

# Nutzung kontaminierter Böden

Schriftenreihe, Heft 19/2011



# Anbau von Energiepflanzen für die nachhaltige, ressourcenschonende und klimaverträgliche Rohstoffabsicherung zur Erzeugung von Strom/Wärme und synthetischen Biokraftstoffen der zweiten Generation

<b>Projektleiter:</b>	Dr. habil. Christian Röhrich	11/2007-12/2009
	Dr. Michael Grunert	01/2010-10/2010
	Dr. Kerstin Jäkel	01/2010-10/2010
<b>Projektbearbeiter:</b>	Sophia Kiesewalter	11/2007-10/2008
	Anke Dietzsch	11/2008-03/2010

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Kalkdüngungsversuche</b> .....	<b>11</b>
2.1	Untersuchungen zur Kalkdüngungswirkung auf Grünland .....	11
2.1.1	Versuchsanlage und Methodik.....	11
2.1.2	Ergebnisse.....	12
2.2	Untersuchungen zur Kalkdüngungswirkung auf Ackerland .....	20
2.2.1	Versuchsanlage und Methodik.....	20
2.2.2	Ergebnisse.....	21
2.3	Ökonomische Bewertung.....	24
2.4	Fazit der Kalkdüngungsversuche.....	25
<b>3</b>	<b>Anbau von schnellwachsenden Baumarten</b> .....	<b>26</b>
3.1	Versuchsdurchführung und Methodik .....	26
3.1.1	Standortcharakteristik und Versuchsanlage.....	26
3.1.2	Methodik der Erfassung von Prüfmerkmalen, der pflanzensoziologischen Kartierung und faunistischen Aufnahmen .....	30
3.1.3	Methodik der Ernte und Ertragsbestimmung.....	31
3.2	Ergebnisse.....	35
3.2.1	Anwuchsrate und Wildverbiss .....	35
3.2.2	Wachstumsparameter .....	36
3.2.2.1	Wuchshöhe.....	36
3.2.2.2	Wurzelhalsdurchmesser (WHD).....	36
3.2.2.3	Brusthöhendurchmesser (BHD).....	37
3.2.2.4	Anzahl der Triebe/Baum .....	37
3.2.2.5	Erträge .....	38
3.2.3	Trocknung der Hackschnitzel.....	42
3.2.4	Qualität der Hackschnitzel .....	43
3.2.5	Nährstoff- und Schwermetallentzüge .....	44
3.2.6	Pflanzensoziologische Kartierung der Begleitflora .....	46
3.2.7	Faunistische Untersuchungen.....	50
3.3	Ökonomische Bewertung des Anbaus schnellwachsender Baumarten .....	53
3.4	Fazit KUP Krummenhennersdorf .....	55
<b>4</b>	<b>Untersuchungen zur energetischen Verwertung von belasteten Aufwüchsen</b> .....	<b>56</b>
4.1	Untersuchung in Feuerungsanlagen .....	56
4.1.1	Untersuchungen zur Staubabscheidung bei der thermischen Verwertung von Grünland-Biomassen .....	56
4.1.2	Untersuchungen zur thermischen Nutzung von Biomassen aus der Landschaftspflege (Grünland).....	59
4.1.3	Untersuchungen zu Stoffbilanzen bei der thermischen Verwertung von Hölzern aus Kurzumtriebsplantagen .....	59
4.1.4	Untersuchungen der Emissionscharakteristik und Stoffbilanzen bei der thermischen Verwertung von Kurzumtriebshölzern im LVG Köllitsch .....	62
4.1.5	Durchführung von Untersuchungen zur Vergasung verschiedener Brennstoffe in einer Praxis- Vergasungsanlage (BHKW) zur Strom-und Wärmeerzeugung im kleinen Leistungsbereich (10 kW).....	65
4.2	Testung der Brennstoffe zur Herstellung von BtL-Kraftstoffen.....	67
4.2.1	BtL-Kraftstoff aus Holzhackschnitzeln.....	67
4.2.2	Vergasung von Miscanthuspellets in der Zirkulierenden Wirbelschicht.....	67
4.3	Fazit Verwertungsversuche .....	68
<b>5</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>73</b>
6.1	Methoden der Analytik .....	73
6.2	Biomassefunktionen.....	74

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lageskizze der Versuchsflächen in der Region Freiberg (Luftbild: Landesvermessungsamt Sachsen 2005) .....	10
Abbildung 2:	Versuchsflächen der Kalkdüngungsversuche auf Grünland in Hilbersdorf (Luftbild: Landesvermessungsamt Sachsen 2005).....	12
Abbildung 3:	Anlage Prüflparzelle [Parzelle $\triangleq$ 1 m <sup>2</sup> ] .....	12
Abbildung 4:	Kalkdüngungsmengen und Entwicklung des pH-Wertes im Oberboden von Grünland (0 – 10 cm) im Versuchszeitraum .....	14
Abbildung 5:	Entwicklung der KW- und AN-löslichen Arsengehalte im Oberboden Grünland (0 – 10 cm) von April 2005 bis November 2009 .....	16
Abbildung 6:	Entwicklung der KW- und AN-löslichen Cadmiumgehalte im Oberboden Grünland (0 – 10 cm) von April 2005 bis November 2009.....	16
Abbildung 7:	Entwicklung der KW- und AN-löslichen Bleigehalte im Oberboden Grünland (0 – 10 cm) von April 2005 bis November 2009 .....	17
Abbildung 8:	Abhängigkeit der AN-löslichen Bodengehalte an Arsen, Cadmium und Blei vom pH-Wert .....	17
Abbildung 9:	Arsen- und Schwermetallgehalte im Grünschnitt vor und nach der Feldarbeit (2006).....	19
Abbildung 10:	Kalkdüngungsversuch Ackerland (Luftbild: Landesvermessungsamt Sachsen 2005).....	20
Abbildung 11:	Kalkdüngungsmengen und Entwicklung des pH-Wertes im Oberboden Ackerland (0 – 30 cm) im Zeitraum August 2005 bis November 2009.....	21
Abbildung 12:	Entwicklung der KW- und AN-löslichen Arsengehalte im Oberboden Ackerland (0 – 30 cm) von August 2005 bis November 2009 .....	22
Abbildung 13:	Entwicklung der KW- und AN-löslichen Cadmiumgehalte im Oberboden Ackerland (0 – 30 cm) von August 2005 bis November 2009.....	22
Abbildung 14:	Entwicklung der KW- und AN-löslichen Bleigehalte im Oberboden Ackerland (0 – 30 cm) von August 2005 bis November 2009 .....	22
Abbildung 15:	Abhängigkeit des pflanzenverfügbaren Anteils an Arsen, Cadmium und Blei (AN-Extrakt) im Boden Ackerland (0 – 30 cm) vom pH-Wert .....	23
Abbildung 16:	Witterungsdaten 2005 - 2009 im Vergleich zu den Mittelwerten der letzten 12 Jahre (1996 – 2009) der Klimastation Hilbersdorf (April 2007: NS 0,5 mm; Juli 2006: keine Angaben) .....	27
Abbildung 17:	Skizze des Doppelreihensystems.....	29
Abbildung 18:	Jaguar-Häcksler mit Schneidvorsatz .....	32
Abbildung 19:	Holzschneidwerk/Doppelreihensystem des Jaguar-Feldhäckslers der Firma Claas mit Schwachholzvorsatz HS-2 (Quelle: www.claas.de).....	32
Abbildung 20:	Schematische Darstellung des Häckslers sowie der Sägeblätter und Paddelwalze (Quelle: New Holland) .....	33
Abbildung 21:	Einzug zur Hacktrommel; Erntevorgang .....	33
Abbildung 22:	Pappelstock nach Ernte im Februar 2010.....	34
Abbildung 23:	Hackschnitzel mit hohem Eis- und Schneeanteil .....	34
Abbildung 24:	Reifenschäden auf einer KUP bei Zschadras, Folge zu enger Reihenabstände .....	34
Abbildung 25:	links: Wühlmäuse/Schermäuse 2005; rechts: Schäden durch Windbruch 2009.....	35
Abbildung 26:	Wuchshöhen der Pappel- und Weidenklone in den einzelnen Standjahren der KUP Krummenhennersdorf (R1 = 1. Rotation; R2 = 2. Rotation).....	36
Abbildung 27:	Vergleich geschätzter und tatsächlicher Ertrag des 1. Umtriebes (3 Jahre) der KUP Krummenhennersdorf .....	39
Abbildung 28:	Vergleich geschätzter und tatsächlicher Ertrag des 2. Umtriebes (3 Jahre) der KUP Krummenhennersdorf .....	39
Abbildung 29:	Durchschnittlicher Gesamtzuwachs (DGZ) der Pappel- und Weidenklone am Standort Krummenhennersdorf zur 1. Rotation (dreijähriger Umtrieb) und zur 2. Rotation (zweijähriger Umtrieb).....	40
Abbildung 30:	Entwicklung KUP Krummenhennersdorf 2005 – 2010.....	41

