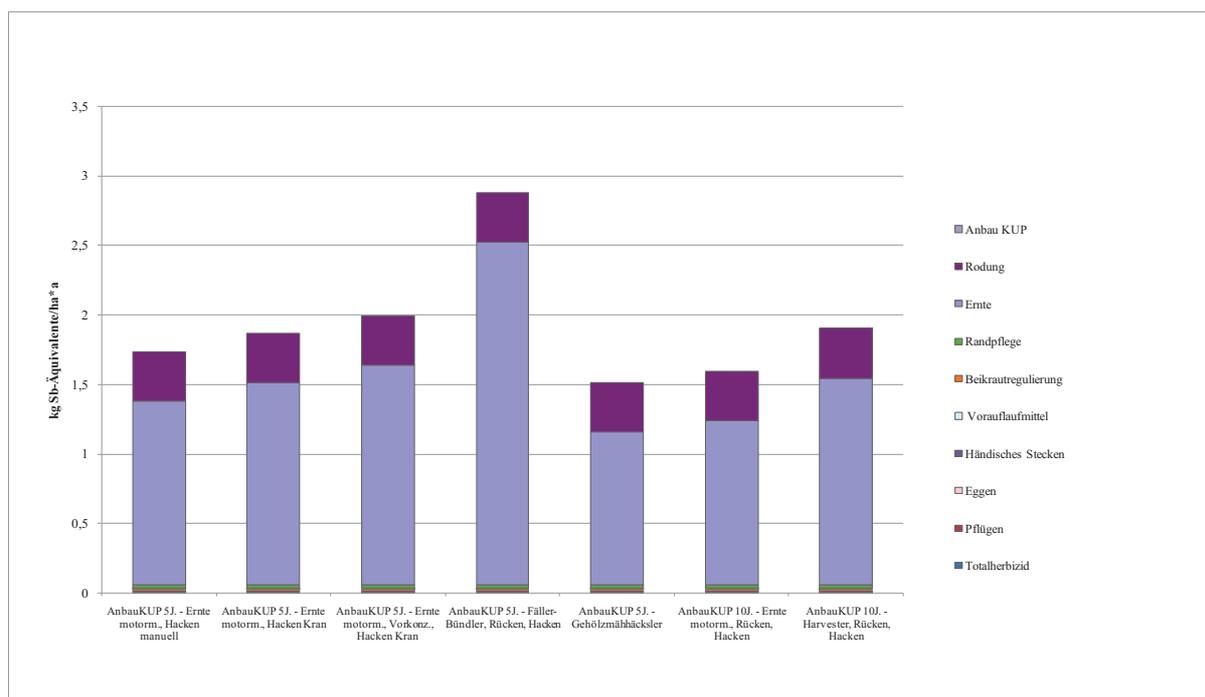


Abbildung 70: Abiotischer Ressourcenverbrauch der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien: Antimon-Äquivalent-Emissionen

Der Verbrauch an abiotischen Ressourcen bei der Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen erfolgt, wie nicht anders zu erwarten, hauptsächlich bei Ernte und Rodung. Alle anderen Bewirtschaftungsmaßnahmen fallen kaum ins Gewicht. Wie bei den vorangegangenen Wirkungskategorien ist auch hier der fünfjährige Umtrieb mit Ernte durch den Gehölmähähäcksler die beste Variante, gefolgt vom motormanuellen Fällen, Rücken und Hacken am zentralen Platz in der zehnjährigen Rotation. Den höchsten Verbrauch an abiotischen Ressourcen verursacht der Fäller-Bündler mit anschließendem Rücken und Hacken im fünfjährigen Umtrieb.

### 6.5.2.4 Humantoxizität

Diese Wirkungskategorie fasst den Einfluss aller toxischen Substanzen in der Umwelt auf die menschliche Gesundheit zusammen. Das Humantoxizitätspotenzial (Human Toxicity Potential, HTP) wird in kg Dichlorbenzol (DCB)-Äquivalenten gemessen.

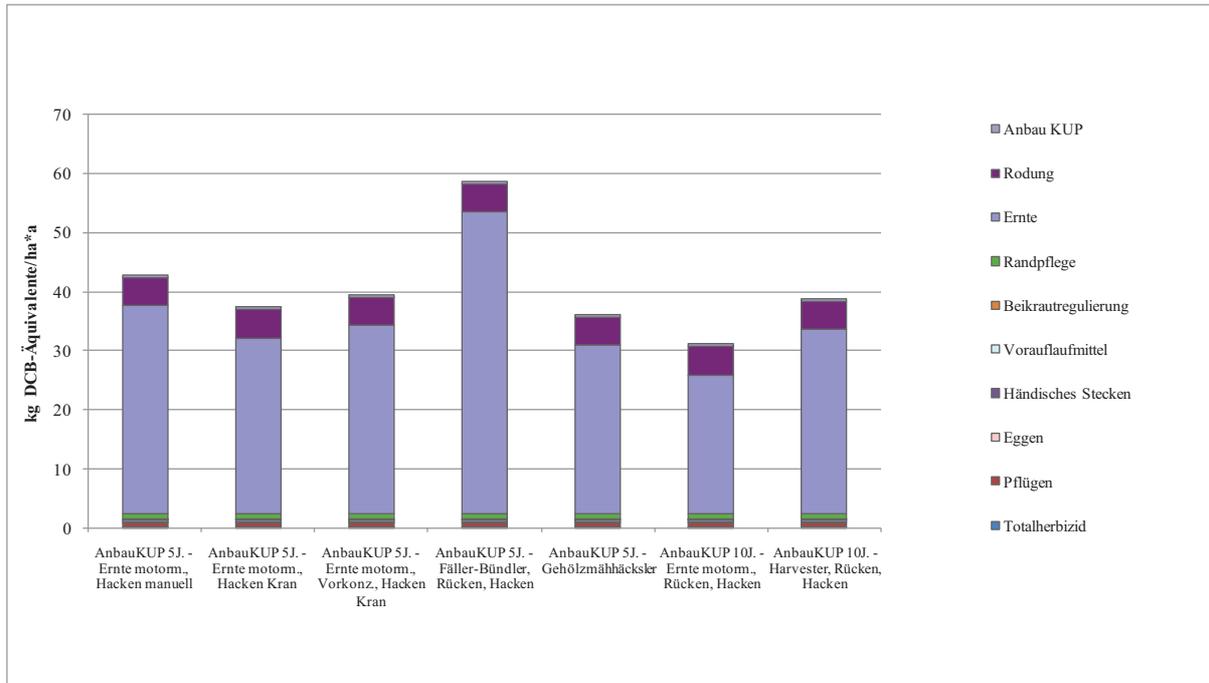


Abbildung 71: Humantoxizitätspotenzial der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien: DCB-Äquivalent-Emissionen

Bei der Wirkungskategorie Humantoxizität verschiebt sich die Rangfolge beim Vergleich der sieben Erntelinien etwas. Den größten Anteil am gesamten Humantoxizitätspotenzial nehmen Ernte und Rodung ein. Das niedrig mechanisierte Verfahren im zehnjährigen Umtrieb hat den geringsten Output an DCB-Äquivalenten, der Fäller-Bündler in der fünfjährigen Rotation den höchsten.

### 6.5.2.5 Ozonabbau

Ozonabbau heißt die Ausdünnung der stratosphärischen Ozonschicht in Folge von anthropogenen Emissionen. Dies führt zu einer stärkeren ultravioletten Strahlung, die für viele Organismen schädlich ist. Das Ozonabbaupotenzial (Ozone Depletion Potential, ODP) definiert die Fähigkeit verschiedener Gase, Ozon abzubauen. Das ODP wird in kg R11-Äquivalenten angegeben.

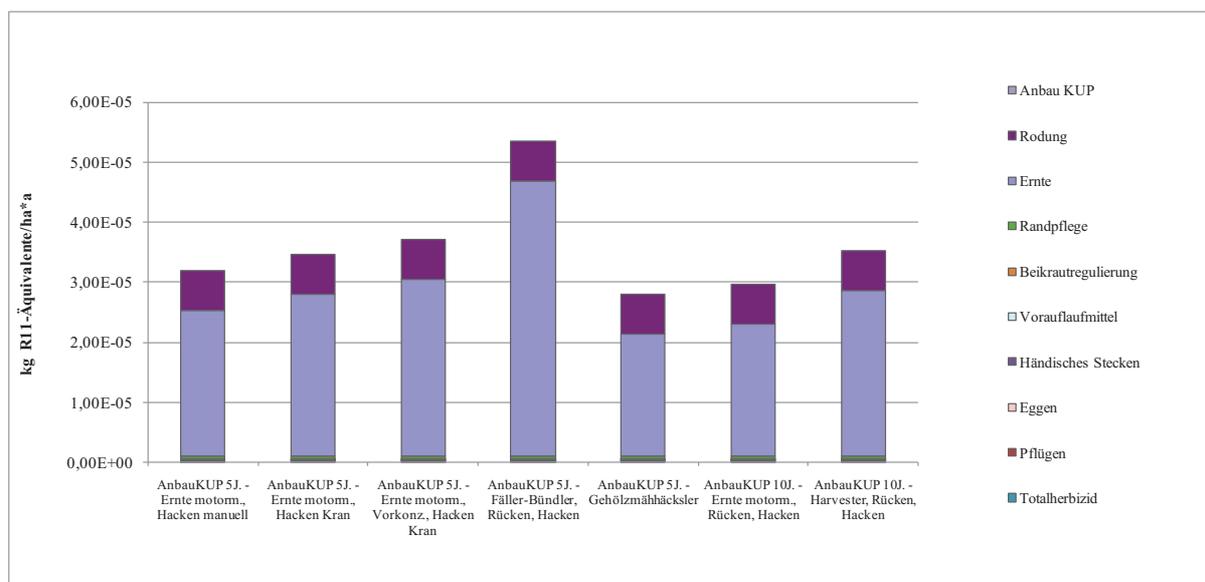


Abbildung 72: Ozonabbaupotenzial der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien: R11-Äquivalent-Emissionen

Bei der Wirkungskategorie Ozonabbau fallen wieder Ernte und Rodung der Kurzumtriebsplantagen ins Gewicht. Alle anderen Bewirtschaftungsmaßnahmen haben keinen nennenswerten Anteil am Ozonabbaupotenzial. Die günstigsten Erntelinien sind der Gehölzmähhäcksler in der fünfjährigen Rotation gefolgt von der motormanuellen Variante mit Rücken und Hacken im zehnjährigen Umtrieb.

### 6.5.2.6 Terrestrische Ökotoxizität

Die Wirkungskategorie bezieht sich auf den Einfluss toxischer Substanzen auf terrestrische Ökosysteme. Das Terrestrische Ökotoxizitätspotenzial (Terrestrial Ecotoxicity Potential, TETP) wird wie das Humantoxizitätspotenzial in kg Dichlorbenzol (DCB)-Äquivalenten angegeben.

Bei der Wirkungskategorie Terrestrische Ökotoxizität zeigt sich bei der Reihenfolge der sieben Erntelinien ein ganz anderes Bild. Hier fallen vor allem die hochmechanisierten Verfahren positiv auf. Harvester, Gehölzmähhäcksler und Fäller-Bündler weisen das geringste terrestrische Ökotoxizitätspotenzial auf (Abbildung 73). Alle Verfahren mit dem Einsatz von zweitaktgetriebenen Motorsägen schneiden aufgrund ihrer hohen Emissionen von Kohlenmonoxid und Stickoxiden hier sehr schlecht ab.

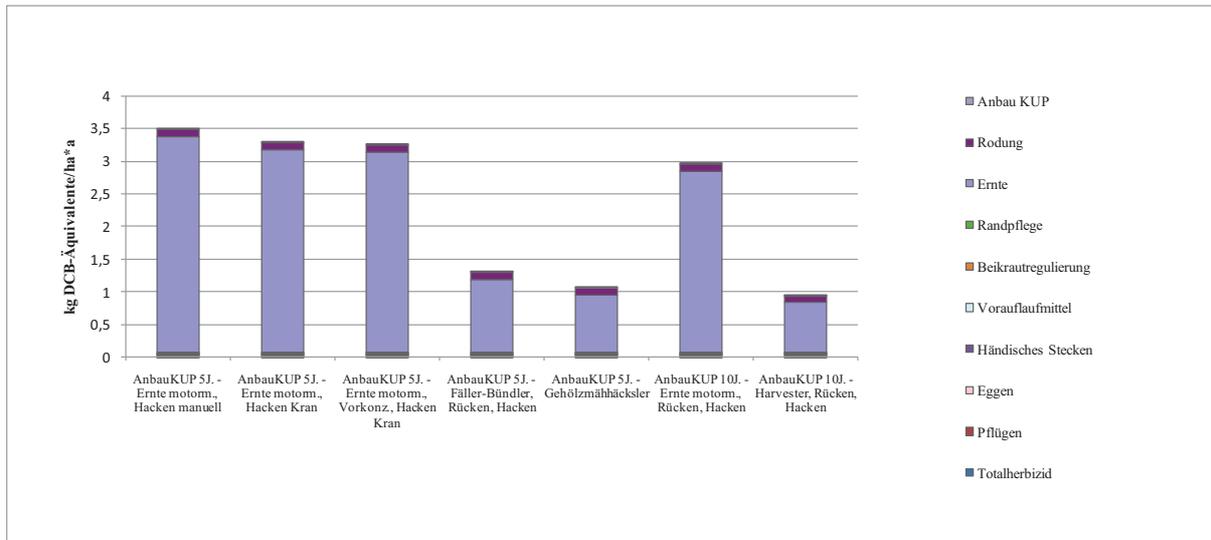


Abbildung 73: Terrestrisches Ökotoxizitätspotenzial der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien: DCB-Äquivalent-Emissionen

### 6.5.2.7 Versauerung

Die Wirkungskategorie Versauerung umfasst eine ganze Reihe von Auswirkungen von Schadstoffen auf Wasser, Boden und Ökosysteme. Die wichtigsten Schadstoffe sind  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_x$ . Das Versauerungspotenzial (Acidification Potential, AP) wird in  $\text{kg SO}_2$ -Äquivalenten angegeben.

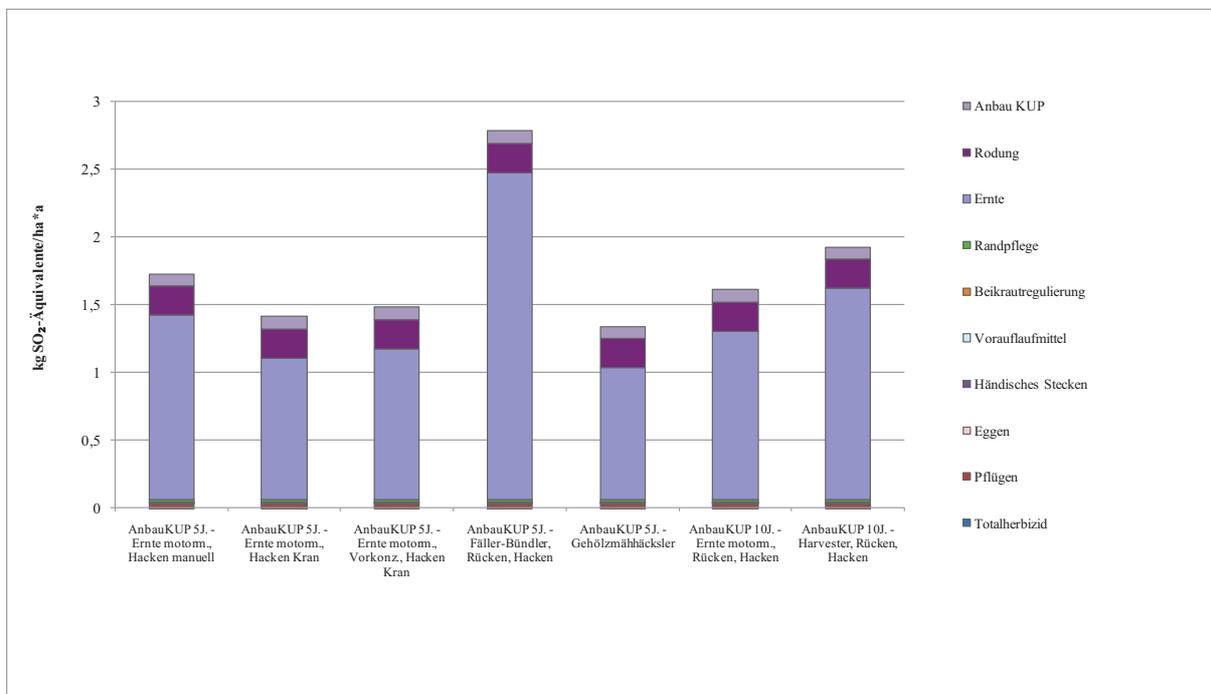


Abbildung 74: Versauerungspotenzial der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien:  $\text{SO}_2$ -Äquivalent-Emissionen

Bei der Wirkungskategorie verursacht der fünfjährige Umtrieb bei Ernte durch den Gehölmähmäcksler mit 1,3 kg den geringsten Output an SO<sub>2</sub>-Äquivalenten, den höchsten mit knapp 2,8 kg die fünfjährige Rotation bei Beerntung mit dem Fäller-Bündler. Ausschlaggebend für das Versauerungspotenzial sind vor allem die Erntemaßnahmen, gefolgt von der energieintensiven Rodung. Der Anteil des Anbaus von KUP ist ebenfalls zu erkennen.