Abbildung 31:	Verlauf der Hackschnitzeltrocknung in der Biogasanlage Bieberstein, 2008 .....	42
Abbildung 32:	Trocknung der Hackschnitzel in der Trockenhalle der Biogasanlage Bieberstein, Hackgut z. T. stark mit Eis und Schnee durchsetzt.....	42
Abbildung 33:	Fraktionierung der Hackschnitzel zur Ernte der KUP Krummenhennersdorf 2010, Erntemaschine New Holland (TU Dresden).....	43
Abbildung 34:	Vergleich der Artenzahlen der Webspinnen ( <i>Araneae</i> ) am Versuchsstandort Krummenhennersdorf in den Jahren 2006 bis 2009 (AL HUSSEIN 2009).....	51
Abbildung 35:	Vergleich der Artenzahlen der Laufkäfer ( <i>Carabidae</i> ) am Versuchsstandort Krummenhennersdorf in den Jahren 2006 bis 2009 (AL HUSSEIN 2009).....	52
Abbildung 36:	Betriebsergebnisse bei verschiedenen Anbauszenarien (ECKHARDT 2010) .....	55
Abbildung 37:	Schwermetall- und Stoffbilanzen des Gesamtaustrages bei der Verbrennung von Heu- und Strohpellets.....	58
Abbildung 38:	Komplettbilanz der drei eingesetzten Brennstoffe .....	61
Abbildung 39:	Messergebnisse gasförmige Komponenten, Gesamtstaub im Biomassekessel des LVG Köllitsch, Bezug TA-Luft .....	63
Abbildung 40:	Schwermetall- und Stoffbilanzen der 3 eingesetzten Brennstoffe bezüglich des Anteils staubförmiger Emissionen und Anteile in der Kesselasche .....	64
Abbildung 41:	BHKW (<10 kW); Reuth.....	65
Abbildung 42:	Zirkulierende Wirbelschicht des CUTEC-Institutes .....	68

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	pH-Wert, Humusgehalt und Gehalte an Arsen, Blei und Cadmium im Oberboden der Grünlandflächen vor Versuchsbeginn (Entnahmetiefe 0 – 10 cm, April 2005).....	13
Tabelle 2:	Gehalte an Schwermetallen im Oberboden der Grünlandflächen vor Versuchsbeginn (Entnahmetiefe 0 – 10 cm, April 2005) im KW-Extrakt.....	13
Tabelle 3:	pH-Wert, Humus- und Schwermetallgehalte der einzelnen Versuchsjahre (Entnahmetiefe 0 – 10 cm).....	15
Tabelle 4:	Gehalte an Arsen, Cadmium und Blei im Oberboden (Entnahmetiefe 10 cm; KW- und AN-Extrakt) und in den Aufwüchsen (Grünschnitt) zu verschiedenen Schnittterminen.....	18
Tabelle 5:	pH-Wert, Humusgehalt und Gehalte an Arsen, Blei und Cadmium im Oberboden der Ackerfläche vor Versuchsbeginn (Entnahmetiefe 0 – 30 cm, April 2005) .....	21
Tabelle 6:	Gehalte an Schwermetallen im Oberboden der Ackerfläche vor Versuchsbeginn (Entnahmetiefe 0 – 30 cm, April 2005) im KW-Extrakt.....	21
Tabelle 7:	Gehalte an Kontaminanten in Winterroggen (2006) und Wintergerste (2009) .....	23
Tabelle 8:	Kosten des Kalkdüngungsversuches auf belastetem Ackerland in Hilbersdorf 2005 – 2009 (Erntegut: 2006 Winterroggen, 2009 Wintergerste) .....	24
Tabelle 9:	Kosten des Kalkdüngungsversuches auf belastetem Grünland in Hilbersdorf 2005 – 2009.....	25
Tabelle 10:	pH-Wert, Humus- u. Nährstoffgehalte im Boden, 1. Standjahr (2005), Krummenhennersdorf .....	27
Tabelle 11:	Arsen- und Schwermetallgehalte im Boden, 1. Standjahr (2005), Krummenhennersdorf.....	28
Tabelle 12:	Nährstoff- und Schwermetallgehalte im Boden (0 – 30 cm) aller Versuchsjahre 2005 – 2010, Krummenhennersdorf .....	28
Tabelle 13:	Pappel- und Weidensorten, Krummenhennersdorf.....	28
Tabelle 14:	Anbaufläche und Anzahl der Steckhölzer pro Sorte/Klon, Krummenhennersdorf.....	29
Tabelle 15:	Anbau- und Pflegemaßnahmen im 1. und 2. Standjahr auf der KUP Krummenhennersdorf .....	29
Tabelle 16:	Anwuchsrate, Wildverbiss und Ausfallraten am Ende des 1. Standjahres (2005), KUP Krummenhennersdorf .....	35
Tabelle 17:	Wurzelhalsdurchmesser in cm der Pappel- und Weidensorten der KUP Krummenhennersdorf (Mittelwerte), unterschiedliche Buchstaben = signifikante Unterschiede (Tukey, p = 0,05) .....	37
Tabelle 18:	Brusthöhendurchmesser in cm der Pappel- und Weidensorten der KUP Krummenhennersdorf (Mittelwerte), unterschiedliche Buchstaben = signifikante Unterschiede (Tukey, p = 0,05) .....	37
Tabelle 19:	Triebzahlen der verschiedenen Pappel- und Weidenklone der KUP Krummenhennersdorf, unterschiedliche Buchstaben = signifikante Unterschiede (Tukey, p = 0,05).....	38
Tabelle 20:	Anzahl der Triebe/ha zum Ende beider Rotationen der KUP Krummenhennersdorf .....	38
Tabelle 21:	Hackschnitzel- Klassifizierung nach Ö-Norm.....	43
Tabelle 22:	Klassifizierung der Wassergehalts-Klassen von Hackschnitzeln nach Ö-Norm.....	43
Tabelle 23:	Nährstoffgehalte in den Pappeln und Weiden der KUP Krummenhennersdorf .....	44
Tabelle 24:	Gehalte an Schwermetallen und Arsen in Pappeln und Weiden der KUP Krummenhennersdorf .....	45
Tabelle 25:	Entzüge der Nährelemente durch das Holz auf der KUP Krummenhennersdorf .....	45
Tabelle 26:	Entzüge von Arsen und Schwermetallen durch das Holz auf der KUP Krummenhennersdorf .....	46
Tabelle 27:	Bestandbildende Arten der Begleitflora auf der KUP Krummenhennersdorf.....	47
Tabelle 28:	Einteilung der Blütenpflanzen (Phanerogamen) in ökologische Gruppen – Untersuchungen der Kurzumtriebsplantage in Krummenhennersdorf .....	48
Tabelle 29:	Ökologische Gruppen – Untersuchungen der Kurzumtriebsplantage in Krummenhennersdorf.....	48
Tabelle 30:	Artenzusammensetzung nach ökologischen Zeigerwerten – Bonituren auf der Kurzumtriebsfläche (Pappel, Weide) am Standort Krummenhennersdorf .....	49
Tabelle 31:	Floristischer Vergleich der Erst- und Wiederholungsaufnahmen auf der Kurzumtriebsfläche (Pappel, Weide), am Standort Krummenhennersdorf, Anlagejahr 2005.....	49
Tabelle 32:	Anlagekosten einer KUP bei einer Pflanzzahl von 12.000 Stk./ha.....	53
Tabelle 33:	Gegenüberstellung der Bereitstellungskosten (inkl. MwSt.) für die Hackschnitzel aus den Ernten der KUP Krummenhennersdorf mit den zu erzielenden Erlösen .....	54

Tabelle 34:	Erforderlicher Holzerlös in €/t TM für einen wirtschaftlichen Kurzumtrieb.....	54
Tabelle 35:	Gegenüberstellung der Emissionsparameter von Heu- und Strohpellets zu verschiedenen Regelwerken.....	57
Tabelle 36:	Zusammenfassung der Messergebnisse/Durchschnitt der Viertel- bzw. Halbstundenmittelwerte des jeweiligen Beurteilungszeitraumes.....	59
Tabelle 37:	Ermittelte, mittlere Emissionskonzentrationen (ohne An- und Abfahrbetrieb) des Biomassekessels im LVG Köllitsch.....	62
Tabelle 38:	Bewertung Staubinhaltsstoffe nach TA-Luft [Versuchsmittelwerte] .....	64
Tabelle 39:	Inhaltsstoffe der verwendeten Brennstoffe im wasserfreien Zustand des Praxisversuchs im BHKW (10 kW), Reuth.....	66
Tabelle 40:	Zusammensetzung der Produktgase .....	66

## Abkürzungsverzeichnis

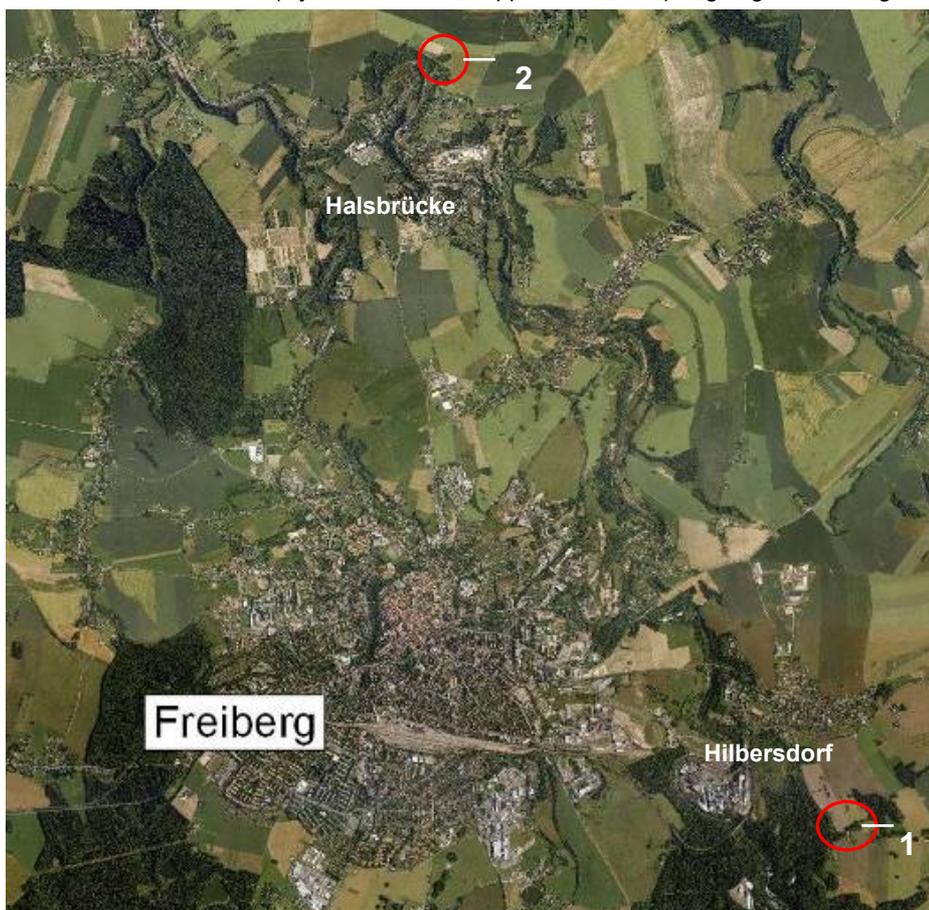
AL	Ackerland
AN-E.	Ammoniumnitrat-Extrakt
As	Arsen
atro	absolut trocken
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
BEFU	Sächsisches Düngungsprogramm zur Bestandesführung
BfUL	Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
BHD	Brusthöhendurchmesser
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BM	Biomasse
BtL	Biomass to Liquid
Cd	Cadmium
CH <sub>4</sub>	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
Cr	Chrom
DZ	Direktzahlung
DGZ	Durchschnittlicher Gesamtwuchs
FWL	Feuerungswärmeleistung
Ges.-C	Gesamt-Kohlenstoff
GL	Grünland
GW	Grenzwert
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
HCl	Salzsäure
Hg	Quecksilber
ILK	Institut für Luft- und Kältetechnik
K	Kelvin
KUP	Kurzumtriebsplantage
KW-E.	Königswasser-Extrakt
LF	Landwirtschaftliche Nutzfläche
LfL	Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
LfUG	Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LVG	Lehr- und Versuchsgut
MW	Maßnahmewert (BBodSchV)
n.b.	nicht beprobt
ND	Nutzungsdauer
Ni	Nickel
Nm <sup>3</sup>	Normkubikmeter (0°C, 1013 mbar)
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
Pb	Blei
PM	Particulate Matter (Feinstaub)
PW	Prüfwert (BBodSchV)
R	Rotation
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
Stck.	Stück
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
Tl	Tallium

TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
TU	Technische Universität
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
wf	wasserfrei
WHD	Wurzelhalsdurchmesser
WG	Wintergerste
WG 20	Wassergehalt < 20% (Klassifizierung für Holzhackschnitzel)
WRo	Winterroggen
Zn	Zink

# 1 Einleitung

Biomasse bildet im Klimaschutzprogramm der Bundesregierung Deutschlands eine wichtige Größe bei der Erfüllung des anspruchsvollen Ziels, den Anteil erneuerbarer Energiequellen an der Strom- und Wärmeerzeugung bis zum Jahr 2020 deutlich zu erhöhen. Der Anteil an Strom aus erneuerbarer Energie soll von derzeit 14,7 % auf 30 % steigen. Insbesondere soll die Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung vorangebracht werden. Hier ist eine Verdopplung auf 20 % vorgesehen. Ein weiteres Ziel besteht im Ausbau der Biomethanherzeugung. Über diesen Weg wird angestrebt, sechs Prozent des Erdgasverbrauchs zu ersetzen. Es ist weiter geplant, den noch schwachen Biowärmemarkt (Anteil 2007: 6,6 %) auf 14 % zu erhöhen. Ebenso ist man bestrebt, den Biokraftstoffanteil von 7,3 % (2007) auf 12 – 15 % zu steigern.