### 6.5.2.8 Land Use

Für die Wirkungskategorie Land Use liegt bis jetzt noch kein allgemein anerkannter Ansatz zur Bewertung vor. Die Arbeit von MILA I CANALS et al. (2007) beschreibt verschiedene Auswirkungen der Landnutzung wie Einflüsse auf die Biodiversität, das Produktionspotenzial oder die ökologische Bodenqualität. Die Autoren stellen für jede dieser Kategorien mehrere Indikatoren auf, um die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen beschreiben zu können. Als Indikatoren für die Biodiversität werden z. B. Rote-Liste-Arten oder Schlüsselarten genannt, für das Produktionspotenzial die Menge an erodiertem Boden und für die ökologische Bodenqualität z. B. das Porenvolumen und die mikrobielle Aktivität. Aussagen zu einer Verbesserung oder Verschlechterung der Wirkungskategorie Land Use lassen sich nach diesem Ansatz folglich nur für einen konkreten Standort und konkrete Maßnahmen treffen. Eine allgemeine Abschätzung für den Anbau von KUP in Bayern kann damit nicht getroffen werden.

Der Ansatz von KOELLNER und SCHOLZ (2007, 2008) bezieht sich auf die zerstörerischen Wirkungen von Landnutzungsänderungen für die natürliche Umgebung. Beim Anbau von KUP existieren ökologische Untersuchungen zwar nur punktuell, unstrittig sind aber der verminderte Herbizideinsatz, die längere Bodenruhe und der höhere Erosionsschutz im Vergleich zur vormaligen ackerbaulichen Nutzung. Ein Modell, das vor allem negative Veränderungen charakterisiert, passt deshalb für die extensive Landnutzungsform KUP nicht. Die Anwendung der Methode von KOELLNER und SCHOLZ (2007, 2008) auf den Anbau von KUP beschreibt RÖDL (2008), kommt aber zu dem Schluss, dass das von den Autoren angenommene Referenzsystem Wald zu Verzerrungen bei der Beurteilung von Kurzumtriebsplantagen führt.

Die in Bayern auf Kurzumtriebsplantagen durchgeführten ökologischen Begleituntersuchungen zeigen positive Veränderungen im Vergleich zur vormaligen Ackernutzung (BLICK et al. 2003, BURGER 2006). Aufnahmen des Sommervogelbestandes von LIESBACH et al. (1999) stellen fest, dass Kurzumtriebsplantagen mit unterschiedlichen Baumarten und Altersstufen eine intensiv landwirtschaftlich genutzte Flur ornithologisch aufwerten können. Nach KROIHER et al. (2010) wirkt sich der Anbau von KUP hinsichtlich der Pflanzenvielfalt insbesondere in ausgeräumten Agrarlandschaften positiv aus. Unterschiedliche Umtriebszeiten innerhalb einer KUP sind dabei von Vorteil. SCHULZ et al.

(2010) stellen hinsichtlich der Zoodiversität Vorteile der KUP gegenüber anderen Energiepflanzen wie Raps oder Mais fest, sehen bezüglich vieler Tiergruppen aber Nachteile gegenüber Wäldern. SCHILDBACH et al. (2009) sehen Kurzumtriebsplantagen vor allem als Landschaftsaufwertung mit Vorteilen für den Biotop- und Artenschutz besonders in ausgeräumten Landschaften.

Alle bekannten Untersuchungen zum Thema Ökologie von Kurzumtriebsplantagen kommen zu einer Vorteilhaftigkeit dieser Bodennutzungsart gegenüber landwirtschaftlichen Energiekulturen wie Raps oder Mais. Für eine Integration in die Ansätze zur Bewertung der Wirkungskategorie Land Use von MILA I CANALS et al. (2007) und KOELLNER und SCHOLZ (2007, 2008) ist die Datenbasis zum jetzigen Zeitpunkt nicht ausreichend.

### 6.5.3 Normierung

Die in der Ökobilanzierung gewonnenen Indikatorergebnisse der Wirkungskategorien sind für sich genommen kaum zu interpretieren. Die Norm ISO 14042 (NAGUS 2006a) sieht deshalb eine Normierung, auch Normalisierung genannt, vor. Normierung heißt nichts anderes als der Bezug auf einen Referenzwert. Referenzwerte können nach ISO 14042 alternative Produktsysteme, wie die in Kapitel 6.5.2.1 und 6.5.2.2 dargestellten landwirtschaftlichen Energiekulturen Winterraps, Zuckerrübe und Silomais sein. Hier liegen Ergebnisse allerdings nur für die Wirkungskategorien Klimaerwärmung und Eutrophierung vor.

Für die Normierung werden deshalb die Gesamtemissionen in den dargestellten Wirkungskategorien pro Kopf der Bevölkerung in Deutschland herangezogen. Die Äquivalenzwerte für Deutschland stammen aus der GaBi 4 Datenbank von PE INTERNATIONAL (2007) und wurden mit der Bevölkerungszahl (EUROSTAT 2010) auf einen Pro-Kopf-Wert bezogen. Tabelle 57 zeigt die Indikatorergebnisse des Anbaus von KUP in Prozent der Pro-Kopf-Emissionen von Deutschland.

Tabelle 58: Indikatorergebnisse des Anbaus von 1 ha Kurzumtriebsplantage (Erntelinie: Gehölmähhäcksler) in Prozent der jährlichen Pro-Kopf-Emissionen in Deutschland

Wirkungskategorie	Einheit	%
Klimaänderung	kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent	-93,81
Eutrophierung	kg PO <sub>4</sub> -Äquivalent	1,09
Abiot. Ressourcenverbrauch	kg Sb-Äquivalent	1,70
Humantoxizität	kg DCB-Äquivalent	0,29
Ozonabbau	kg R11-Äquivalent	0,05
Terr. Ökotoxizität	kg DCB-Äquivalent	0,27
Versauerung	kg SO <sub>2</sub> -Äquivalent	2,76

Der Prozentwert bei der Wirkungskategorie Klimaänderung ist mit einem negativen Vorzeichen versehen. Er entspricht dem GWP 100 Saldo aus Abbildung 67 und stellt die Speicherung von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten im Holz dar, wirkt also der Klimaänderung entgegen. Mit dem Anbau von einem Hektar Kurzumtriebsplantage können knapp 94 % der jährlichen Treibhausgasemissionen eines Bundesbürgers eingespart werden. Die Emissionen in den anderen Wirkungskategorien haben nur einen geringen Anteil an der Gesamtbelastung in Deutschland, am wenigsten tragen KUP zu Ozonabbau und terrestrischer Ökotoxizität bei.

### **6.5.4 Ergebnisse der Sachbilanz der Verbrennung**

In die ökobilanzielle Bewertung der Verwertung der Hackschnitzel geht nicht wie bei der Sachbilanz von Anbau und Ernte der untere Heizwert von absolut trockenem Holz ein, sondern, berechnet nach den bei den Ernteeinsätzen gemessenen Wassergehalten der Hackschnitzel, der tatsächliche Energiegehalt des jeweiligen Hackschnitzel-Sortiments. Der Jahresnutzungsgrad der 300 KW-Anlage wurde nach HIENDLMEIER (2009) mit 78 %, der der KWK-Anlage mit 65 % Wärme und 15 % Strom an aktuelle bayerische Verhältnisse angepasst (LEUCHTWEIS 2010). Die Prozesse der ecoinvent Datenbank wurden dementsprechend modifiziert.

#### **6.5.4.1 Energieeinsatz und Energiebilanz bei Verbrennung**

In Abbildung 75 fällt sofort der im Vergleich sehr hohe Stromverbrauch der 300 KW-Anlage auf. Die Unterschiede im Energieinput der einzelnen Ernteketten, die von 2800 MJ bis über 6000 MJ pro Jahr und Hektar reichen, relativieren sich hier. Der Stromverbrauch durch die Heizung übersteigt den Energieinput durch den Anbau, aber auch die Inputs durch Transport der Hackschnitzel, Ascheentsorgung und Vorkette der 300 KW-Anlage. Er wird verursacht durch die elektrischen Motoren, die in einer Hackschnitzelheizung dieser Größenordnung verbaut sind (Antriebsmotor von Stoker-, Austrags- und Entaschungsschnecke, des Vorschubrosts; Saugzuggebläse, Verbrennungsluft- und Zündgebläse). Allerdings beruhen die in der ecoinvent Datenbank hinterlegten Sachbilanz-Daten auf dem Stand des Jahres 2000 (BAUER 2007) und entsprechen damit nicht der neuesten Technik. Eine Bilanzierung mit den Werten des aktuellen Modells einer 300 KW-Hackschnitzelheizung hätte mit Sicherheit einen geringeren Stromverbrauch zur Folge. In der Tendenz sind die in Abbildung 74 dargestellten Energieverbräuche aber richtig.

## Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen

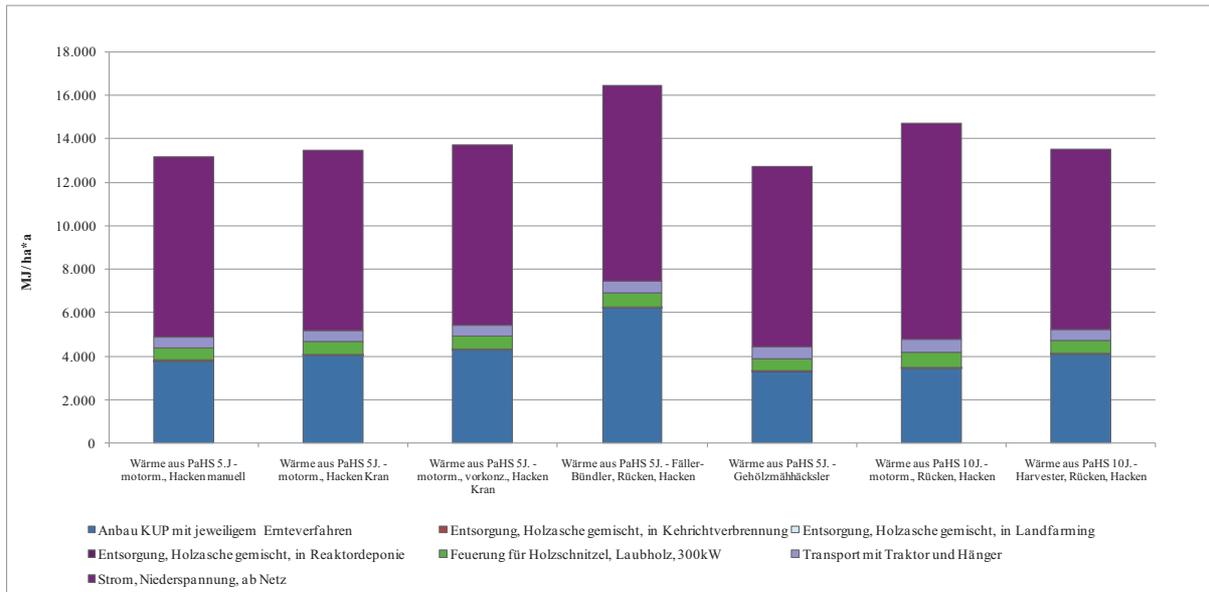


Abbildung 75: Gesamtenergie-Input von Anbau, Transport und Verwertung der pro Jahr und Hektar produzierten KUP-Hackschnitzel in einer 300 KW Hackschnitzelheizung differenziert nach sieben Erntelinien

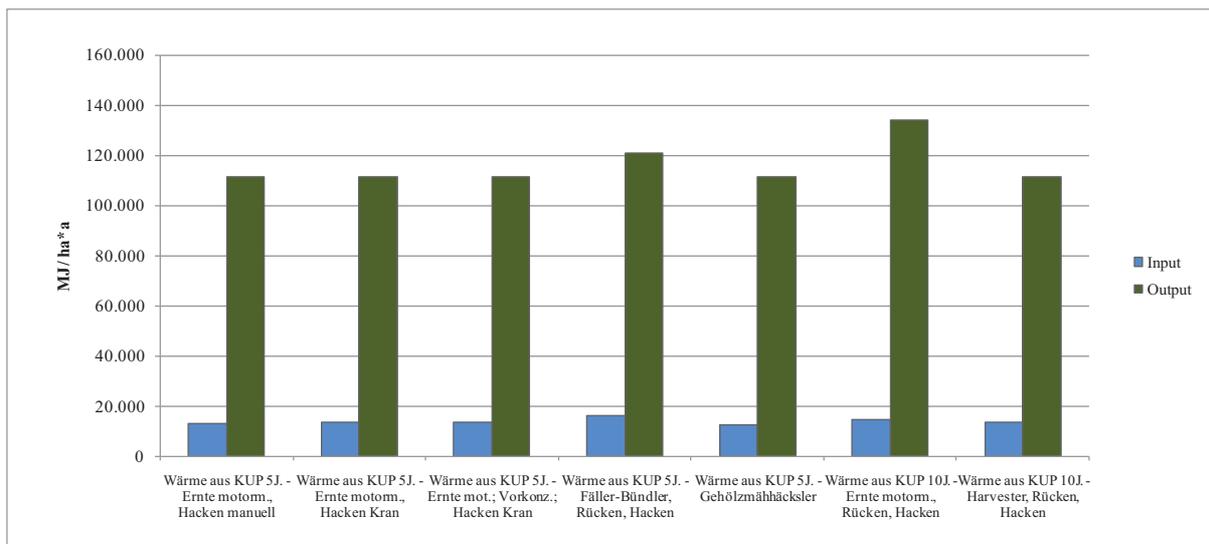


Abbildung 76: Verhältnis von Energieinput zu -output bei Verbrennung der Hackschnitzel in einer 300 KW Anlage differenziert nach sieben Erntelinien

Abbildung 76 stellt das Verhältnis von Energieinput zu -output bei Verbrennung der Hackschnitzel dar. Der Output schwankt je nach Wassergehalt der Hackschnitzel zwischen 111.670 und 133.950 MJ/ha\*a. Das liegt an den bereits vorgetrockneten Hackschnitzeln der Erntelinien „Fällerbündler – Rücken – Hacken“ und „Motormanuelles Fällen – Rücken – Hacken“, deren Wassergehalte bei 55 bzw. 24 % lagen. Alle anderen Erntelinien produzierten Hackschnitzel mit 60 % Wassergehalt. Die Differenz im Energie-Output beträgt mehr als 22.000 MJ/ha\*a, was den Energieaufwand bei Anbau, Transport und Ernte klar übersteigt.

Das Verhältnis von Energieinput zu -output schwankt zwischen 1 : 7,4 bei der Ernte mit dem Fäller-Bündler und 1 : 9,1 bei der motormanuellen Ernte in der zehnjährigen Rotation.