Nach landesweiten Auswertungen des LfULG finden sich bei Ableitung der Nutzung aus Feldblöcken auf etwa 100.000 ha landwirtschaftlich genutzter Fläche Anhaltspunkte für das flächenhafte Auftreten schädlicher Bodenveränderungen aufgrund erhöhter Konzentrationen an Arsen, Cadmium und Blei. Diese umfassen die Bergbau- und Hüttenregionen und die Auen der diese Gebiete entwässernden Fließgewässer (MÜLLER, 2010). Es besteht die dringende Notwendigkeit, Anbau- und Nutzungsalternativen für diese Flächen zu entwickeln, um eine wirtschaftlich und ökologisch tragfähige Landwirtschaft zu erhalten. Das vorliegende Projekt will hierzu einen Beitrag leisten, indem Biomasseaufwüchse von kontaminierten Böden mit Schwermetallen für die energetische Verwertung getestet werden. Das Projekt „Anbau von Energiepflanzen für die nachhaltige Rohstoffabsicherung zur Erzeugung von Strom/Wärme und Biokraftstoffen der 2. Generation“ greift die Problematik des vorangegangenen Verbundprojektes „Biomasseanbau und -verwertung als Energieträger/Humusstoff von Flächen mit unterschiedlichen Schwermetallbelastungsgrad und Grünlandgebieten“ auf und führt die begonnenen Kalkdüngungsversuche auf Grün- und Ackerland zur Reduktion des Schwermetalltransfers weiter. Ein weiterer Ansatz beinhaltet eine Nutzungsänderung kontaminierter Flächen durch den Anbau von Energiepflanzen. Im vorangegangenen Projekt wurde hierfür eine Kurzumtriebsplantage mit schnellwachsenden Baumarten (Hybridsorten der Pappel und Weide) angelegt. Abbildung 1 zeigt die Versuchsstandorte.



- 1 Kalkdüngungsversuche auf Grünland (2 ha) und Ackerland (4 ha)
- 2 Kurzumtriebsplantage mit Pappeln und Weiden (2 ha)

**Abbildung 1:** Lageskizze der Versuchsflächen in der Region Freiberg  
(Luftbild: Landesvermessungsamt Sachsen 2005)

Neben Anbaueignung und Biomasseleistung sollte die akkumulierende Wirkung der Baumarten auf belasteten Flächen geprüft werden. Die Eignung des geernteten Holzes für verschiedene energetische Verwertungslinien wurde getestet und dabei die Eintragspfade von Schwermetallen und Arsen erfasst. Neben diesen Abbrand- und Vergasungsversuchen wurde auch die Verwendung der verschiedenen Biomassen zur Herstellung von Synthesegas für die BtL-Kraftstoffherstellung getestet.

## 2 Kalkdüngungsversuche

Die Problematik der geogenen und anthropogenen Belastung der Böden mit Arsen- und Schwermetallen in den Erzbergbauregionen Sachsens sowie in den Flussauen der dort ablaufenden Flüsse ist bekannt. Es werden verschiedene Maßnahmen unternommen, mit diesen zum Teil geogenen Belastungen zu leben und eine produktive Landwirtschaft auf diesen Flächen zu erhalten mit der Maßgabe, dass die erzeugten Lebens- oder Futtermittel keine Gesundheitsgefährdung für Mensch und Tier darstellen. Dem tragen auch die gesetzlichen Rahmenbedingungen Rechnung, wie z. B. die Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV), die Verordnung zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln (VO EG Nr. 466/2001), die Richtlinie über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung (RL 2002/32/EG), welche unter anderem den Umgang mit kontaminierten landwirtschaftlichen Flächen sowie den erzeugten Lebens- und Futtermitteln regeln.

Eine große Bedeutung liegt in Bewirtschaftungsmaßnahmen, welche den Schwermetalltransfer Boden-Pflanze reduzieren bzw. die Verschmutzung des Erntegutes mit belasteten Bodenpartikeln und Staub minimieren. So kann z. B. durch eine gezielte Phosphordüngung am Anfang der Vegetationsperiode die Arsenaufnahme durch die Pflanze minimiert werden, da die Elemente Phosphor und Arsen bei der Aufnahme durch die Wurzeln konkurrieren (KLOSE 2003). Die Auswahl geeigneter Arten und Sorten für den Anbau auf kontaminierten Flächen ist ebenfalls eine wichtige Voraussetzung, um Belastungen im Ernteprodukt zu vermeiden. So weist z. B. Weizen ein höheres Cadmium-Aufnahmevermögen als Roggen oder Gerste auf. Auch zwischen verschiedenen Weizensorten konnte KLOSE (2003) in seinen Untersuchungen gravierende Unterschiede bei der Cadmiumaufnahme feststellen.

Ein großer Teil der Schwermetalle und des Arsens in Lebens- und Futtermitteln wird jedoch nicht systemisch über die Wurzeln der Pflanzen aufgenommen, sondern haftet als Verschmutzung mit Bodenpartikeln oder Staub am Erntegut. Auch hier kann man mit geeigneten Maßnahmen, wie z. B. Maschineneinstellungen (Schnitthöhe), Vermeidung von lückigen Beständen und Lager, diese Verschmutzungen minimieren (ELSÄßER & NUßBAUM 1993).

Die Verringerung der Mobilität und der Pflanzenverfügbarkeit von Schwermetallen (z. B. Cadmium, Zink, Blei) im Boden durch die Anhebung des Boden-pH-Wertes mittels Kalkdüngung ist wohl die bekannteste Maßnahme (MUNZERT & FRAHM 2006; KLOSE, 2003).

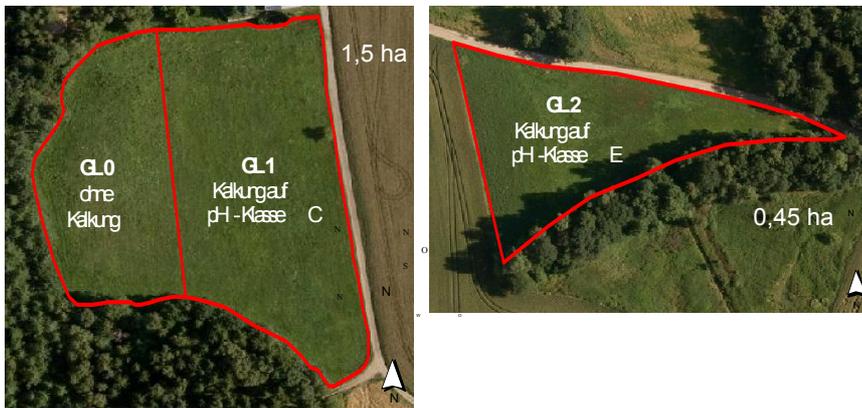
Im Rahmen von Datenerhebungen in Sachsen zur Praxisanwendung des Düngungsmodells „BEFU“ stellte man fest, dass 42 % der Böden eine niedrige bis sehr niedrige Kalkversorgung (pH-Klassen A und B) aufwiesen, während bei nur 47 % eine optimale (pH-Klasse C) und bei 11 % eine hohe bis sehr hohe Versorgung mit Kalk (pH-Klasse D und E) ermittelt werden konnte. Anhand der folgenden Untersuchungen sollte zum einen der Nachweis zur Wirkung der Kalkdüngung auf die Reduzierung des Schwermetalltransfers Boden-Pflanze erfolgen und zum anderen den Landwirtschaftsbetrieben und Flächenbewirtschaftern die Notwendigkeit der Kalkung gerade in schwermetallbelasteten Regionen aufgezeigt werden.