### 6.5.4.2 Energieeinsatz und Energiebilanz bei Erzeugung von Wärme und Strom

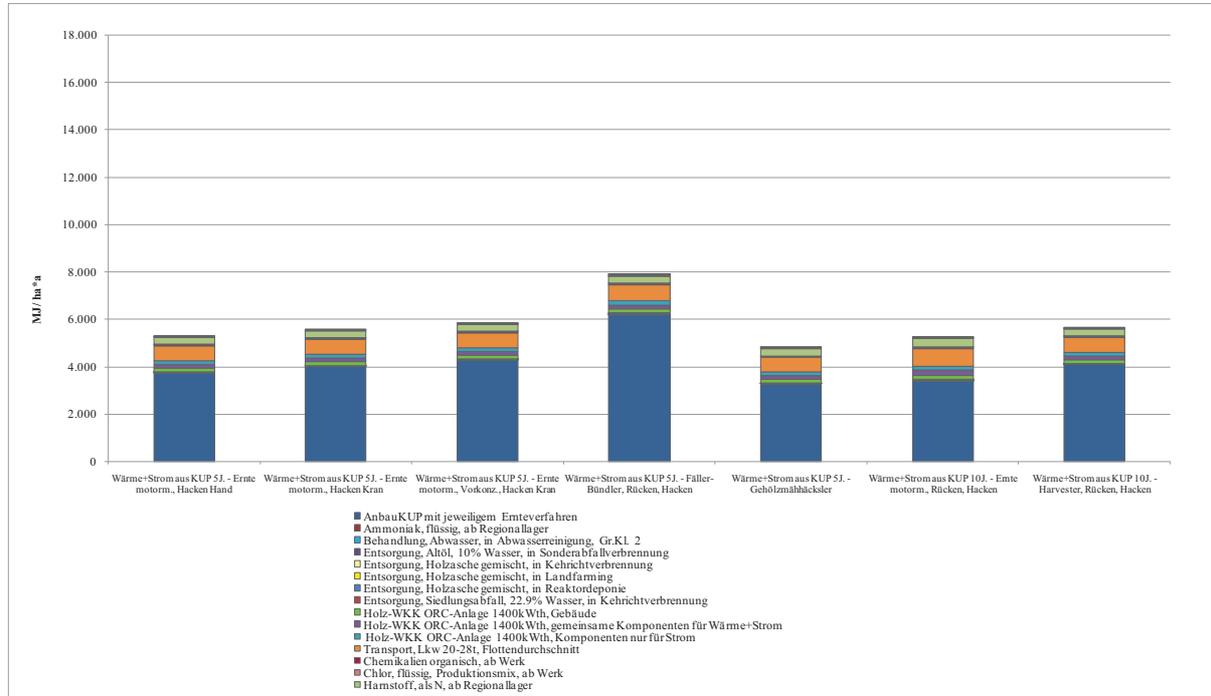


Abbildung 77: Gesamtenergie-Input bei Anbau, Transport und Verwertung der pro Jahr und Hektar produzierten KUP-Hackschnitzel in einer 1,4 MW KWK-Anlage differenziert nach sieben Erntelinien

Bei dem in Abbildung 77 dargestellten Gesamtenergie-Input bei Verwertung der KUP-Hackschnitzel in einer KWK-Anlage wird deutlich, dass der Energieverbrauch dieser Anlage wesentlich geringer ausfällt als bei der 300 KW-Hackschnitzelheizung. Der Gesamtenergie-Input liegt bei maximal 8000 MJ/ha\*a für die Erntelinie mit dem Fäller-Bündler. Die Verbrennung derselben Menge an Hackschnitzeln dieser Erntelinie in der 300 KW-Hackschnitzelheizung benötigte dagegen über 16000 MJ/ha\*a.

Der Output an Wärme und Strom ist in Abbildung 78 dargestellt. Von der Tendenz entspricht er dem Output an Wärme in Abbildung 76, die Werte liegen geringfügig höher als der reine Output an Wärme, sie schwanken je nach Wassergehalt zwischen 114500 und 137400 MJ/ha\*a.

## Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen

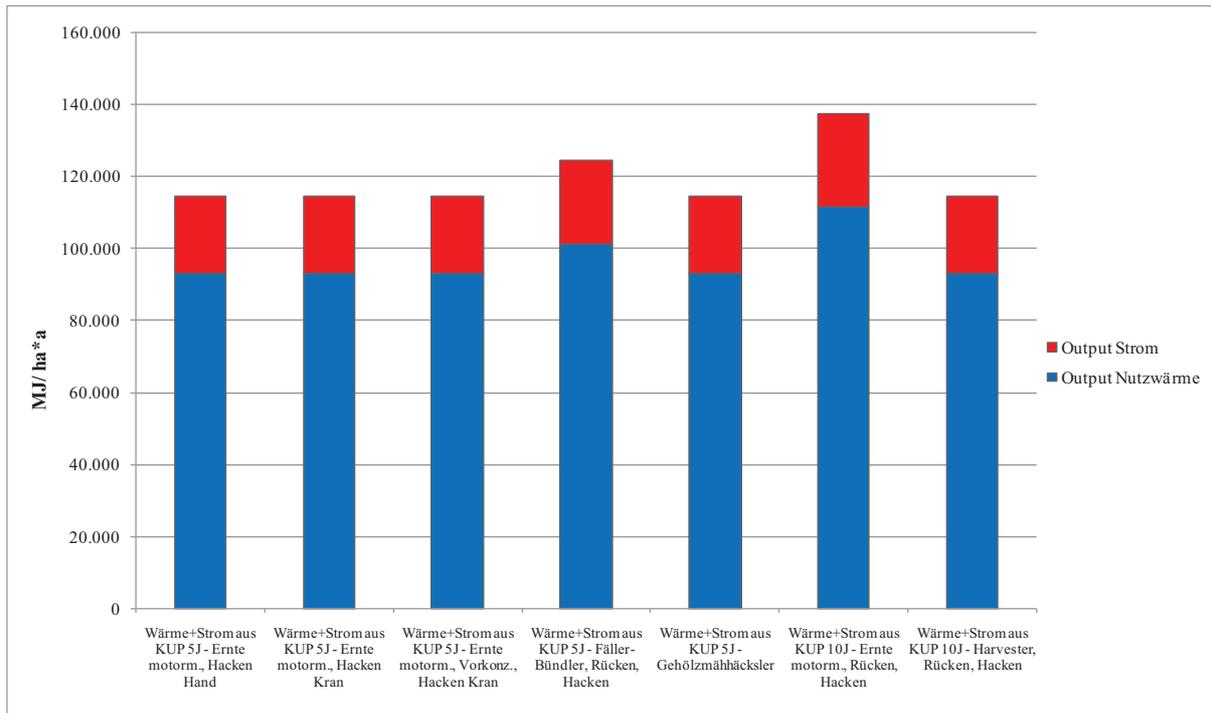


Abbildung 78: Wärme- und Stromoutput bei Verwertung der pro Jahr und Hektar produzierten KUP-Hackschnitzel in einer 1,4 MW KWK-Anlage differenziert nach sieben Erntelinien

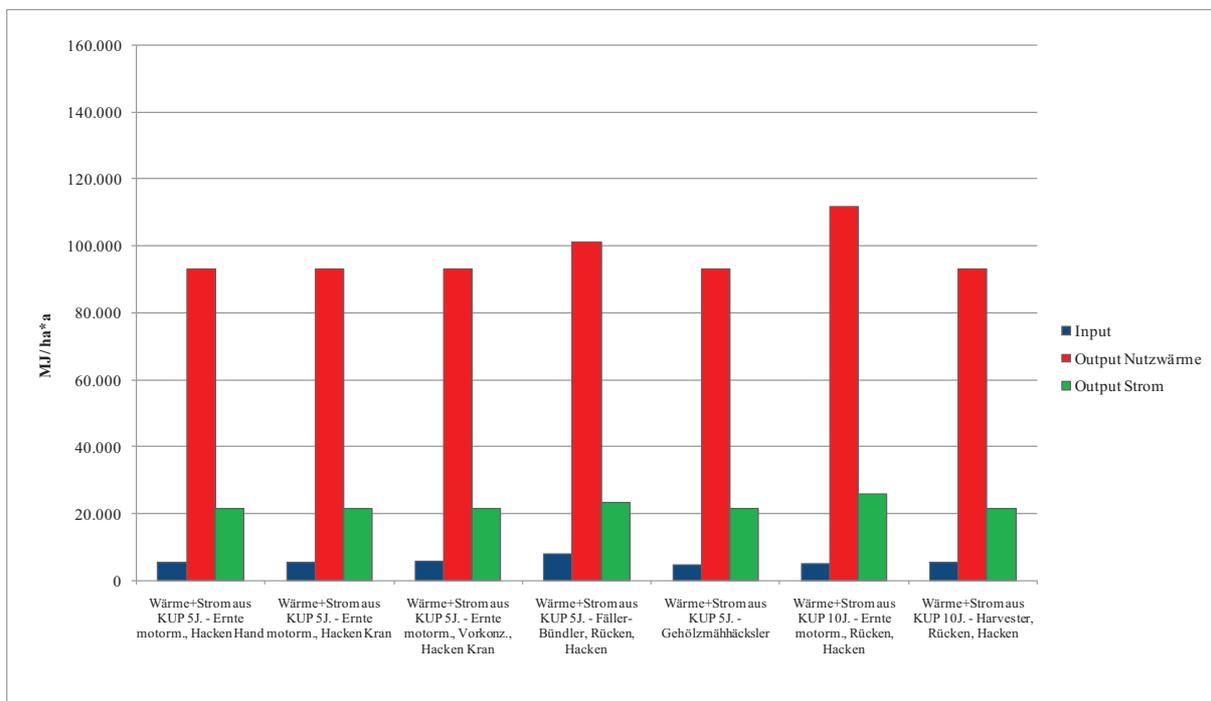


Abbildung 79: Verhältnis von Gesamtenergieinput-Output bei Verwertung der pro Jahr und Hektar produzierten KUP-Hackschnitzel in einer KWK-Anlage differenziert nach sieben Erntelinien

Durch den geringeren Input der KWK-Anlage sind die Verhältnisse von Input – Output aber wesentlich günstiger als bei der reinen Verbrennung (Abbildung 79). Sie reichen von 1 : 16

bei der Erntelinie mit dem Fäller-Bündler bis 1 : 26 beim motormanuellen Fällen mit anschließendem Rücken und Hacken am zentralen Platz in der zehnjährigen Rotation.

Einen Vergleich mit der landwirtschaftlichen Energiekultur Silomais ermöglichen die Daten von BYSTRICKY (2009). Die Autorin gibt für die Verwertung der auf einem Hektar des Erzeugungsgebietes Regensburg-Straubinger-Gäu produzierten Menge an Silomais in einem Biogas-Blockheizkraftwerk mit 2 MW Leistung einen Output an Wärme und Strom von 171443 MJ an, was den vergleichbaren Output in Abbildung 78 übertrifft. Für ein kleineres Biogas-BHKW mit 350 KW und einer nur geringen Abnahmemenge an Wärme errechnete sie einen Output von 88169 MJ. Dies zeigt, dass der Vorteil der höheren Biomasseleistung von Silomais im Vergleich zu KUP bei der Verwertung nur dann bestehen bleibt, wenn die Abnahme der Wärme der Biogasanlage gesichert ist.

### 6.6 Diskussion

Um die Frage nach der Notwendigkeit einer Düngung von KUP zu beantworten, wurden im dritten und vierten Umtrieb der Versuchsfläche Wöllershof Blattproben von Balsampappeln genommen und auf Gehalte verschiedener Nährelemente analysiert. Methodisch orientierte man sich dabei an JUG (1998), die auf ihren Versuchsstandorten in den ersten beiden Rotationsperioden dieser Fragestellung nachging. Alle beprobten Balsampappelklone in Wöllershof waren mit Stickstoff, Phosphor und Kalium ausreichend versorgt. Zum großen Teil lagen die Nährelementkonzentrationen über den in der Literatur genannten Bereichen für eine ausreichende Ernährung. Mit einer Varianzanalyse konnte nachgewiesen werden, dass bei den Elementen P und K kein signifikanter Unterschied in der Nährstoffausstattung der Blätter zwischen der dritten und vierten Rotation bestand. Für N konnte mit Hilfe der deskriptiven Statistik sogar auf eine ansteigende Tendenz geschlossen werden. Signifikante Unterschiede hinsichtlich der Nährstoffausstattung bestanden jedoch zwischen den Klonen.

JUG (1998) kam in ihren Untersuchungen zu denselben Schlussfolgerungen und konnte diese durch waldwachstumskundliche Befunde untermauern. Auch KERN et al. (2009) stellten keine signifikanten Wuchsunterschiede zwischen den Düngevarianten fest. BOELKE (2006) geht zumindest bis zur vierten Rotationsperiode nicht von der Notwendigkeit einer Düngung aus. Eine Düngung wurde deshalb in die hier vorliegende Ökobilanzierung nicht einbezogen. Der geringe Nährstoffbedarf der Balsampappel ist neben der hohen Zuwachsleistung ein weiteres Argument für den Anbau dieser Baumart in Kurzumtriebsplantagen, insbesondere wenn man bedenkt, dass in der Studie von HELLER et al. (2003) die bei der Weidenkultur notwendigen anorganischen Düngergaben für 37 % des gesamten Energieinputs verantwortlich sind. Die Forderung des NABU (2008) Düngungsmaßnahmen, wenn überhaupt, nur nach einer

vorherigen Bedarfsanalyse durchzuführen, ist vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse berechtigt.

Die Ergebnisse der vorliegenden Ökobilanzierung zeigen die Kurzumtriebsplantagen als sehr extensives Landnutzungssystem. Der Input an Energie liegt je nach Erntelinie zwischen 3300 und 6200 MJ/ha\*a. Dies korrespondiert sehr gut mit den von SCHOLZ (1997b) vorgelegten Ergebnissen. Hier schwankt der Kumulierte Gesamtenergieaufwand (KEA), der sowohl direkten als auch indirekten Energieaufwand (Graue Energie) erfasst, je nach Erntesystem zwischen knapp 3000 und ca. 7000 MJ/ha\*a.

Die Verhältnisse von Energieinput zu -output liegen beim Anbau, je nach Erntesystem zwischen 1 : 29 und 1 : 55. Die Input-Output-Relationen entsprechen ungefähr den Ergebnissen von DUBUISSON und SINTZOFF (1998), die für drei unterschiedlich intensiv bewirtschaftete Short Rotation Coppice-Systeme (SRC) Verhältnisse zwischen 1 : 23 und 1 : 30 ermittelten. HELLER et al. (2003) führten eine LCA bei einer Weiden-Kurzumtriebsplantage durch und kamen dabei auf Outputs von 40 bis 58 Einheiten Energie pro Einheit an verbrauchter fossiler Energie.

Die Ernte ist die Maßnahme mit dem höchsten Energieaufwand, mit deutlichem Abstand vor der Rodung. Dies passt gut zu den Ergebnissen von DRUHAN et al. (2003). Die Autoren ermittelten in der Life Cycle Analysis einer Weiden SRC einen Anteil der Ernte am Gesamtenergieinput von fast 90 %, Düngung und Rodung nicht mit einberechnet. Von den in Kapitel 5 vorgestellten sieben Erntesystemen benötigt der vollautomatische Gehölmähmäcksler den niedrigsten Energieinput, gefolgt von der motormanuellen Fällung mit anschließendem Rücken und Hacken im zehnjährigen Umtrieb. Am schlechtesten schneidet die Ernte mit dem Fäller-Bündler und nachfolgendem Rücken und Hacken ab. Genau dieselbe Tendenz ermittelte SCHOLZ (1997a). In der Studie des Autors verursachte der Anbau von Balsampappeln mit vollmechanisierter Erntevariante den geringsten Kumulierten Gesamtenergieaufwand (KEA). Die 5-Phasen-Bündellinie war mit einem mehr als doppelt so hohen KEA die energieintensivste Variante. Die Ernte verursacht in der hier vorgelegten Arbeit auch bei den Wirkungskategorien die meisten Emissionen bzw. den höchsten Verbrauch an Ressourcen. Die prozentualen Energieaufwendungen im Verhältnis zum unteren Heizwert der produzierten Hackschnitzel (Tabelle 56) stimmen sehr gut mit der Energiebilanz von Waldhackschnitzeln überein, die von ZIMMER (2009, 2010) vorgelegt wurde. Betrachtet man alle Szenarien dieses Autors, so ist der Energieaufwand bei den KUP-Hackschnitzeln im Durchschnitt etwas geringer als bei den Waldhackschnitzeln, was an der guten räumlichen Ordnung und der kahlschlagähnlichen Ernte liegen mag. Auffällige Unterschiede bestehen zur Arbeit von RÖDL (2008), die in ihrer ungedüngten Variante zur

Erzeugung von einer Tonne atro Hackschnitzel nur 136 MJ errechnete. Die vergleichbaren Werte der vorliegenden Arbeit schwanken zwischen 330 und 620 MJ.

Kurzumtriebsplantagen sind den landwirtschaftlichen Energiekulturen Winterweizen und Winterraps in puncto Ertrag und Extensivität deutlich überlegen. Allerdings können sie mit der Produktivität von Silomais nicht mithalten. Die Energieerträge von Silomais übertreffen die von KUP bei weitem. Eine Modellierung der Energiebilanz mit angenommenen höheren Erträgen der KUP ergab, dass Kurzumtriebsplantagen erst bei einem Ertrag von 15 t atro/ha\*a mit dem Silomais konkurrieren können.

Bei den Wirkungskategorien Klimaänderung und Eutrophierungspotenzial konnte mit den Ergebnissen von BYSTRICKY (2009) ein Vergleich zu landwirtschaftlichen Energiekulturen Winterraps, Zuckerrübe und Silomais gezogen werden. Auch hier zeigt sich die Extensivität des Landnutzungssystems KUP. Die landwirtschaftlichen Energiekulturen emittieren ein Vielfaches an CO<sub>2</sub>- und PO<sub>4</sub>-Äquivalenten.

Bei der Ökobilanzierung der Verwertung der Hackschnitzel wurden zwei gängige Varianten gewählt. Zum einen die Verbrennung in einer 300 KW-Hackschnitzelheizung und zum anderen die Verwertung in einer 1,4 MW KWK-Anlage mit den Outputs Wärme und Strom. Bei der Hackschnitzelheizung fällt der sehr hohe Stromverbrauch auf, der die bei Anbau und Ernte benötigte Energiemenge übertrifft. Die KWK-Anlage schneidet hier günstiger ab. Das Verhältnis von Energieinput zu -output ist hier weiter. Auch DUBUISSON und SINTZHOFF (1998) bezeichnen die KWK-Anlage als vorteilhafteste Form der Energiegewinnung aus KUP Hackschnitzeln. Beide Varianten verfügen über einen gemeinsamen Vorteil: Nach SCHOLZ und ELLERBROCK (2002) haben Pappeln wegen ihrer geringen Anteile von N, K, S und Cl im Holz während des Verbrennungsprozesses die niedrigsten Emissionen im Vergleich zu Hanf, Winterroggen, Triticale, Topinambur, Knaulgras und Weide.

Die vorliegende Ökobilanz beruht in weiten Teilen auf empirischen Erhebungen. Die Arbeitsstudien wurden unter den Bedingungen verschiedener Versuchsflächen erhoben. Verallgemeinerungen sind deshalb nur bedingt möglich. Die Ergebnisse der Ökobilanzierung sind jedoch insgesamt schlüssig und stimmen in der Tendenz mit den meisten anderen durchgeführten Bilanzen überein.

### **7 Schlussfolgerungen**

Für einen erfolgreichen Anbau von Kurzumtriebsplantagen sind Standortwahl, Regulierung der Begleitvegetation und ein an die Umtriebszeit angepasster Pflanzverband von ausschlaggebender Bedeutung. Zuwächse von 10-13 Tonnen absolut trockener Biomasse sind mit dem Anbau der Balsampappel in Bayern möglich. Eine Düngung von Kurzumtriebsplantagen mit dieser Baumart ist auch in der dritten und vierten Rotationsperiode nicht notwendig. Die untersuchten Erntelinien eignen sich gut für die Bereitstellung von Hackschnitzeln. Auch die motormanuellen Verfahren stellen im Hinblick auf die kleinflächige Struktur der bayerischen Landwirtschaft eine Alternative dar. Bei der Forderung nach höherer Produktivität und nach Kostensenkungen geht an einer vollautomatischen Ernte oder an einer Erhöhung der Umtriebszeit kein Weg vorbei. Die Ökobilanzierung von Anbau und Ernte zeigt, dass die vollautomatische Ernte den geringsten Energieverbrauch hat und damit das weiteste Verhältnis von Input zu Output an Energie. Dies spricht für die Weiterentwicklung vollautomatischer Ernteverfahren für Balsampappel-KUP mit Umtriebszeiten von bis zu zehn Jahren. Die Ökobilanzierung stellt die Kurzumtriebsplantagen als sehr extensive Form der Landbewirtschaftung dar. In der Extensivität sind die Kurzumtriebsplantagen allen landwirtschaftlichen Energiekulturen überlegen. Beim Energieoutput können sie allerdings nicht mit dem Silomaisanbau für die Biogasproduktion konkurrieren. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit von umfangreichen Züchtungsprogrammen zur Leistungssteigerung bei der Balsampappel. Die Bereitstellung einer ausreichenden Anzahl von geeigneten, geprüften Klonen ist ein wichtiger Schritt beim wünschenswerten Ausbau dieses ökologisch sehr vorteilhaften Landnutzungssystems.

## **8 Zusammenfassung**

### **Begründung und Pflege**

Für den Anbau in Kurzumtriebsplantagen (KUP) eignen sich eine ganze Reihe von Baumarten und Klonen. Kulturen mit Balsampappeln und Weiden können durch Stecklinge besonders kostengünstig begründet werden. Für das Gelingen der Kultur hat sich zusätzlich zu Pflügen und Eggen der vormalig landwirtschaftlichen Flächen ein Einsatz von Herbiziden im Jahr der Anlage als notwendig herausgestellt. Auch ein mit Umtriebszeit und geplanter Erntetechnik abgestimmter Pflanzverband ist wichtig für einen guten Zuwachs. Soll auf der Fläche die landwirtschaftliche Nutzung wieder aufgenommen werden, so hat sich für die Rodung von KUP ein zweistufiges Verfahren mit Mulchen und anschließendem Tieffräsen bewährt.

### **Biomasseproduktion**

Die Ergebnisse der ertragskundlichen Erhebungen zeigen, dass beim Anbau von Balsampappelklonen ein Zuwachs von 10-13 Tonnen absolut trockener Biomasse pro Hektar und Jahr über die Gesamtnutzungsdauer der Plantage möglich ist. Bereits im ersten Umtrieb können, bei Vermeidung von Anbaufehlern, 10 t atro/ha\*a produziert werden. Werden bei der Begründung die o. g. Maßnahmen nicht beachtet, kann der Zuwachs aber auf einen Bruchteil dessen sinken. Roterle und Korbweide kommen auf eine Leistung von ca. 6-7 t atro. Die Sorten der Aspe schwanken in ihrer Biomasseproduktion zwischen 6-12 t atro/ha\*a, im Durchschnitt reichen sie nicht an die Biomasseleistungen der Balsampappel heran.

### **Ernte von Kurzumtriebsplantagen**

Sieben Erntelinien von motormanuell mit handbeschicktem Hacker bis zum vollautomatischen Gehölmähhäcksler wurden mit forstlichen Arbeitsstudien begleitet. Prinzipiell sind alle vorgestellten Systeme für die Beerntung von KUP geeignet. Die motormanuelle Ernte mit handbeschicktem Hacker eignet sich wegen der körperlich stark belastenden Arbeit nur für kleine Flächen. Die Produktivität der vollmechanisierten Linien ist im fünfjährigen Umtrieb höher als die der motormanuellen. Die höchste Produktivität erreicht der vollautomatische Gehölmähhäcksler, er stellt zugleich die kostengünstigste Variante dar. Eine Möglichkeit zur Kostensenkung ist die Erhöhung der Umtriebszeit. Die motormanuelle Ernte im zehnjährigen Umtrieb mit anschließendem Rücken und Hacken verursachte wegen der höheren Stückmassen der geernteten Bäume kaum höhere Kosten als die Ernte mit dem Gehölmähhäcksler. Ein weiterer Vorteil dieser Erntelinie ist die Produktion von trockenen, lagerfähigen Hackschnitzeln.

## Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung des Anbaus von Kurzumtriebsplantagen wird differenziert für sieben Erntelinien, von motormanueller Fällung bis zum vollautomatischen Mäh Hacker, dargestellt. Funktionelle Einheit ist ein Hektar Ackerland mit einem jährlichen Zuwachs von 10 Tonnen absolut trockener Biomasse. Die Frage nach der Notwendigkeit der Düngung von Kurzumtriebsplantagen konnte durch eine statistische Analyse der Nährstoffgehalte in den Blättern von Balsampappeln negativ beantwortet werden. Eine Düngung von KUP ist daher nicht Bestandteil der Ökobilanzierung, genau so wenig wie eine Veränderung des Bodenkohlenstoffhaushalts, der durch die im Ökobilanzierungs-Modell angenommene Wiederherstellung des Ausgangszustands des Ackers durch Rodung der Plantage als konstant gesehen wird.

KUP erweisen sich durchwegs als sehr extensive Energiekulturen. Bei Anbau und Ernte von Kurzumtriebsplantagen liegen die energiebezogenen Input-Output-Verhältnisse zwischen 1 : 29 und 1 : 55. Der größte Teil des Energieinputs wird bei Ernte und Rodung aufgewendet. Eine Verbesserung der Energiebilanz wird also insbesondere durch gute Planung und Durchführung der Ernte und den Verzicht auf die Rodung möglich sein. Im fünfjährigen Umtrieb schnitt der vollautomatische Gehölmähmäcksler mit dem geringsten Energieinput am besten ab, gefolgt von der motormanuellen Fällung mit anschließendem Rücken und Hacken an einem zentralen Platz in der zehnjährigen Rotation. Die Erhöhung der Umtriebszeit mit der Ernte größerer Stückmassen ist deshalb neben der Weiterentwicklung von vollautomatischen Ernteverfahren die zweite Möglichkeit zur Verringerung des Energieinputs. Kurzumtriebsplantagen sind nach den hier vorgestellten Ergebnissen landwirtschaftlichen Kulturen zur Energiegewinnung, wie Winterraps und Winterweizen, in der Produktionsleistung überlegen, dem Anbau von Silomais zur Biogasgewinnung aber unterlegen. Eine Modellierung der Ökobilanzierung mit höheren Biomasseleistungen zeigt, dass bei einem Zuwachs von 15 Tonnen absolut trockener Biomasse mit dem Silomais gleichgezogen werden kann.

Auch die Ergebnisse in den Wirkungskategorien beweisen den extensiven Charakter der Bodennutzungsart Kurzumtriebsplantage. Die Bewirtschaftung von KUP verursacht, verglichen mit landwirtschaftlichen Energiekulturen, nur einen Bruchteil deren Emissionen an klimawirksamen Gasen und Phosphatäquivalenten.

Die Verwertung der Hackschnitzel wurde in einer 300 KW Hackschnitzelheizung und einer 1,4 MW KWK-Anlage modelliert. Hier fällt die Verbrennung in der Hackschnitzelheizung durch einen hohen Stromverbrauch auf, der höher ist als der Energieaufwand bei Anbau und Ernte.

Wegen ihres niedrigeren Energieverbrauchs schneidet die KWK-Anlage besser ab, das Input-Output-Verhältnis liegt zwischen 1 : 16 und 1 : 24, bei Verwertung in der Hackschnitzelheizung reicht es von 1 : 7,4 bis 1 : 9,1.

## **9 Abstract**

### **Establishment and management**

There are a number of tree species and clones suitable for the cultivation in short rotation coppice (SRC). Cultivations of balsam poplar and willow can be established cost-effectively by using cuttings. In addition to harrowing and ploughing of former agricultural areas, the use of herbicides in the year of plantation has proved necessary for a successful cultivation. Also, plant spacing needs to be coordinated with rotation period and planned harvesting techniques in order to obtain good increment. If agricultural use of the land is resumed, then a two-stage procedure consisting of mulching followed by deep milling will prove successful.

### **Biomass production**

The results of yield surveys show that with the cultivation of balsam poplar clones increments of 10 – 13 oven dry tons (odt) of biomass per hectare and year over the total utilisation period of the plantation are possible. Already within the first year of rotation 10 odt/ha\*a can be produced provided no mistakes in the cultivation were made. If the abovementioned measurements were not taken into account during establishment the increment can decrease to only a small fraction of it. The output of red alder and basket willow amounts to approx. 6-7 odt/ha\*a. The biomass production of aspen species fluctuates from 6 to 12 odt/ha\*a.; on average it does not reach the biomass yield of balsam poplar.

### **Harvesting of short rotation coppice**

In working time studies, seven harvesting methods ranging from manual with a hand-fed chipper to a fully automatic feller-chunker were investigated. In principle, all the systems presented are suitable for harvesting of SRC. Manual harvesting with a hand-fed chipper is only suitable for small areas due to physically hard work. The productivity of fully mechanized methods in a five-year rotation period is higher than that of manually based methods. Highest productivity is obtained by using the fully automatic feller-chunker being also the most cost-efficient one. One possibility to reduce the costs is to increase the rotation period. Manual harvesting with a rotation period of ten years followed by full-tree skidding and chipping did not lead to much higher costs than harvesting with the feller-chunker due to the higher unit volume of the harvested trees. Another advantage of this harvesting method is the production of dry, storable woodchips.

## **Life cycle assessment**

The life cycle assessment of cultivation of short rotation coppice is presented for seven different harvesting methods ranging from manual felling to fully automatic feller-chunker. The functional unit is one hectare of farmland with an annual growth of 10 odt of biomass. Statistical analysis of nutrient content in the leaves of balsam poplar showed that there is no need for fertilization of short rotation plantations. Therefore, fertilization of SRP is not part of the life-cycle assessment, nor is the change in the soil carbon budget, which is regarded as being constant since recovery of the original state of the farmland by clearing of the plantation is presumed in the life-cycle-assessment model.

SRC have consistently proven to be very extensive energy crops. For cultivation and harvesting of short rotation coppice the energy-related input-output ratios lie between 1 : 29 and 1 : 55. Most of the energy input incurred during harvesting and clearing. Improvement of the energy balance will be possible by means of good planning and implementation of the harvest without any clearing. For a rotation period of five year, the fully automatic feller-chunker performed best with the lowest energy input, followed by manual felling with subsequent full-tree skidding and chipping at a central site for a ten-year rotation period. Therefore, in addition to the further development of fully automatic harvesting methods, increasing the rotation time by harvesting of higher unit volumes presents another possibility of decreasing the energy input. According to the results presented here, the production output of short rotation coppice is superior to that of agricultural cultivations for energy generation, like winter rape and winter wheat. But they are inferior to the cultivation of silage maize for biogas production. Modelling of the life-cycle assessment with higher biomass output shows that a growth of 15 tons of absolute dry biomass is enough to catch up with the silage maize.

The results in the characterization categories also prove the extensive character of short rotation coppice. The management of SRC causes only a fraction of the emission of climate-changing gases and phosphate equivalents when compared to agricultural energy cultivations.

Utilization of woodchips was modelled in a 300 KW wood chip heating system and a 1.4 MW cogeneration plant of heat and power (CHP). Burning in the wood chip heating system stands out due to its energy consumption being higher than the energy consumption required for cultivation and harvesting. The CHP plant performs better due to lower energy consumption with an input-output ratio between 1 : 16 and 1 : 24, whereas the ratio for utilisation in a wood chip heating system ranges between 1 : 7.4 and 1 : 9.1.

## 10. Verzeichnisse

### 10.1 Literatur

- BAUER, C. (2007): Teil IX Holzenergie, ecoinvent report No. 6 - IX, Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK UND DATENVERARBEITUNG (2007): Ergebnisse der Erntestatistik für Feldfrüchte und Grünland nach Agrar- und Erzeugungsgebieten 2007.
- BECKER, R.; WOLF, H. (2009): Erfahrungen mit der Ernte von Kurzumtriebsplantagen. Acker, Plantage, Acker – eine wechselseitige Nutzung. AFZ-Der Wald Nr. 10, 530-531.
- BERGMANN, W. (1993): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Fischer Verlag, Jena, Stuttgart.
- BIEDERMANN, G.; MOITZI, G.; BOXBERGER, J. (2010): Klar positive Energiebilanz in der Getreideproduktion. Bick ins Land Nr. 2, Jahrgang 45, 34-36.
- BISKUPEK, B.; PATYK, A.; RADTKE, J. (1997): Daten zur Pflanzenproduktion. In: KALTSCHMITT, M.; REINHARDT, G. (HRSG.): Nachwachsende Energieträger, Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Vieweg Verlag.
- BLICK, T. ; BURGER, F. (2002): Wirbellose in Energiewäldern. Naturschutz und Landschaftsplanung, Heft 9, 276-284.
- BLICK, T. ; WEISS, I. ; BURGER, F. (2003): Spinnentiere einer neu angelegten Pappel-Kurzumtriebsfläche (Energiewald) und eines Ackers bei Schwarzenau (Lkr. Kitzingen, Unterfranken, Bayern). Arachnologische Mitteilungen 25, 1-16.
- BOELKE, B. (2006): Schnellwachsende Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen – Leitfaden zur Erzeugung von Energieholz. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei, Schwerin.
- BOHNENS, J. (1992): Bedeutung nordamerikanischer Pappelarten für Züchtung und Anbau in Mitteleuropa. In: 500 Jahre neuweltliche Kulturpflanzen in Europa (1492 - 1992), Vorträge für Pflanzenzüchtung, Heft 22 S. 279-290.
- BONNEMANN, A. (1978): Untersuchungen über Leistungen und Eigenschaften einiger Pappelarten und –sorten im Kurzumtrieb. Die Holzzucht, Nr. 1/2, 4-10.
- BUNDESAMT FÜR UMWELT BAFU (2008): Offroad-Datenbank, Schweiz. Internet: [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch).
- BUNDESAMT FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND LEBENSMITTELSICHERHEIT (HRSG.) (2008): Pflanzenschutzmittel-Verzeichnis Teil 1 2008, Ackerbau – Wiesen und Weiden – Hopfenbau – Nichtkulturland, Braunschweig, 56. Auflage.

- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMELV); BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2009): Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland, Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung. Berlin.
- BURG, J. VAN DEN (1985): Folia analysis for determination of tree nutrition saturation – a completion of literature datas, Nr. 1. Institute for Forestry and Urban Ecology, Wageningen.
- BURG, J. VAN DEN (1990): Folia analysis for determination of tree nutrition saturation – a completion of literature datas, Nr. 2. Institute for Forestry and Urban Ecology, Wageningen.
- BURGER, F. (2006): Zur Ökologie von Energiewäldern. In: Die Auswirkungen erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft. Schriftenreihe des Deutschen Rates für Landespflege Heft Nr. 79, 74-80.
- BURGER, F.; WEIßENBÖCK, J. (2006): Hackschnitzeltrocknung mit Kompostiervlies. energie pflanzen Nr. 1/2006, 26-27.
- BYSTRICKY, M.; BURGER, F. (2008): Zwischenbericht 2008 für das Projekt G 30 „Die Nutzung von landwirtschaftlichen Flächen als forst- und landwirtschaftliche Energieplantagen – ein Vergleich unter rechtlichen, technischen, ökonomischen und ökologischen Aspekten.“ Unveröffentlichter Zwischenbericht, Freising.
- BYSTRICKY, M. (2009): Die Nutzenkorbmethode als Ansatz zum Vergleich der Strom-, Wärme-, und Kraftstoffproduktion aus Energiepflanzen. Vortrag auf der Ökobilanz-Werkstatt 2009, 05. - 07. 10. Freising. Internet: [www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de/](http://www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de/) Recherchestand: 08.05.2010.
- BYSTRICKY, M.; WEBER-BLASCHKE, G. (2009): Die Nutzenkorbmethode als Ansatz zum Vergleich der Strom-, Wärme- und Kraftstoffproduktion aus Energiepflanzen. In: Tagungsband Ökobilanzwerkstatt 2009, 105-111.
- CREMER, T. (2008): Bereitstellung von Holzhackschnitzeln durch die Forstwirtschaft. Produktivitätsmodelle als Entscheidungsgrundlage über Verfahren und Aushaltungsvarianten, entwickelt auf der Basis einer Metaanalyse. Dissertation, Universität Freiburg.
- DE KLEIN, C.; NOVOA, R.; OGLE, S.; SMITH, K.; ROCHETTE, P.; WIRTH, C. (2006): IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Chapter 11: N<sub>2</sub>O emissions from managed soils, and CO<sub>2</sub> emissions from lime and urea application, 1-54.
- DÖHRER, K. (1995a): Praxiserfahrungen bei der Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen. In: Tagungsband zum Statusseminar Schnellwachsende Baumarten, Kassel, 67-68.
- DÖHRER, K. (1995b): Erntetechnik für Holzfelder. Die Holzzucht, 15-17.
- DREWES, D.; JACKE, H. (2005): Einsatzzeiten – Die Nutzung von selbstfahrenden Forstmaschinen (auch) in Deutschland. FTI Nr. 4, 47-49.

- DRUHAN, A.; MCDONNELL, K.; WARD, S. (2003): Life Cycle Analysis (LCA) of Biomass from Short Rotation Coppiced (SRC) Willow in Ireland – A Review. In: Fortechenvi BRNO May 2003, 61-68.
- DUBUISSON, X.; SINTZOFF, I. (1998): Energy and CO<sub>2</sub> Balances in different Power Generation Routes using Wood Fuel from Short Rotation Coppice. Biomass and Bioenergy Vol. 14, 379-390.
- DÜRRSTEIN, H.; LÖFFLER, H. (1988): Beerntung der Kurzumtriebsplantagen. Abschlußbericht zum Projekt „Abbachhof“, unveröffentlicht.
- EBERHARDINGER, A.; WARKOTSCH, W.; ZORMAIER, F.; SCHARDT, M.; HUBER, T.; ZIMMER, B. (2009): Prozessanalyse und Ökobilanzierung der Bereitstellung von Waldhackgut. Schlussbericht. Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München, Freising.
- EUROPÄISCHE UNION (2007): Strategy on climate change: the way ahead for 2020 and beyond. Internet:[http://europa.eu/legislation\\_summaries/energy/european\\_energy\\_policy/I28188\\_en.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/energy/european_energy_policy/I28188_en.htm). (Recherchestand 12.05.2010)
- EUROSTAT (2010): Bevölkerung am 1. Januar nach Alter und Geschlecht. Internet: [http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=demo\\_pjan&lang=de](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=demo_pjan&lang=de) (Recherchestand 21.06.2010)
- EVERS, JAN (2001): Stoffhaushalt und Waldbautechnik bei Erstaufforstungen ehemals landwirtschaftlich genutzter Flächen. Schriftenreihe der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten Nordrhein-Westfalen (Hrsg.).
- FELLER, S.; RIEDLBERGER, M. (2001): Hackschnitzelbereitstellung mit dem Timberchipper. Forst und Technik Nr. 4, 4-8.
- FENGEL, D.; WEGENER, G. (1984): Wood – Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Berlin: Walter de Gruyter and Co..
- FLAIG, H.; MOHR, H. (1996): Der überlastete Stickstoffkreislauf – Strategien einer Korrektur, Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Halle (Saale).
- FRIEDRICH, E. (1995): Produktionsbedingungen für die Bewirtschaftung schnellwachsender Baumarten im Stockausschlagsbetrieb in kurzen Umtriebszeiten auf landwirtschaftlichen Flächen. In: Tagungsband Statusseminar Schnellwachsende Baumarten, Kassel, 43-48.
- FRIEDRICH, E. (1999): Anbautechnische Untersuchungen in forstlichen Schnellwuchsplantagen und Demonstration des Leistungsvermögens schnellwachsender Baumarten. In: Modellvorhaben „Schnellwachsenden Baumarten“, Zusammenfassender Abschlussbericht, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 19-150.
- FRIEDRICH, E.; HOFMANN, M. (1994): Züchterische Maßnahmen zur Steigerung und Sicherung der Produktion und anbautechnische Untersuchungen zur Biomasseproduktion in forstlichen Schnellwuchsplantagen, Schlussbericht zum Forschungsvorh. 0319146B

- FRÖBA, N. (2009): Mündliche Mitteilung zur leistungsabhängigen Dieselbedarfskalkulation.
- FRÖBA, N.; FUNK, M. (2004): Teilzeitspezifische Dieselbedarfskalkulation bei landwirtschaftlichen Arbeiten. Landtechnik, Ausgabe 1, 38-39.
- FRÜHWALD, A.; SCHARAI-RAD, M.; HASCH, J.; WEGENER, G.; ZIMMER, B. (1997): Erstellung von Ökobilanzen für die Forst- und Holzwirtschaft. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (Hrsg.) München.
- FRÜHWALD, A.; WEGENER, G.; SCHARAI-RAD, M.; ZIMMER, B.; HASCH, J. (1996): Grundlagen für Ökopprofile und Ökobilanzen in der Forst- und Holzwirtschaft, Studie für den Forstabsatzfonds.
- GÄRTNER, S.; MÜNCH, J.; REINHARDT, G.; VOGT, R. (2008): Ökobilanzen. In: Nachhaltiger Biogasausbau, IFEU & Partner, 2-60.
- GROBE, W. (2009): Rückumwandlung der Kurzumtriebsplantage. In: SKODAWESSELY, C.; PRETZSCH, J. (HRSG.): Beratungshandbuch zu Kurzumtriebsplantagen, Entscheidungshilfen für die Etablierung von Kurzumtriebsplantagen in Deutschland, 59-61.
- GUINÉE, J. (2002): Handbook on Life Cycle Assessment, Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London.
- HALAMA, M. (2008): Mündliche Mitteilung, durchschnittliche Schlaggröße in Bayern nach Zentrale InVeKoS Datenbank.
- HANDLER, F.; BLUMAUER, E. (2008): Zeitstudien über Anbau-, Pflege- und Erntegeräte. Vortrag auf der Tagung der Landwirtschaftskammer Niederösterreich: Bewirtschaftung von Kurzumtriebsflächen, Holz vom Acker. St. Pölten, 12. Dezember 2008.
- HARTMANN, H.; STREHLER, A. (1995): Die Stellung der Biomasse im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern aus ökologischer, ökonomischer und technischer Sicht. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 3. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster.
- HARTMANN, H.; THUNEKE, K. (1997): Ernteverfahren für Kurzumtriebsplantagen – Maschinenprobung und Modellbetrachtungen. Landtechnik Bericht, Heft 29, Freising.
- HARTMANN, H.; BÖHM, T.; MAIER, L. (2000): Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Institut und Bayerische Landesanstalt für Landtechnik der TU München – Weihenstephan, Abschlussbericht.
- HELLEBRAND, H. J. (2008): Mitteilung per E-Mail.
- HELLER, M.; KEOLEIAN, G.; VOLK, T. (2003): Life Cycle Assessment of a Willow Bioenergy Cropping System. Biomass and Bioenergy, Vol. 25, 147-165.

- HIENDLMEIER, S. (2009): Betriebsdatenvergleich geförderter bayerischer Biomasse-Heizwerke – Auswertung. In: Konjunkturmotor Nachwachsende Rohstoffe, Tagungsband zum 17. C.A.R.M.E.N.-Symposium, 19-36.
- HOFMANN, M. (2004): Ergebnisse und Erfahrungen mit schnellwachsenden Baumarten. In: Energieholzproduktion in der Landwirtschaft, Potenzial, Anbau, Technologie, Ökologie und Ökonomie, Bornimer Agrartechnische Berichte, Potsdam-Bornim, Heft 35, 33-40.
- HOFMANN, M. (2005): Pappeln als nachwachsender Rohstoff auf Ackerstandorten – Kulturverfahren, Ökologie und Wachstum unter dem Aspekt der Sortenwahl. Dissertation. Schriftenreihe des Forschungsinstitutes für schnellwachsende Baumarten Hann. Münden, Band 8.
- HUBER, S. (2005): Numerische Modellierung und Simulation der räumlichen und zeitlichen Variabilität von Lachgasemissionen aus Agrarökosystemen. Dissertation, Hohenheim.
- JACKE, H. (1997): Zerkleinerungstechnik, Energie aus Waldholz – Energieholzserie Teil 5. Forst und Holz, Nr. 10, 40-45.
- JUG, A. (1998): Standortkundliche Untersuchungen auf Schnellwuchsplantagen unter besonderer Berücksichtigung des Stickstoffhaushalts, Dissertation LMU München, Hieronymus München.
- JUG, A. (1999): Ernährungs- und standortkundliche Untersuchungen. In: Modellvorhaben „Schnellwachsende Baumarten“, Zusammenfassender Abschlussbericht, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster 1999, 369-396.
- KALTSCHMITT, M.; REINHARDT, G. (1997): Nachwachsende Energieträger, Grundlagen, Verfahren, ökologische Bewertung, (Hrsg.), Vieweg Verlag.
- KAUTER, D.; LEWANDOWSKI, I.; CLAUPEIN, W. (2001): Pappeln in Kurzumtriebswirtschaft: Eigenschaften und Qualitätsmanagement bei der Festbrennstoffbereitstellung – ein Überblick. Pflanzenbauwissenschaften 5 (2), 64-74.
- KERN, J.; HELLEBRAND, H.; SCHOLZ, V.; BALASUS, A. (2009): Klimarelevanter Anbau von Energiepflanzen. In: Forschungsreport Nr. 1, 8-11.
- KLUGMANN, K. (2006): Laufzeiten und Kosten der Motorsäge in der Holzernte – Ergebnisse einer deutschlandweiten Praxisuntersuchung. KWF Bericht Nr. 39.
- KOELLNER, T.; SCHOLZ, R. W. (2007): Assessment of Land Use Impacts on the Natural Environment. Part 1: An Analytical Framework for Pure Land Occupation and Land Use Change. The International Journal of Life Cycle Assessment. Vol. 12, 16-23.
- KOELLNER, T.; SCHOLZ, R. W. (2008): Assessment of Land Use Impacts on the Natural Environment. Part 2: Generic Characterization Factors for Local Species Diversity in Central Europe. The International Journal of Life Cycle Assessment. Vol. 13, 32-48.

- KRAMER, H.; AKCA, A. (1995): Leitfaden zur Waldmeßlehre. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main.
- KROIHER, F.; BAUM, S.; BOLTE, A. (2010): Pflanzenvielfalt. In: DEUTSCHE BUNDESSTIFTUNG UMWELT, Hrsg. (2010): Kurzumtriebsplantagen, Handlungsempfehlungen zur naturverträglichen Produktion von Energieholz in der Landwirtschaft, Ergebnisse aus dem Projekt NOVALIS, 26-31.
- KTBL (2006): Energiepflanzen, Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus. KTBL-Datensammlung mit Internetangebot. Hrsg: Kuratorium für Technik in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) Darmstadt; Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) Potsdam.
- KTBL (2008): Betriebsplanung Landwirtschaft 2008/09 – Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. 21. Auflage.
- KWF-ONLINE (2009): Recherche der KWF-Prüfberichte unter [www.kwf-online.org/](http://www.kwf-online.org/) Internetrecherche Stand April 2009.
- LEUCHTWEIS, C. (2010): mündliche Mitteilung.
- LIESEBACH, M.; MULSOW, H.; ROSE, A.; MECKE, R. (1999): Ökologische Aspekte der Kurzumtriebswirtschaft. In: Modellvorhaben „Schnellwachsende Baumarten“. Zusammenfassender Abschlussbericht, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 455-476.
- LÖFFLER, H. (1988): Arbeitswissenschaft für Studierende der Forstwissenschaft. Leitfaden zu den Lehrveranstaltungen. Lehrstuhl für forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnik der Universität München, unveröffentlicht.
- LÖFFLER, H. (1989): Forstliche Verfahrenstechnik (Horzernte). Manuskript zu den Lehrveranstaltungen, unveröffentlicht.
- LWF (2003): Der Energieinhalt von Holz und seine Bewertung. Merkblatt der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft Nr. 12.
- MAKESCHIN, F. (1995): Auswirkungen der Kurzumtriebswirtschaft auf chemische Bodeneigenschaften und die Bodenfauna. In: Tagungsband Statusseminar Schnellwachsende Baumarten, Kassel, 11-14.
- MAKESCHIN, F.; REHFUESS, K.; RÜSCH, I. (1989): Standorts- und ernährungskundliche Untersuchungen zur Nutzung landwirtschaftlicher Flächen für die Erzeugung von Biomasse mit schnellwachsenden Baumarten. Schlussbericht zum BMFT-Projekt 03C-177-3.
- MEYER, M.; RUST, S.; KRABEL, D. (2006): Pappelzüchtung muss sich neu orientieren. Holz-Zentralblatt Nr. 7, 202-204.