### 2.1 Untersuchungen zur Kalkdüngungswirkung auf Grünland

#### 2.1.1 Versuchsanlage und Methodik

Auf zwei Grünlandflächen in Hilbersdorf wurden folgende drei Prüfvarianten mit und ohne Kalkung angelegt (Abbildung 2):

- GL 0 ohne Kalkung
- GL 1 Kalkung auf pH-Klasse C (5,4 bis 6,0)
- GL 2 Kalkung auf pH-Klasse E ( $\geq 6,6$ )



**Abbildung 2: Versuchsflächen der Kalkdüngungsversuche auf Grünland in Hilbersdorf**  
(Luftbild: Landesvermessungsamt Sachsen 2005)

Zu Beginn des ersten Versuchsjahres 2005 lagen die pH-Werte im Oberboden der Grünlandflächen mit 4,7 bzw. 4,9 in der pH-Klasse B und stellten somit optimale Voraussetzungen für eine gute Kalkdüngungswirkung dar. Mit Ausnahme der Kalkung erfolgte die Bewirtschaftung der Flächen weiterhin durch den Landwirtschaftsbetrieb.

Im Frühjahr und Herbst wurden auf den jeweiligen Varianten Bodenproben bis zu einer Tiefe von 60 cm genommen, um den pH-Wert und die daraus resultierende Notwendigkeit einer Kalkung abschätzen zu können. Die Ermittlung der erforderlichen Kalkdüngungsmengen wurde auf Grundlage der VDLUFA-Richtwerte zur Kalkbedarfsermittlung durchgeführt (VDLUFA 2000). Auf jeder Kalkdüngungsvariante wurde eine Prüfparzelle mit vier Wiederholungen angelegt (Abbildung 3). Die Ausführung der Kalkung übernahmen private Unternehmen der Region.

1. Wiederholung		2. Wiederholung		3. Wiederholung		4. Wiederholung		
1. Termin <sup>1)</sup>	2. Termin <sup>2)</sup>							
A 1/1	A 1/2	B 1/1	B 1/2	C 1/1	C 1/2	D 1/1	D 1/2	1. Schnitt
A 2/1	A 2/2	B 2/1	B 2/2	C 2/1	C 2/2	D 2/1	D 2/2	2. Schnitt

<sup>1)</sup> Probenahmetermin zum Zeitpunkt der Ernte

<sup>2)</sup> Probenahme 2 bis 3 Wochen nach Ernte

**Abbildung 3: Anlage Prüfparzelle [Parzelle  $\triangleq$  1 m<sup>2</sup>]**

Zu den Schnittzeitpunkten erfolgte die Entnahme von jeweils 1 m<sup>2</sup> Pflanzenproben sowie von Bodenproben des Oberbodens bis zu einer Tiefe von 10 cm je Wiederholung. Bisher fand eine zwei- bis dreimalige Schnittnutzung pro Jahr statt. Der jeweils erste Schnitt des Jahres diente der Silagegewinnung und der zweite Schnitt zur Heubereitung. Die chemischen Analysen des Bodens und der Aufwüchse erfolgten durch die Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL). Die Methoden sind in Anhang 1 aufgeführt. Im Jahr 2007 fanden aufgrund einer Unterbrechung des Projektes keine Beprobungen statt.

### 2.1.2 Ergebnisse

Tabelle 1 und 2 zeigen die Ausgangswerte der pH-Werte, Humusgehalte und die Gehalte an Arsen und Schwermetallen im Oberboden (0 – 10 cm) der Varianten zu Beginn des Versuches im Jahr 2005. Neben der Analyse von Arsen und Schwermetallen im Königswasser-Extrakt (KW-Extrakt) erfolgte auch eine Analyse des ammoniumnitratlöslichen Anteils (AN-Extrakt) von Arsen, Blei und Cadmium. Die Gehalte im AN-Extrakt stellen den mobilen pflanzenaufnahme-fähigen Anteil dar.

Die Ausgangswerte der Flächen zeigen, dass diese sich in den Gehalten der einzelnen Elemente zum Teil sehr stark unterscheiden.

**Tabelle 1: pH-Wert, Humusgehalt und Gehalte an Arsen, Blei und Cadmium im Oberboden der Grünlandflächen vor Versuchsbeginn (Entnahmetiefe 0 – 10 cm, April 2005)**

Variante	pH	Humus %	mg/kg im KW-Extrakt			mg/kg im AN-Extrakt		
			As	Pb	Cd	As	Pb	Cd
GL0	4,7	7,8	168	649	4,7	0,13	2,06	0,54
GL1	4,7	6,4	252	1573	4,8	0,14	9,42	0,77
GL2	4,9	11,3	4621	5239	8,3	0,87	6,90	0,83
Maßnahmewerte BBodSchV			50	1200	20,0			

**Tabelle 2: Gehalte an Schwermetallen im Oberboden der Grünlandflächen vor Versuchsbeginn (Entnahmetiefe 0 – 10 cm, April 2005) im KW-Extrakt**

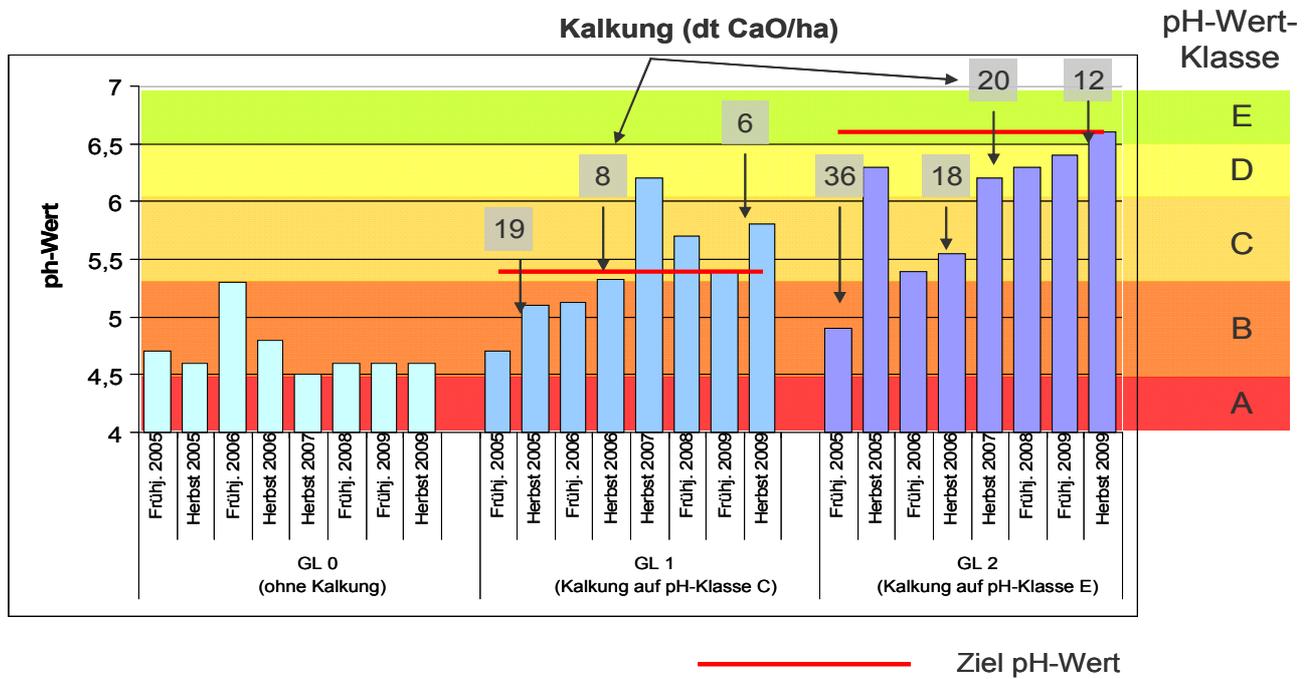
Variante	Cu	Ni	Hg	Tl	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
GL0	54	32	0,3	0,7	534
GL1	56	31	0,3	0,7	447
GL2	289	23	0,4	0,8	655
Maßnahmewerte BBodSchV	1300 <sup>1</sup>	1900	2	15	--

<sup>1</sup>bei Schafweide 200 mg/kg

Die Gehalte an Arsen lagen bei allen drei Varianten über dem Maßnahmewert der BBodSchV. Auf der Fläche GL 2 betrug der Arsengehalt im Oberboden im Jahr 2005 das 100-fache des Maßnahmewertes. Ähnlich verhält es sich beim Bleigehalt, auch hier wurde der Maßnahmewert in den Varianten GL 1 und GL 2 deutlich überschritten. Die zweite Grünlandfläche mit der Kalkdüngungsvariante GL 2 ist durch eine höhere Bodenbelastung mit Arsen, Cadmium, Blei und Kupfer gekennzeichnet als die Fläche der Varianten GL 0 und GL 1. Es wird vermutet, dass es sich bei der Fläche um eine alte Deponie handelt.