- MILA I CANALS, L.; BAUER, C.; DEPESTELE, J.; DUBREUIL, A.; FREIERMUTH KNUCHEL, R.; GAILLARD, G.; MICHELSEN, O.; MÜLLER-WENK, R.; RYDGREN, B. (2007): Key Elements in a Framework for Land Use Impact Assessment Within LCA. The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 12, 5-15.
- MOSIER, A.; PARTON, W.; HUTCHINSON, P. (1983): Modelling nitrous oxide evolution from cropped and native soils, Ecological Bulletin 35, 229-241.
- MOURAD, A. L.; COLTRO, L.; OLIVEIRA, P.; KLETECKE, R. M.; BADDINI, J. P. (2007): A Simple Methodology for Elaborating the Life Cycle Inventory of Agricultural Products. The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 12, 408-413.
- NABU (2008): Energieholzproduktion in der Landwirtschaft – Chancen und Risiken aus Sicht des Natur- und Umweltschutzes, (Hrsg.), Berlin.
- NAGUS (NORMENAUSSCHUSS FÜR GRUNDLAGEN DES UMWELTSCHUTZES IM DIN) 2006a: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); deutsche und englische Fassung EN ISO 14040:2006. DIN Deutsches Institut für Normung e.V..
- NAGUS (NORMENAUSSCHUSS FÜR GRUNDLAGEN DES UMWELTSCHUTZES IM DIN) 2006b: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); deutsche und englische Fassung EN ISO 14044:2006. DIN Deutsches Institut für Normung e.V..
- NEBEL, B. (2002): Ökobilanzierung von Holzfußböden. Eine repräsentative Studie nach ISO 14040-43 für die deutsche Holzfußbodenindustrie, Dissertation TU München, Herbert Utz Verlag, München.
- NEBEL, B.; WEGENER, G.; ZIMMER, B. (2002): Ökobilanzierung Holzfußböden, Holzforschung München. Herbert Utz Verlag GmbH München.
- ÖNORM M 7113 (1998): Holzhackgut für energetische Zwecke, Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut.
- PE INTERNATIONAL (2007): GaBi 4 professional academy (Computer-Software). PE International, Stuttgart. Internet: [www.gabi-software.com](http://www.gabi-software.com).
- PELZMANN, G. (1992): Fallstudien zum Energieholzanbau in der Steiermark. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien.
- PRODAN, M. (1965): Holzmesslehre. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M..
- QUINKENSTEIN, A.; JOCHHEIM, H.; GRÜNEWALD, H.; SCHNEIDER, B. U.; HÜTTL, R. (2008): Modellierung des Kohlenstoffhaushalts einer Dendromasseplantage von Robinie und Pappel im Kurzumtrieb. In: Holzerzeugung in der Landwirtschaft, Tagungsband zur 3. Fachtagung „Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen“, Cottbus, 175-178.

- REFA (1991): Anleitung für forstliche Arbeitsstudien, Datenermittlung und Arbeitsgestaltung. 3. Auflage. Herausgeber: REFA-Fachausschuss Forstwirtschaft und Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik.
- REFA (2003): Ermittlung von Zeitdaten. Lehrunterlage zu Modul 3210247. Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung, Darmstadt.
- RÖDL, A. (2008): Ökobilanzierung der Holzproduktion im Kurzumtrieb. Arbeitsbericht Nr. 3 des Instituts für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft. Johann Heinrich von Thünen-Institut.
- RÖHLE, H.; HARTMANN, K.-U.; GEROLD, D.; STEINKE, C.; SCHRÖDER, J. (2006): Aufstellung von Biomassefunktionen für Kurzumtriebsbestände. Allgemeine Forst und Jagdzeitung, 10/11, 178-187.
- RÖHRICHT, C.; RUSCHER, K. (2004): Anbauempfehlungen für schnellwachsende Baumarten. Fachmaterial, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Leipzig.
- SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN (SRU) (2007): Klimaschutz durch Biomasse. Sondergutachten. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- SCHÄCHTELE, K.; HERTLE, H. (2007): Die CO<sub>2</sub> Bilanz des Bürgers, Recherche für ein internetbasiertes Tool zur Erstellung persönlicher CO<sub>2</sub> Bilanzen, Endbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 206 42 110, Umweltbundesamt.
- SCHILDBACH, M.; WOLF, H.; BÖHNISCH, B. (2009): 10 Jahre Pappelanbau zur Papierherstellung – eine Bilanz. AFZ-Der Wald, 526-528.
- SCHOLZ, V. (1997a): Aufwand und Ertrag an Energie bei der Produktion von nachwachsenden Rohstoffen. Arch. Acker-Pfl. Boden, 1997, Vol. 41, 75-89.
- SCHOLZ, V. (1997b): Methodik zur Ermittlung des Energieaufwandes pflanzenbaulicher Produkte am Beispiel von Biofestbrennstoffen. In: Agrartechnische Forschung Nr. 3, 11-18.
- SCHOLZ, V.; BOELCKE, B.; BURGER, F.; HOFMANN, M.; VETTER, A. (2007): Biomasse von sandigen Böden – Energieholzproduktion in der Landwirtschaft. Neue Landwirtschaft Nr. 4, 68-73.
- SCHOLZ, V.; BOELCKE, B.; BURGER, F.; HOFMANN, M.; HOHM, C.; LORBACHER, F.; VETTER, A. (2008): Produktion von Pappeln und Weiden auf landwirtschaftlichen Flächen. KTBL-Heft 79. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) Darmstadt.
- SCHOLZ, V.; ELLERBROCK, R. (2002): The growth productivity, and environmental impact of the cultivation of energy crops on sandy soil in Germany. Biomass and Bioenergy 23, 81-92.
- SCHOLZ, V.; HELLEBRAND, H. J.; HÖHN, A. (2004): Energiepflanzen im Vergleich, Teil I Ertrag und Umweltverträglichkeit. energie pflanzen Nr. 4, 13-16.

- SCHOLZ, V.; IDLER, C.; EGERT, J. (2006): Untersuchungen zu Schimmelpilzentwicklung und Energieverlusten bei der Lagerung von Feldholzhackschnitzeln. Holz-Zentralblatt 132, 804-806.
- SCHOLZ, V.; LORBACHER, F. R.; SPIKERMANN, H. (2009): Technologien der Ernte und Rodung von Kurzumtriebsplantagen. In: REEG et al. (Hrsg.): Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen, Wiley-VHC Verlag, Weinheim, 99-112.
- SCHOLZ, V.; KERN, J.; BALASUS, A. (2009): Umweltwirkungen der Feldholzproduktion. In: Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Tagungsband, TU Bergakademie Freiberg, 37-44,
- SCHULZ, U.; BRAUNER, O.; GRUB, H.; MANNHERZ, C. (2010): Zoodiversität. In: DEUTSCHE BUNDESSTIFTUNG UMWELT, (Hrsg): Kurzumtriebsplantagen, Handlungsempfehlungen zur naturverträglichen Produktion von Energieholz in der Landwirtschaft, Ergebnisse aus dem Projekt NOVALIS, 32-43.
- SCHWEINLE, J. (1996): Analyse und Bewertung der forstlichen Produktion als Grundlage für weiterführende forst- und holzwirtschaftliche Produktlinien-Analysen; Abschlussbericht zum Vorhaben F 94/1 der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, München.
- SCHWEINLE, J. (2000): Methoden zur Integration des Aspektes der Flächennutzung in der Ökobilanzierung. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg. Kommissionsverlag Max Wiedebusch, Hamburg.
- SCHWEINLE, J.; GROBE, W.; FRANKE, E. (2009): Betriebswirtschaft. In: SKODAWESSELY, C.; PRETZSCH, J. (HRSG.): Beratungshandbuch zu Kurzumtriebsplantagen, Entscheidungshilfen für die Etablierung von Kurzumtriebsplantagen in Deutschland, Tharandt, 65-73.
- SCHWEINLE, J.; THOROE, C. (1997): Zur Ökobilanzierung der Rohholzproduktion in Deutschland. Forst und Holz, 110-116.
- STAMPFER, E.; STAMPFER, K.; TRESNIEWSKI, A. (1997): Rationalisierung der Bereitstellung von Hackgut. Schriftenreihe der Forschung im Verbund, Band 29. Österreichische Elektrizitätswirtschafts-Aktiengesellschaft, Wien.
- STETTER, U.; MAKESCHIN, F. (1999): Humushaushalt ehemals landwirtschaftlich genutzter Böden nach Aufforstung mit schnellwachsenden Baumarten. In: Modellvorhaben "Schnellwachsende Baumarten". Landwirtschaftsverlag GmbH, 48165 Münster, 341-368.
- STMELF (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2009): Gesamtkonzept Nachwachsende Rohstoffe in Bayern – Entwicklungen und Trends 2009.

- STMWIVT (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie 2009): Energiebilanz Bayern. Internet:  
[http://stmwivt.bayern.de/pdf/energie-und-rohstoffe/energieversorgung/energiebilanz/Energiebilanz\\_gesamt.pdf](http://stmwivt.bayern.de/pdf/energie-und-rohstoffe/energieversorgung/energiebilanz/Energiebilanz_gesamt.pdf). (Recherchestand 12.05.2010)
- STOLL, B.; DOHRENBUSCH, A. (2010): Waldbau. In: DEUTSCHE BUNDESSTIFTUNG UMWELT, Hrsg. (2010): Kurzumtriebsplantagen, Handlungsempfehlungen zur naturverträglichen Produktion von Energieholz in der Landwirtschaft, Ergebnisse aus dem Projekt NOVALIS, 6-13.
- SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES (2007): ecoinvent v2.0, Datenbank (CD-ROM). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zürich, CH. Internet:  
[www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org).
- TEXTOR, B. (2003): Anbau, Bereitstellung und energetische Nutzung von Pappeln im Kurzumtrieb. Auszug aus dem Abschlussbericht der vollmechanisierten (2.) Beerntung 2001. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.
- TIEDEMANN, A. (2000): Ökobilanzen für graphische Papiere. Umweltbundesamt, Texte 22/00.
- UNSELD, R. (1999): Kurzumtriebsbewirtschaftung auf landwirtschaftlichen Grenzertragsböden, Biomasseproduktion und bodenökologische Auswirkungen verschiedener Baumarten, Dissertation Universität Freiburg, Shaker Verlag.
- WEGENER, G.; ZIMMER, B.; FRÜHWALD, A.; SCHARAI-RAD, M. (1997): Ökobilanzen Holz, Fakten lesen, Verstehen und Handeln. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. München.
- WENDLAND, M.; DIEPOLDER, M.; CAPRIEL, P. (2007): Leitfaden für die Düngung von Acker und Grünland. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising.
- WIENEKE, F. (1993): Mähhäcksler für Energieplantagen von Pappeln und Weiden. Landtechnik Nr. 48, 646-647.
- WIPPERMANN, H. J. (1999): Verfahrenstechnik zur Biomasse-Ernte auf Kurzumtriebsflächen. In: Modellvorhaben „Schnellwachsende Baumarten“ Zusammenfassender Abschluss-Bericht, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 314-340.
- WIPPERMANN, J.; STAMPFER, K. (1995a): Entwicklung von Erntemaschinen für Energieholz-Flächen, Teil 1. Holz-Zentralblatt Nr. 1, 6-8.
- WIPPERMANN, J.; STAMPFER, K. (1995b): Entwicklung von Erntemaschinen für Energieholz-Flächen, Teil 2. Holz-Zentralblatt Nr. 16, 274-276.
- WITTKOPF, S. (2005): Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern. Dissertation TU München. Forstliche Forschungsberichte München Nr. 200.

WITTKOPF, S.; HÖMER, U.; FELLER, S. (2003): Bereitstellungsverfahren für Waldhackschnitzel – Leistungen, Kosten, Rahmenbedingungen. Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Nr. 38.

ZIMMER, B. (2009): Ökobilanzierung der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. In: EBERHARDINGER, A.; WARKOTSCH, W.; ZORMAIER, F.; SCHARDT, M.; HUBER, T.; ZIMMER, B. (2009): Prozessanalyse und Ökobilanzierung der Bereitstellung von Waldhackgut. Schlussbericht, Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München, Freising, 104-141.

ZIMMER, B. (2010): Ökobilanz Waldhackschnitzel. LWF aktuell Nr. 74, 22-25.

ZIMMER, B.; WEGENER, G. (1996): Stoff- und Energieflüsse vom Forst zum Sägewerk. Holz, Roh- Werkst., 54, 217-223.

## 10.2 Abbildungen

Abbildung 1: Lage der Versuchsflächen in Bayern.....	3
Abbildung 2: Kurzumtriebsplantage Kammern Anfang Juni 1998.....	9
Abbildung 3: Kurzumtriebsplantage Kammern Mitte Juli 1998.....	9
Abbildung 4: Entwicklung der Durchschnittshöhe von Robinie, Roterle, der Aspensorten Ahle, Tapiau und Münden sowie von zwölf Klonen der Balsampappel, Versuchsfläche Wöllershof, 1. fünfjähriger Umtrieb, 1992 - 1996.....	16
Abbildung 5: Massenleistung von Robinie, Roterle, der Aspensorte Ahle, Tapiau und Münden sowie von zwölf Klonen der Balsampappel, Versuchsfläche Wöllershof, 1. fünfjähriger Umtrieb, 1992 - 1996.....	17
Abbildung 6: Entwicklung der Durchschnittshöhe von Roterle, der Aspensorten Ahle, Tapiau und Münden sowie von neun Balsampappelklonen, Versuchsfläche Wöllershof, 2. fünfjähriger Umtrieb 1998 - 2002.....	19
Abbildung 7: Massenleistung von Roterle, der Aspensorten Ahle, Tapiau und Münden sowie von neun Balsampappelklonen, Versuchsfläche Wöllershof, 2. fünfjähriger Umtrieb 1998 - 2002.....	20
Abbildung 8: Entwicklung der Durchschnittshöhe von Roterle, der Aspen Ahle, Tapiau und Münden sowie von neun Klonen der Balsampappel, Versuchsfläche Wöllershof, 3. fünfjähriger Umtrieb, 2003 - 2007.....	21
Abbildung 9: Massenleistung von Roterle, der Aspensorten Ahle, Tapiau und Münden sowie von neun Balsampappelklonen, Versuchsfläche Wöllershof, 3. fünfjähriger Umtrieb, 2003 - 2007 .....	22
Abbildung 10: Entwicklung der Durchschnittshöhe von Robinie, der Aspensorten Ahle und Münden sowie von acht Balsampappelklonen, Versuchsfläche Wöllershof, 1. zehnjähriger Umtrieb 1992 - 2001 .....	23
Abbildung 11: Massenleistung von Robinie, der Aspensorten Ahle und Münden sowie von acht Balsampappelklonen, Versuchsfläche Wöllershof, 1. zehnjähriger Umtrieb 1992 bis 2001 .....	24
Abbildung 12: Entwicklung der Durchschnittshöhe von Robinie, der Aspensorten Ahle, Tapiau und Münden sowie von drei Balsampappelklonen, Versuchsfläche Neuhof, 1. zehnjähriger Umtrieb 1993 - 2002 .....	26

Abbildung 13: Massenleistung von Robinie, der Aspensorten Ahle, Tapiau und Münden sowie von drei Balsampappelklonen, Versuchsfläche Neuhof, 1. zehnjähriger Umtrieb 1993 - 2002 .....	27
Abbildung 14: Entwicklung der Durchschnittshöhe von Roterle, der Aspensorte Astria, des Korbweidenklons 722/51 sowie von sieben Balsampappelklonen, Versuchsfläche Beuerberg, 1. fünfjähriger Umtrieb 1994 - 1998 .....	28
Abbildung 15: Massenleistung von Roterle, der Aspensorte Astria, des Korbweideklons 722/51 sowie von sieben Balsampappelklonen, Versuchsfläche Beuerberg, 1. fünfjähriger Umtrieb 1994 - 1998 .....	29
Abbildung 16: Entwicklung der Durchschnittshöhen der Aspensorte Astria sowie von fünf Balsampappelklonen, Versuchsfläche Beuerberg, 2. fünfjähriger Umtrieb 1999 - 2003 .....	30
Abbildung 17: Massenleistung der Aspensorte Astria sowie von fünf Balsampappelklonen, Versuchsfläche Beuerberg, 2. fünfjähriger Umtrieb 1999 - 2003 .....	31
Abbildung 18: Entwicklung der Durchschnittshöhen von zwei Klonen der Korbweide und fünf Balsampappelklonen, Versuchsfläche Schwarzenau, 1. fünfjähriger Umtrieb 1994 - 1998 .....	32
Abbildung 19: Entwicklung der Durchschnittshöhen von sechs Balsampappelklonen, Versuchsfläche Schwarzenau, 2. fünfjähriger Umtrieb, 2000 - 2004 .....	33
Abbildung 20: Massenleistung von sechs Balsampappelklonen, Versuchsfläche Schwarzenau, 2. fünfjähriger Umtrieb, 2000 - 2004 .....	34
Abbildung 21: Entwicklung der Durchschnittshöhen von Roterle, zwei Klonen der Korbweide sowie acht Balsampappelklonen, Versuchsfläche Coburg, 1. fünfjähriger Umtrieb 1995 - 1999 .....	35
Abbildung 22: Entwicklung der Durchschnittshöhen von Roterle, zwei Klonen der Korbweide sowie sechs Balsampappelklonen, Versuchsfläche Coburg, 2. fünfjähriger Umtrieb 2000 - 2004 .....	37
Abbildung 23: Massenleistung von Roterle, zwei Klonen der Korbweide und sechs Balsampappelklonen, Versuchsfläche Coburg, zweiter fünfjähriger Umtrieb, 2000 - 2004..	37
Abbildung 24: Entwicklung der Durchschnittshöhen von sieben Balsampappelklonen, Versuchsfläche Reisbach, 1. fünfjähriger Umtrieb 1997 - 2001 .....	39