Die erste Kalkung wurde im April 2005 mit kohlensauren Kalkammonsalpeter durchgeführt. Mit dem Ziel einer stärkeren Anhebung des pH-Wertes erfolgten nach dem zweiten Schnitt 2005 und im Frühjahr 2006 sowie im August 2007 weitere Kalkgaben mit Branntkalk. 2008 wurden die Flächen nicht gekalkt. Die letzte Kalkung fand im August 2009 statt. Abbildung 4 zeigt die Kalkdüngungsgaben der Versuchsvarianten und die Entwicklung des pH-Wertes im Versuchszeitraum.

Bei der Kalkdüngungsvariante GL 1 konnte die angestrebte pH-Wert-Klasse C bereits im Jahr 2006 erreicht werden. Der pH-Wert der Variante GL 1 wurde von 4,7 auf 5,6 angehoben. Der pH-Wert der Variante GL 2 stieg von 4,9 auf 6,6. Erst im Jahr 2009 wurde der Ziel-pH-Wert der Variante GL 2 erreicht. Dieser Zustand kann jedoch nur durch jährliche Erhaltungskalkungen gesichert werden.



**Abbildung 4: Kalkdüngungsmengen und Entwicklung des pH-Wertes im Oberboden von Grünland (0 – 10 cm) im Versuchszeitraum**

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht, wie sich die pH-Werte, die Humusgehalte sowie die Schwermetallkonzentrationen in den fünf Versuchsjahren geändert haben. Erwartungsgemäß hatte der pH-Wert keinen Einfluss auf die im KW-Extrakt ermittelten Werte, also den Gesamtgehalt der Schwermetalle im Boden. Für Arsen, Cadmium und Blei wurden neben dem KW-Extrakt noch der pflanzenverfügbare AN-Extrakt ermittelt.

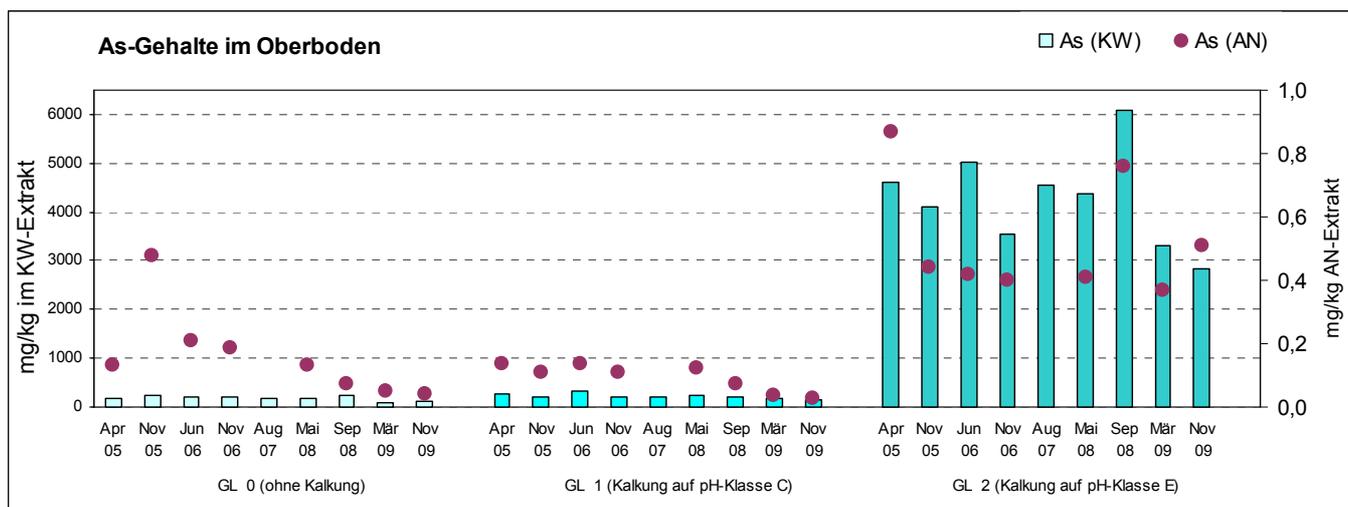
**Tabelle 3: pH-Wert, Humus- und Schwermetallgehalte der einzelnen Versuchsjahre (Entnahmetiefe 0 – 10 cm)**

Kennwert	Einheit	Variante	Versuchsjahr				
			2005	2006	2007	2008	2009
pH - Wert		GL 0	4,6	5,0	4,5	4,6	4,6
		GL 1	4,9	5,4	6,2	5,6	5,4
		GL 2	5,5	5,7	6,2	6,6	5,4
Humus	%	GL 0	6,2	6,2	8,8	8,8	7,4
		GL 1	6,0	6,5	8,5	8,1	6,5
		GL 2	6,2	8,0	8,6	10,7	7,8
As (KW-E.)	mg/kg	GL 0	241	721	190	198	204
		GL 1	207	224	198	203	259
		GL 2	4815	4911	4560	5441	7663
Pb (KW-E.)	mg/kg	GL 0	1057	2344	815	959	762
		GL 1	1118	1038	922	913	756
		GL 2	4978	5821	5060	5048	5913
Cd (KW-E.)	mg/kg	GL 0	3,61	5,58	4,06	3,65	3,69
		GL 1	3,67	3,64	4,30	4,10	3,43
		GL 2	5,60	9,55	8,86	9,24	7,32
As (AN-E.)	mg/kg	GL 0	0,36	0,29	n.b.	0,09	0,09
		GL 1	0,13	0,11	n.b.	0,09	0,11
		GL 2	0,50	0,36	n.b.	1,12	0,89
Pb (AN-E.)	mg/kg	GL 0	10,26	5,10	n.b.	7,15	7,82
		GL 1	5,34	0,69	n.b.	1,77	1,35
		GL 2	15,85	2,50	n.b.	0,20	0,16
Cd (AN-E.)	mg/kg	GL 0	0,76	0,54	n.b.	0,63	0,72
		GL 1	0,49	0,13	n.b.	0,20	0,19
		GL 2	0,65	0,27	n.b.	0,06	0,04
Cu (KW-E.)	mg/kg	GL 0	51	173,7	45,3	40,8	38,3
		GL 1	57,1	56,6	50,6	44,8	39,1
		GL 2	223,0	311	252,0	254,9	360,8
Ni (KW-E.)	mg/kg	GL 0	32,4	30,1	21,7	20,1	22,9
		GL 1	28,9	25,5	21,2	20,1	21,3
		GL 2	24,6	19,7	13,5	12,2	15,4
Hg (KW-E.)	mg/kg	GL 0	0,34	0,40	0,37	0,35	0,31
		GL 1	0,27	0,30	0,28	0,26	0,27
		GL 2	0,39	0,40	0,44	0,39	0,43
Tl (KW-E.)	mg/kg	GL 0	0,66	0,70	0,70	0,59	0,54
		GL 1	0,68	0,68	0,68	0,61	0,64
		GL 2	0,75	0,81	0,78	0,83	0,78
Zn (KW-E.)	mg/kg	GL 0	466	554	402	386	358
		GL 1	439	437	429	420	360
		GL 2	566	878	782	787	963