Abbildung 25: Massenleistung von sieben Balsampappelklonen, Versuchsfläche Reisbach, 1. fünfjähriger Umtrieb 1997 - 2001 .....	39
Abbildung 26: Entwicklung der Durchschnittshöhen von vier Balsampappelklonen, Versuchsfläche Dornwang I, 1. fünfjähriger Umtrieb 1997 - 2001 .....	40
Abbildung 27: Massenleistung von vier Balsampappelklonen, Versuchsfläche Dornwang I, 1. fünfjähriger Umtrieb, 1997 - 2001 .....	41
Abbildung 28: Entwicklung der Durchschnittshöhen von sechs Balsampappelklonen, Versuchsfläche Dornwang II, 1. fünfjähriger Umtrieb 1997 - 2001 .....	42
Abbildung 29: Massenleistung von sechs Balsampappelklonen, Versuchsfläche Dornwang II, 1. fünfjähriger Umtrieb 1997 - 2001 .....	43
Abbildung 30: Entwicklung der Durchschnittshöhen von Max 4 und Beaupré, Versuchsfläche Kammern, 1. fünfjähriger Umtrieb 1998 - 2002 .....	44
Abbildung 31: Massenleistung der Balsampappelklone Max 4 und Beaupré, Versuchsfläche Kammern, 1. fünfjähriger Umtrieb 1998 - 2002 .....	44
Abbildung 32: Fäll-Bündel-Maschinen Fröbbesta (links) und ESM 901 (rechts) (Foto: SPINELLI, R.) .....	49
Abbildung 33: Mehrfach-Fällkopf Naarva-Grip 1500-40E an Bagger-Chassis .....	49
Abbildung 34: Claas Jaguar mit Weiden-Gebiss (links) (Foto: Spinelli), Austoft 7700 bei der Weidenernte (rechts) .....	50
Abbildung 35: Vorsatz der Firma Biomasse Europa (links), Vollernter der Firma Krone (rechts) .....	51
Abbildung 36: Motormanuelles Fällen und handbeschicktes Hacken .....	54
Abbildung 37: Motormanuelles Fällen, kranbeschickter Hacker .....	55
Abbildung 38: Motormanuelles Fällen, Vorkonzentrieren, kranbeschicktes Hacken .....	57
Abbildung 39: Fäller-Bündler bei der Fällung von Pappeln.....	58
Abbildung 40: Gehölmähhäcksler beim Hacken von Pappeln .....	61
Abbildung 41: Motormanuelles Fällen, Rücken, Hacken am zentralen Platz .....	62
Abbildung 42: Raupenharvester bei der Ernte von Pappeln .....	63

Abbildung 43: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „Motormanuelles Fällen“ .....	65
Abbildung 44: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „handbeschicktes Hacken“ .....	66
Abbildung 45: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „kranbeschicktes Hacken“ .....	67
Abbildung 46: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „Fällen und Vorkonzentrieren“ .....	68
Abbildung 47: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „Hacken vorkonzentriert“ .....	70
Abbildung 48: Ablaufabschnitte in prozentualen (Zeit-)Anteilen der Teilarbeit „Fällen mit dem Fäller-Bündler“ .....	71
Abbildung 49: Ernte mit dem Gehölmähhäcksler: Ablaufabschnitte in prozentualen Zeitanteilen .....	72
Abbildung 50: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „Motormanuelles Fällen“ .....	74
Abbildung 51: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit Rücken .....	75
Abbildung 52: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „Hacken 10-jähriger Umtrieb“ .....	76
Abbildung 53: Ablaufabschnitte in prozentualen Anteilen der Teilarbeit „Harvesterfällung“ .....	78
Abbildung 54: Darstellung der Module und Systemgrenzen der Ökobilanzierung von KUP.....	88
Abbildung 55: Nitratkonzentrationen im Sickerwasser der KUP-Versuchsfläche von Januar 1993 bis Dezember 1998.....	102
Abbildung 56: Nitratkonzentrationen im Sickerwasser des angrenzenden Ackers von Januar 1993 bis Dezember 1998.....	103
Abbildung 57: Energieinput pro Hektar und Jahr bei Anbau und Ernte von Kurzumtriebsplantagen differenziert nach sieben Erntelinien.....	106

Abbildung 58: Der Energieinput bei Anbau und Ernte von KUP im fünfjährigen Umtrieb, Ernte mit dem Gehölmähhäcksler, prozentual differenziert nach den Maßnahmen der Bewirtschaftung .....	106
Abbildung 59: Der Energieinput bei Anbau und Ernte von KUP im fünfjährigem Umtrieb, Ernte mit dem Fäller-Bündler, Rücken und Hacken, prozentual differenziert nach den Maßnahmen der Bewirtschaftung.....	107
Abbildung 60: Verhältnis Energie Input – Output bei der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien.....	108
Abbildung 61: Verhältnis Energie Input – Output bei der Bewirtschaftung von KUP im Vergleich zu der Produktion von Winterweizen für die thermische Verwertung (Werte von Winterweizen nach BIEDERMANN et al. 2010).....	108
Abbildung 62: Energie Output beim Anbau von KUP im Vergleich zu den landwirtschaftlichen Energiekulturen Winterraps und Silomais (Berechnung nach HARTMANN et al. 2000).....	109
Abbildung 63: Verhältnis Energie Input – Output bei der Bewirtschaftung von KUP und Ernte mit dem Fäller-Bündler differenziert nach unterschiedlichen Zuwachsleistungen.....	113
Abbildung 64: Treibhauspotenzial (GWP 100) bei der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien .....	116
Abbildung 65: Treibhauspotenzial von KUP: CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen bei der Bewirtschaftung von KUP (Output) im Vergleich zur im Holz gespeicherten Masse an CO <sub>2</sub> (Input).....	117
Abbildung 66: Treibhauspotenzial von KUP im Vergleich zu Winterraps, Zuckerrübe und Silomais: CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen beim Anbau (Daten für die landwirtschaftlichen Kulturen aus BYSTRICKY 2009).....	118
Abbildung 67: CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Bilanz des Anbaus von Kurzumtriebsplantagen am Beispiel der Ernte mit dem Gehölmähhäcksler (Darstellung in Anhalt an ZIMMER 2010).....	118
Abbildung 68: Eutrophierungspotenzial der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien: Phosphat-Äquivalent-Emissionen .....	120
Abbildung 69: Eutrophierungspotenzial KUP im Vergleich zu Winterraps, Zuckerrübe und Silomais: Phosphat-Äquivalent-Emissionen bei Anbau und Ernte (Daten für landwirtschaftliche Kulturen nach BYSTRICKY 2009).....	120

Abbildung 70: Abiotischer Ressourcenverbrauch der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien: Antimon-Äquivalent-Emissionen..... 121

Abbildung 71: Humantoxizitätspotenzial der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien: DCB-Äquivalent-Emissionen..... 122

Abbildung 72: Ozonabbaupotenzial der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien: R11-Äquivalent-Emissionen..... 123

Abbildung 73: Terrestrisches Ökotoxizitätspotenzial der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien: DCB-Äquivalent-Emissionen..... 124

Abbildung 74: Versauerungspotenzial der Bewirtschaftung von KUP differenziert nach sieben Erntelinien: SO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen..... 124

Abbildung 75: Gesamtenergie-Input von Anbau, Transport und Verwertung der pro Jahr und Hektar produzierten KUP-Hackschnitzel in einer 300 KW Hackschnitzelheizung differenziert nach sieben Erntelinien..... 128

Abbildung 76: Verhältnis von Energieinput zu Output bei Verbrennung der Hackschnitzel in einer 300 KW Anlage differenziert nach sieben Erntelinien .....128

Abbildung 77: Gesamtenergie-Input bei Anbau, Transport und Verwertung der pro Jahr und Hektar produzierten KUP-Hackschnitzel in einer 1,4 MW KWK-Anlage differenziert nach sieben Erntelinien..... 129

Abbildung 78: Wärme- und Strom-Output bei Verwertung der pro Jahr und Hektar produzierten KUP-Hackschnitzel in einer 1,4 MW KWK-Anlage differenziert nach sieben Erntelinien..... 130

Abbildung 79: Verhältnis von Gesamtenergie Input-Output bei Verwertung der pro Jahr und Hektar produzierten KUP-Hackschnitzel in einer KWK-Anlage differenziert nach sieben Erntelinien..... 130

**Fotonachweis:**

Abbildung 32 und Abbildung 34 links: Raffaele Spinelli, IVALSA, CNR

Abbildung 41 Mitte und rechts: Wilfried Sommer, LWF

Alle anderen Fotos: Frank Joachim Burger, LWF

### 10.3 Tabellen

Tabelle 1: Übersicht der Versuchsflächen nach Wuchsbezirken.....	4
Tabelle 2: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum der Stecklingskultur, Wöllershof, 1. fünfjähriger Umtrieb 1992 - 1996 .....	17
Tabelle 3: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum der gepflanzten Aspen, Roterlen und Robinien, Wöllershof, 1. fünfjähriger Umtrieb 1992 - 1996 .....	18
Tabelle 4: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum, Wöllershof, 2. fünfjähriger Umtrieb 1998 - 2002 .....	20
Tabelle 5: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum, Versuchsfläche Wöllershof, 3. fünfjähriger Umtrieb 2003 - 2007 .....	23
Tabelle 6: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum der Stecklingskultur, Versuchsfläche Wöllershof, 1. zehnjähriger Umtrieb 1992 - 2001 .....	25
Tabelle 7: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum der gepflanzten Aspen und Robinien, Versuchsfläche Wöllershof, 1. zehnjähriger Umtrieb 1992 - 2001 .....	25
Tabelle 8: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum, Beuerberg, 1. fünfjähriger Umtrieb 1994 - 1998 .....	29
Tabelle 9: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum, Beuerberg, 2. fünfjähriger Umtrieb 1999 - 2003 .....	31
Tabelle 10: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum, Schwarzenau, 1. fünfjähriger Umtrieb 1994 - 1998 .....	33
Tabelle 11: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum, Schwarzenau, 2. fünfjähriger Umtrieb 2000 - 2004 .....	34
Tabelle 12: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum von Korbweide und Balsampappel, Coburg, 1. fünfjähriger Umtrieb 1995 - 1999 .....	36
Tabelle 13: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum von Korbweide, Roterle und Balsampappel, Coburg, zweiter fünfjähriger Umtrieb, 2000 - 2004 .....	38
Tabelle 14: Signifikante Unterschiede im Höhenwachstum, Reisbach, 1. fünfjähriger Umtrieb 1997 - 2001 .....	40
Tabelle 15: Signifikante Wuchsunterschiede im Höhenwachstum, Dornwang I, 1. fünfjähriger Umtrieb 1997 - 2001 .....	41
Tabelle 16: Daten zur Arbeitsstudie „Motormanuelles Fällen – Hacken handbeschickt“ .....	52

Tabelle 17: Daten zur Arbeitsstudie „Motormanuelles Fällen – Hacken kranbeschickt“ .....	54
Tabelle 18: Daten zur Arbeitsstudie „Motormanuelles Fällen – Vorkonzentrieren – Hacken kranbeschickt“ .....	56
Tabelle 19: Daten zur Arbeitsstudie „Fäller-Bündler – Rücken – Hacken am zentralen Platz“ .....	57
Tabelle 20: Daten zur Arbeitsstudie „Gehölmähhäcksler“ .....	59
Tabelle 21: Daten zur Arbeitsstudie „Motormanuelles Fällen – Rücken – Hacken am zentralen Platz“ .....	61
Tabelle 22: Daten zur Arbeitsstudie „Harvesterfällung – Rücken – Hacken“ .....	63
Tabelle 23: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Motormanuelles Fällen“ .....	65
Tabelle 24: Leistungswerte der Teilarbeit „Motormanuelles Fällen“ .....	65
Tabelle 25: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Hacken handbeschickt“ .....	66
Tabelle 26: Leistungswerte der Teilarbeit „Hacken handbeschickt“ .....	66
Tabelle 27: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Hacken kranbeschickt“ .....	68
Tabelle 28: Leistungswerte der Teilarbeit „Hacken kranbeschickt“ .....	68
Tabelle 29: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Fällen und Vorkonzentrieren“ ...	69
Tabelle 30: Leistungswerte der Teilarbeit „Fällen und Vorkonzentrieren“ .....	69
Tabelle 31: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Hacken vorkonzentriert“ .....	70
Tabelle 32: Leistungswerte der Teilarbeit „Hacken vorkonzentriert“ .....	70
Tabelle 33: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Fällen mit dem Fäller-Bündler“ ..	71
Tabelle 34: Leistungswerte der Teilarbeit „Fällen mit dem Fäller-Bündler“ .....	72
Tabelle 35: Ernte mit dem Gehölmähhäcksler: Kennwerte zu den Zeitanteilen .....	73
Tabelle 36: Leistungswerte Gehölmähhäcksler (Tonnen Frischmasse pro Stunde RAZ/HN) .....	73
Tabelle 37: Leistungswerte Gehölmähhäcksler (pro Stunde GAZ) .....	73
Tabelle 38: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Motormanuelles Fällen“ .....	74

Tabelle 39: Leistungswerte der Teilarbeit „Motormanuelles Fällen“ .....	75
Tabelle 40: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Rücken“ .....	76
Tabelle 41: Leistungswerte der Teilarbeit „Rücken“ .....	76
Tabelle 42: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Hacken 10-jähriger Umtrieb“ ....	77
Tabelle 43: Leistungswerte der Teilarbeit „Hacken 10-jähriger Umtrieb“ .....	77
Tabelle 44: Kennwerte zu den Zeitanteilen der Teilarbeit „Harvesterfällung 10-jähriger Umtrieb“ .....	78
Tabelle 45: Leistungswerte der Teilarbeit „Harvesterfällung 10-jähriger Umtrieb“ .....	78
Tabelle 46: Technische Arbeitsproduktivität des Harvesters nach Baumarten bzw. Klonen ..	79
Tabelle 47: Systemleistungen der unterschiedlichen Erntelinien.....	81
Tabelle 48: Bei der technischen Produktion eingesetzte Maschinen inkl. Leistungsangaben, Verbrauch an Kraftstoff und Arbeitszeitbedarf pro ha bearbeiteter Fläche (Quellen: <sup>1</sup> )KTBL 2006, <sup>2</sup> ) Eigene Zeitstudien, <sup>3</sup> )HANDLER und BLUMAUER 2008) (zum Bezug auf die funktionelle Einheit von einem Hektar und Jahr müssen alle Verbrauchswerte, bis auf die Randpflege, durch die Nutzungsdauer der Plantage von 30 Jahren geteilt werden).....	90
Tabelle 49: Die eingesetzten Herbizide, Aufwandmengen und Wirkstoffe pro ha (Quellen: <sup>1</sup> ) (BUNDESAMT FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND LEBENSMITTELSICHERHEIT 2008)) (zum Bezug auf die funktionelle Einheit von einem Hektar und Jahr müssen die Wirkstoffmengen durch die Nutzungsdauer der Plantage von 30 Jahren geteilt werden).....	90
Tabelle 50: Übersicht der bei der Ernte eingesetzten Maschinen und ihres Kraftstoff-Verbrauchs bezogen auf die funktionelle Einheit von 1 ha und Jahr (Quelle: Eigene Zeitstudien).....	94
Tabelle 51: Bereiche einer ausreichenden Ernährung von Pappeln anhand der Blattspiegelwerte, nach VAN DEN BURG (1985 und 1990) und BERGMANN (1993) .....	98
Tabelle 52: Stickstoff-Blattspiegelwerte von vier Balsampappelklonen in den Jahren 2003 und 2008, Versuchsfläche Wöllershof, Oberpfalz.....	99
Tabelle 53: Phosphor-Blattspiegelwerte von vier Balsampappelklonen in den Jahren 2003 und 2008, Versuchsfläche Wöllershof, Oberpfalz.....	100
Tabelle 54: Kalium-Blattspiegelwerte von vier Balsampappelklonen in den Jahren 2003 und 2008, Versuchsfläche Wöllershof, Oberpfalz.....	101

Tabelle 55: Energieinput bei der Bewirtschaftung von KUP im Verhältnis zum Output ( $H_u$  von absolut trockenem Holz)..... 110

Tabelle 56: Energieinput der Ernte von KUP differenziert nach direkt eingesetzter Energie und Vorketten der sieben Erntelinien, angegeben in MJ/ha \* a und in % der erzeugten Energie ( $H_u$ )..... 111

Tabelle 57: Energieinput der Ernte von KUP differenziert nach den Teilarbeiten der sieben Erntelinien in MJ/ha \* a und in % der erzeugten Energie ( $H_u$ )..... 112

Tabelle 58: Indikatorergebnisse des Anbaus von 1 ha Kurzumtriebsplantage (Erntelinie: Gehölmähhäcksler) in Prozent der jährlichen Pro-Kopf-Emissionen in Deutschland..... 126

## 10.4 Abkürzungen

a	Jahr	H <sub>2</sub> O	Wasser
Ah-Horizont	Humoser Horizont im Oberboden	ha	Hektar
AZ	Allgemeine Zeit	HC	Kohlenwasserstoffe
BHD	Brusthöhendurchmesser	H <sub>U</sub>	Unterer Heizwert
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	ISO	International Organization for Standardization
Ca	Calcium	K	Kalium
CML	Centrum voor Milieukunde	KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
CO	Kohlenmonoxid	KUP	Kurzumtriebsplantage
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid	KW	Kilowatt
DCB	Dichlorbenzol	LCA	Life Cycle Assessment
DGZ	Durchschnittlicher Gesamtzuwachs	LWF	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
EZ	Erholungszeit	Mg	Magnesium
FM/ h	Frischmasse pro Stunde	MJ	Megajoule
GaBi	Software für Ganzheitliche Bilanzierung	MW	Megawatt
GAZ	Gesamte Arbeitszeit	KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
GWP	Global Warming Potential	N	Stickstoff
H <sub>0</sub> -Hypothese	Nullhypothese	N <sub>2</sub> O	Distickstoffmonoxid
		NH <sub>x</sub>	Stickstoff-Wasserstoff-Verbindungen

## Verzeichnisse

---

NO <sub>x</sub>	Stickoxide	TAP	Technische Arbeitsproduktivität
O <sub>2</sub>	Sauerstoff		
ODP	Ozone Depletion Potential	VP	Persönlich bedingte Verteilzeit
P	Phosphor	VS	Systembedingte Verteilzeit
PO <sub>4</sub> -Äquiv.	Phosphat-Äquivalente		
PSM-Spritze	Pflanzenschutzmittel- Spritze		
R 11	Charakterisierungsfaktor des Ozonabbaupotenzials		
RAZ	Reine Arbeitszeit		
RAZ/ HN	Reine Arbeitszeit pro Hauptnutzung		
REFA	Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung		
Sb-Äquiv.	Antimon-Äquivalente		
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid		
SRC	Short Rotation Coppice		
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen		
StMELF	Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten		
StMWIVT	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie		
t atro	Tonne Trockenmasse		

## 11 Anhang

### Schließende Statistik: Überprüfung der beiden zweiseitigen $H_0$ -Hypothesen

(Signifikanz-Werte kleiner 0,05 gelten als signifikant)

Abhängige Variable: Stickstoff

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Korrigiertes Modell	414,542 <sup>a</sup>	7	59,220	7,917	0,000
Konstanter Term	39983,981	1	39983,981	5345,476	0,000
Jahr	50,254	1	50,254	6,718	0,013
Klon	257,655	3	85,885	11,482	0,000
Jahr * Klon	97,481	3	32,494	4,344	0,009
Fehler	336,598	45	7,480		
Gesamt	41597,759	53			
Korrigierte Gesamtvariation	751,140	52			

Abhängige Variable: Phosphor

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Korrigiertes Modell	4,537 <sup>a</sup>	7	0,648	1,672	0,140
Konstanter Term	808,416	1	808,416	2085,411	0,000
Jahr	0,121	1	0,121	0,312	0,579
Klon	4,135	3	1,378	3,556	0,022
Jahr * Klon	0,288	3	0,096	0,248	0,863
Fehler	17,444	45	0,388		
Gesamt	843,164	53			
Korrigierte Gesamtvariation	21,981	52			

Abhängige Variable: Kalium

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Korrigiertes Modell	99,204 <sup>a</sup>	7	14,172	5,477	0,000
Konstanter Term	24370,239	1	24370,239	9417,530	0,000
Jahr	0,003	1	0,003	0,001	0,974
Klon	87,729	3	29,243	11,301	0,000
Jahr * Klon	11,527	3	3,842	1,485	0,231
Fehler	116,449	45	2,588		
Gesamt	24695,557	53			
Korrigierte Gesamtvariation	215,653	52			

# Anhang

## Auswertung der Zeitstudie des Gehölmähähäckslers, Versuchsfläche Kammern

Zyklus	Parzreihen	RAZ/HN		Sonstige RAZ		AZ	VS	Gesamterg.	Massen	TAP		0,06
		Mähähäckseln	Fahren	Sonst. Zeit	Fahren					(RAZ/HN) in t FM / h	(GAZ) in t FM / h	
1	118	7,37	2,2					9,57	1346,86	10,97	7,095	7,0947
2	119	6,18	2,55					8,73	1441,92	13,99	9,049	
3	120	7,27	2,03	0,5	2,87			12,67	2008,65	16,59	10,726	
4	201	4,93	2,12					7,05	557,12	6,78	4,382	
5	202	15,98	2,15			20,217		38,35	3095,54	11,62	7,515	
6	203	5,43	2,03					7,47	690,06	7,62	4,928	
7	204	13,15	2,08			2,3667		17,60	2973,1	13,57	8,773	
8	205	4,35	1,98					6,33	418,03	5,77	3,729	
9	206	10,4	1,93					12,33	2625,99	15,15	9,798	
10	207	6,3	3,00	0,2333333	3,1667			12,70	528,85	5,04	3,257	
11	208	21,6	1,97			9,15		32,73	2972,11	8,25	5,335	
12	209	5,68	2,43					8,12	731,85	7,73	5,00	
13	210	17,95	0,50	0,80	3,93			23,18	2469,61	8,25	5,34	
14	211	10,07	2,67		0,87			13,60	602,6	3,59	2,32	
15	212	14,13	2,48					16,62	2088,44	8,87	5,73	
16	213	6,08	2,35					8,43	647,44	6,39	4,13	
17	214	9,68	2,12					11,80	1706,43	10,57	6,84	
18	215	4,92	2,53					7,45	930,98	11,36	7,35	
19	216	7,48	2,23		3,55			13,27	1716,9	13,77	8,90	
20	217	4,05	2,13					6,18	481,67	7,14	4,62	
21	218	5,48	3,03		3,73			12,25	1302,05	14,25	9,21	
22	219	4,62	2,57					7,18	857,63	11,15	7,21	
23	220	6,73	2,25					8,98	1658,75	14,78	9,56	
24	301	7,77	2,42					10,18	2002,43	15,47	10,00	
25	302	6,48	2,65					9,13	1824,3	16,88	10,92	
26	303	6,30	2,25					8,55	2348,14	22,36	14,46	
27	304	9,57	2,28		7,48			19,33	2458,36	15,42	9,97	
28	305	7,88	2,62					10,50	2386,11	18,16	11,75	
29	306	8,05	2,37					10,42	1861,95	13,88	8,98	
30	307	9,45	2,30		2,35			14,10	2382,23	15,13	9,78	
31	308	10,63	3,10		7,68			21,42	2537,2	14,32	9,26	
32	309	9,10	2,70					11,80	2401,7	15,84	10,24	
33	310	7,90	2,30		2,02			12,22	1972,1	14,98	9,69	
34	311	6,65	2,22					8,87	1585,91	14,31	9,25	
35	312	8,70	3,22		2,52			14,43	1954,82	13,48	8,72	
36	313	6,62	2,62					9,23	1835,42	16,64	10,76	
37	314	7,67	2,35					10,02	1672,24	13,09	8,46	
38	315	11,63	2,88		2,98			17,50	2189,72	11,29	7,30	
39	316	17,92	3,10	0,52	12,33			33,87	2846,08	9,53	6,16	
40	401	5,25	2,25					7,50	1324,98	15,14	9,79	
41	402	4,77	1,78					6,55	1082,58	13,63	8,81	
42	403	4,77	1,70		4,48			6,47	1367,04	17,21	11,13	
43	404	4,63	1,63					6,27	741,03	9,60	6,21	
44	405	4,78	1,73					6,52	1189,11	14,92	9,65	
45	406	4,35	1,95					6,30	1107,74	15,28	9,88	
46	407	4,42	1,67					6,08	1447,1	19,66	12,71	
47	408	4,47	1,48		3,60			9,55	1159,99	15,58	10,08	
48	409	4,57	1,60					6,17	1135,7	14,92	9,65	
49	410	4,82	1,58					6,40	979,58	12,20	7,89	
50	411	4,93	1,83		6,52			13,28	936,12	11,39	7,36	
51	412	4,27	1,80					6,07	963,79	13,55	8,77	
52	413	4,82	1,33					6,15	1341,54	16,71	10,81	
53	414	4,65	2,52					7,17	853,66	11,01	7,12	
54	415	4,50	2,13					6,63	1064,03	14,19	9,18	
55	416	4,75	2,37					7,12	964,6	12,18	7,88	
56	417	4,52	4,23					8,75	1055	14,01	9,06	

Prozent Ges.	421,43	126,32	2,05	101,82	651,62
	0,65	0,19	0,31%	0,16	100,00%
		128,37		101,82	

Prozent RAZ	100%	30,46%	24,16%
		0,30	0,24
Zuschlagsfaktor			1,55

	TAP FM/RAZ in t FM/h	TAP TM/RAZ in t TM/h
Anzahl	56	
Mittelwert	12,77	5,24
Minima	3,59	1,47
Maxima	22,36	9,17
Standardabw.	3,79	

einfache Umrechnung in t  
atro  
geschätzter WG 59 %

Gesamtergebnis	421,43	126,3167	2,05	101,82	651,62
----------------	--------	----------	------	--------	--------

	TAP FM/RAZ in t FM/h	TAP TM/RAZ in t TM/h
Anzahl	56	
Mittelwert	12,77	5,24
Minima	3,59	1,47
Maxima	22,36	9,17
Standardabw.	3,79	

# Anhang

1000	0,41	TM in t atro	Zyklus	harvesting		blockage		manuever	
				min	min/odt	min	min/odt	min	min
	0,55	1	7,37	13,34			0	2,20	
	0,59	2	6,18	10,46			0	2,55	
	0,82	3	7,27	8,82	2,87		3,48	2,03	
	0,23	4	4,93	21,60			0	2,12	
	1,27	5	15,98	12,59	13,98		11,02	2,15	
	0,28	6	5,43	19,20			0	2,03	
	1,22	7	13,15	10,79	2,37		1,94	2,08	
	0,17	8	4,35	25,38			0	1,98	
	1,08	9	10,40	9,66			0	1,93	
	0,22	10	6,30	29,06	3,17		14,60	3,00	
	1,22	11	21,62	17,74	9,15		7,51	1,97	
	0,30	12	5,68	18,94			0	2,43	
	1,01	13	17,95	17,73	3,93		3,88	0,50	
	0,25	14	10,07	40,74	0,87		3,51	2,67	
	0,86	15	14,13	16,51			0	2,48	
	0,27	16	6,08	22,92			0	2,35	
	0,70	17	9,68	13,84			0	2,12	
	0,38	18	4,92	12,88			0	2,53	
	0,70	19	7,48	10,63	3,55		5,04	2,23	
	0,20	20	4,05	20,51			0	2,13	
	0,53	21	5,48	10,27	3,73		6,99	3,03	
	0,35	22	4,62	13,13			0	2,57	
	0,68	23	6,73	9,90			0	2,25	
	0,82	24	7,77	9,46			0	2,42	
	0,75	25	6,48	8,67			0	2,65	
	0,96	26	6,30	6,54			0	2,25	
	1,01	27	9,57	9,49	7,48		7,42	2,28	
	0,98	28	7,88	8,06			0	2,62	
	0,76	29	8,05	10,54			0	2,37	
	0,98	30	9,45	9,68	2,35		2,41	2,3	
	1,04	31	10,63	10,22	7,68		7,39	3,1	
	0,98	32	9,1	9,24			0	2,7	
	0,81	33	7,90	9,77	2,02		2,49	2,30	
	0,65	34	6,65	10,23			0,00	2,22	
	0,80	35	8,70	10,85			0,00	3,22	
	0,75	36	6,62	8,79			0,00	2,62	
	0,69	37	7,67	11,18			0,00	2,35	
	0,90	38	11,63	12,96	2,98		3,32	2,88	
	1,17	39	17,92	15,35	12,33		10,57	3,10	
	0,54	40	5,25	9,66			0,00	2,25	
	0,44	41	4,77	10,74			0,00	1,78	
	0,56	42	4,77	8,50			0,00	1,70	
	0,30	43	4,63	15,25			0,00	1,63	
	0,49	44	4,78	9,81			0,00	1,73	
	0,45	45	4,35	9,58			0,00	1,95	
	0,59	46	4,42	7,44			0,00	1,67	
	0,48	47	4,47	9,39	3,60		7,57	1,48	
	0,47	48	4,57	9,81			0,00	1,60	
	0,40	49	4,82	11,99			0,00	1,58	
	0,38	50	4,93	12,85			0,00	1,83	
	0,40	51	4,27	10,80			0,00	1,80	
	0,55	52	4,82	8,76			0,00	1,33	
	0,35	53	4,65	13,29			0,00	2,52	
	0,44	54	4,50	10,32			0,00	2,13	
	0,40	55	4,75	12,01			0,00	2,37	
	0,43	56	4,52	10,44			0,00	4,23	

TAP FM/GAZ in t FM/h	TAP TM/GAZ in t TM/h	Summe	421,43		82,07		126,32
		Mittelwert		13,01		1,77	
Anzahl	56						
Mittelwert	8,26	3,39					
Minima	2,32	0,95					
Maxima	14,46	5,93					
Standardabw.	2,45						
TAP FM/GAZ in t FM/h	TAP TM/GAZ in t TM/h						
Anzahl	56						
Mittelwert	8,26	3,39					
Minima	2,32	0,95					
Maxima	14,46	5,93					
Standardabw.	2,45						
	Anzahl	Minima	Maxima	Mittelwert	Standard- abweichung		
TAP FM/RAZ(HN) in t FM/h	56	3,59	22,36	12,77	3,79		
TAP FM/RAZ(HN) in t TM/h		1,47	9,17	5,24			
	Anzahl	Minima	Maxima	Mittelwert	Standard- abweichung		
TAP FM/GAZ in t FM/h	56	2,32	14,46	8,26	2,45		
TAP FM/GAZ in t TM/h		0,95	5,93	3,39			



## **Lebenslauf**

**Persönliches:** Frank Joachim Burger

Geboren 05.04.1962

Wohnhaft in Freising

Verheiratet, 2 Kinder

**Schulbildung:** Abitur in Kulmbach/Oberfranken 1981

Anschließend Wehrdienst als Zeitsoldat in Regensburg

**Studium:** Studium der Forstwissenschaft an der Ludwig-Maximilians-Universität München 1985 - 1990

Studium der Betriebswirtschaftslehre an der Verwaltungs- und Wirtschaftsakademie München 1997 - 2000

**Berufliches:** Referendariat bei der Bayerischen Staatsforstverwaltung 1990 - 1992

Seit Februar 1993 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft