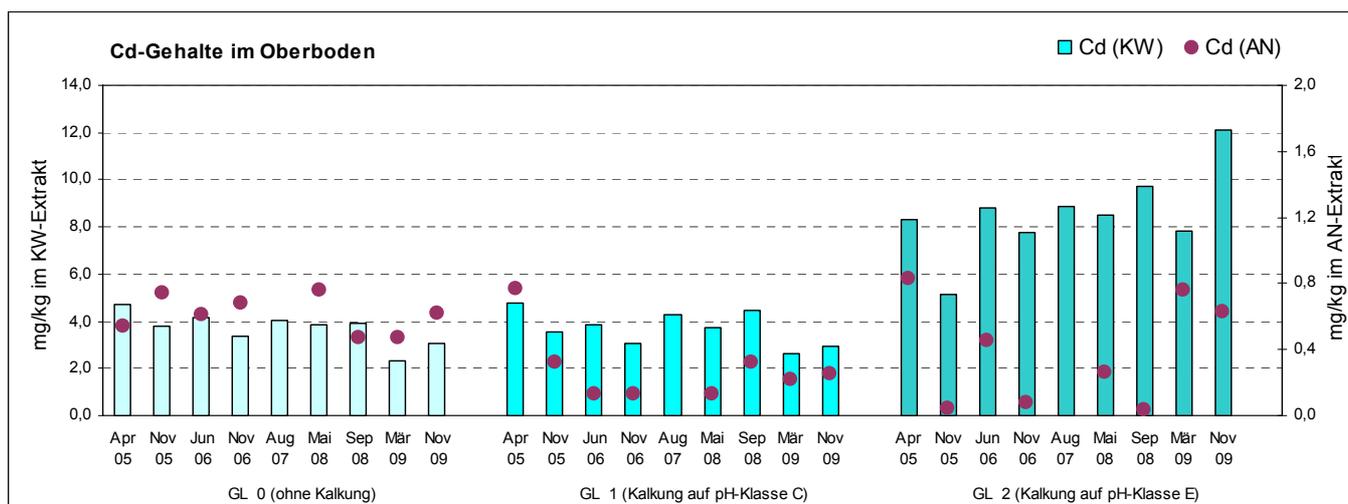
In den Abbildungen 5 bis 7 ist der Zusammenhang zwischen Gesamt- und pflanzenverfügbaren Gehalten an Arsen, Cadmium und Blei im Oberboden (0 – 10 cm) über den Versuchszeitraum dargestellt.

Die Gesamtgehalte an Arsen und Blei (KW-Extrakt) blieben über die Versuchsdauer relativ konstant, während der pflanzenverfügbare Anteil (AN-Extrakt) vor allem beim Blei bei den Varianten mit Kalkdüngung (GL 1 und GL 2) abnahm. Trotz starker Schwankungen bei den Gesamt-Cadmiumgehalten der Variante GL 2 zeigte sich bei den drei Varianten ein ähnliches Bild. Ten-

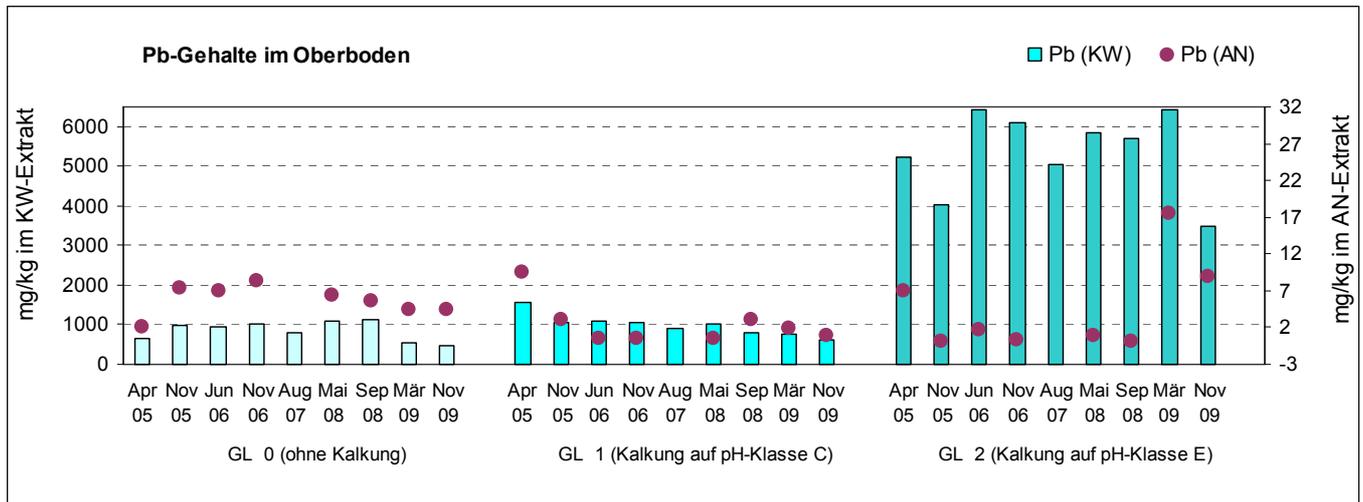
denziell sank auch hier bei den Flächen mit Kalkung der pflanzenverfügbare Anteil im Versuchszeitraum. Die Schwankungen bei den pflanzenverfügbaren Gehalten innerhalb der drei Versuchsvarianten sind nicht so hoch wie die Schwankungen des KW-Extraktes. Der Anteil des Arsens im KW-Extrakt der Fläche GL 2 ist ca. 20-mal so groß wie der in den Flächen GL 1 und GL 0. Hingegen hat sich der Anteil des pflanzenverfügbaren Arsens nur verdoppelt. Trotz der höheren Gehalte an Blei und Cadmium im Boden der Fläche GL 2 ist keine wesentliche Erhöhung des AN-Anteils zu verzeichnen.



**Abbildung 5: Entwicklung der KW- und AN-löslichen Arsengehalte im Oberboden Grünland (0 – 10 cm) von April 2005 bis November 2009**



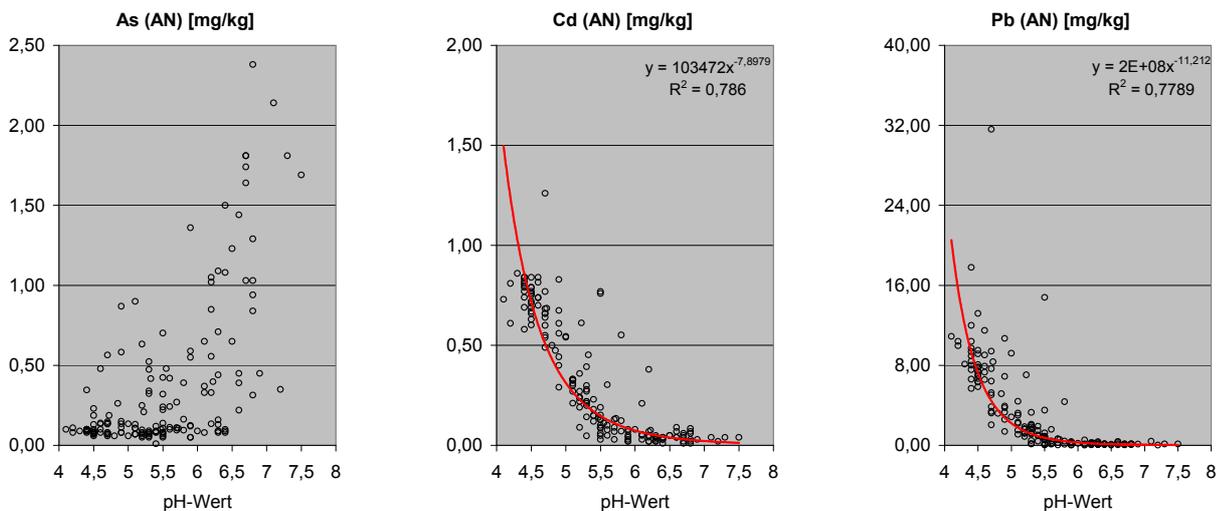
**Abbildung 6: Entwicklung der KW- und AN-löslichen Cadmiumgehalte im Oberboden Grünland (0 – 10 cm) von April 2005 bis November 2009**



**Abbildung 7: Entwicklung der KW- und AN-löslichen Bleigehalte im Oberboden Grünland (0 – 10 cm) von April 2005 bis November 2009**

Es konnte ein Zusammenhang zwischen dem pH-Wert und der Konzentration an pflanzenverfügbarem Cadmium und Blei im Oberboden nachgewiesen werden.

Der pflanzenverfügbare Anteil an Cadmium und Blei nahm durch die Kalkdüngung und der daraus folgenden pH-Wert-Erhö-  
 hung im Oberboden ab. Verdeutlicht wird dies durch die in Abbildung 8 dargestellten Regressionsanalysen, die zeigen, dass mit  
 steigendem pH-Wert der pflanzenverfügbare Anteil an Cadmium und Blei im Boden abnimmt. Für die Arsengehalte konnte  
 diese Abhängigkeit nicht beobachtet werden.



**Abbildung 8: Abhängigkeit der AN-löslichen Bodengehalte an Arsen, Cadmium und Blei vom pH-Wert**

Nachfolgend stellte sich die Frage, ob sich ein unterschiedlicher Gesamtgehalt und insbesondere eine geänderte Pflanzenver-  
 fügbarkeit auch in den Konzentrationen der Aufwüchse widerspiegelt. In Tabelle 4 sind der pH-Wert, die Gesamtgehalte und der  
 pflanzenverfügbare Anteil an Arsen, Cadmium und Blei im Oberboden (0 – 10 cm) sowie die Gehalte an Arsen, Cadmium und  
 Blei in den Aufwüchsen der Versuchsjahre zusammengestellt.

Wie bereits oben dargestellt, lagen die Gesamtgehalte an Arsen, Cadmium und Blei bei der Variante GL 2 zu allen Prüfterminen  
 über denen der Varianten GL 0 und GL 1. Im Mittel wurden im Oberboden (0 – 10 cm) der ersten Versuchsfläche (GL 0 und  
 GL 1) ca. 200 mg As/kg, 4 mg Cd/kg und 1.000 mg Pb/kg erfasst. Die zweite Versuchsfläche (GL 2) wies mit 5.370 mg As/kg,  
 9 mg Cd/kg und 5.476 mg Pb/kg wesentlich höhere Werte auf. Die Gehalte an Arsen und an Blei lagen somit deutlich über dem  
 Maßnahmewert der BBodSchV. Die Ergebnisse der Gehaltsbestimmungen in den Aufwüchsen (Tabelle 4) zeigen jedoch, dass

kein Zusammenhang zwischen den Gesamtgehalten (Vergleich GL0/GL1 mit GL 2) im Boden und in den Pflanzen nachgewiesen werden konnte. Dies bestätigen auch frühere Untersuchungen von KLOSE (2003) sowie KLOSE & RANK (2006), wonach von der Gesamtbelastung im Boden nicht auf die Belastung in den Aufwüchsen geschlossen werden kann.

**Tabelle 4: Gehalte an Arsen, Cadmium und Blei im Oberboden (Entnahmetiefe 10 cm; KW- und AN-Extrakt) und in den Aufwüchsen (Grünschnitt) zu verschiedenen Schnittterminen**

Variante	Termin	pH - Wert	Arsengehalt [mg/kg TM]			Cadmiumgehalt [mg/kg TM]			Bleigehalt [mg/kg TM]		
			Boden		Pflanze	Boden		Pflanze	Boden		Pflanze
			KW - E.	AN - E.		KW - E.	AN - E.		KW - E.	AN - E.	
GL 0 ohne Kalkung	1. Schnitt, Apr. 05	4,7	168	0,10	0,30	4,7	0,50	2,30	649	2,10	2,90
	2. Schnitt, Aug. 05	4,5	232	0,20	1,00	3,4	0,80	0,90	1141	13,20	5,40
	1. Schnitt, Jun.06	5,2	214	0,20	0,40	4,1	0,60	0,50	950	7,10	4,90
	2. Schnitt, Aug. 06	4,9	184	0,30	1,10	4,0	0,50	1,20	897	5,20	6,10
	1.Schnitt, Mai 08	4,5	181	0,13	2,92	3,9	0,76	0,92	1100	6,33	8,91
	2. Schnitt, Jul.08	4,3	161	0,09	1,09	3,3	0,75	0,66	900	9,22	4,85
	3. Schnitt, Sept. 08	5,3	250	0,05	0,91	3,9	0,19	0,92	1375	2,72	5,85
	1.Schnitt, Jun.09	4,7	200	0,11	0,37	4,0	0,76	0,63	712	8,06	2,29
	2.Schnitt, Jul. 09	4,6	200	0,07	1,18	3,3	0,65	1,39	664	6,45	5,11
	3.Schnitt, Sept. 09	4,4	208	0,09	0,91	3,9	0,84	0,97	733	10,37	6,53
GL 1 Kalkung auf pH-Klasse C	1. Schnitt, Apr. 05	4,7	252	0,10	0,30	4,8	0,80	2,40	1573	9,40	5,90
	2. Schnitt, Aug. 05	4,7	215	0,20	1,00	3,8	0,70	1,20	1177	7,70	8,30
	1. Schnitt, Jun.06	5,5	318	0,10	0,10	3,8	0,10	1,30	1093	0,60	3,60
	2. Schnitt, Aug. 06	5,5	202	0,10	0,80	3,4	0,10	1,10	924	0,90	4,20
	1.Schnitt, Mai 08	5,3	238	0,07	3,61	3,9	0,28	0,68	1338	3,70	12,05
	2. Schnitt, Jul. 08	5,6	199	0,10	0,75	3,5	0,11	0,43	1280	0,66	5,41
	3. Schnitt, Sept. 08	4,6	192	0,08	0,76	4,2	0,59	0,61	764	5,73	8,09
	1.Schnitt, Jun. 09	5,3	224	0,08	0,27	3,5	0,24	0,49	669	1,56	1,98
	2.Schnitt, Jul. 09	5,2	239	0,07	6,66	3,1	0,24	0,91	791	1,79	26,32
	3. Schnitt, Sept. 09	6,2	202	0,09	1,25	3,5	0,04	0,71	668	0,11	6,68
GL 2 Kalkung auf pH-Klasse E	1. Schnitt, Apr. 05	4,9	4621	0,90	0,60	8,3	0,80	0,70	5239	6,90	3,70
	2. Schnitt, Aug. 05	4,7	5512	0,60	2,50	6,1	1,30	1,00	5936	31,60	10,10
	1. Schnitt, Jun.06	5,3	5033	0,40	0,10	8,8	0,50	0,90	6420	1,80	4,00
	2. Schnitt, Aug. 06	5,6	7245	0,50	1,20	15,8	0,10	0,50	6320	0,20	3,70
	1.Schnitt, Mai 08	6,7	2232	0,58	5,68	7,9	0,07	0,44	3190	0,24	12,61
	2. Schnitt, Jul. 08	6,6	2289	0,45	1,06	10,5	0,14	0,85	3433	0,24	5,57
	3. Schnitt, Sept. 08	6,7	5392	0,60	2,16	10,2	0,04	0,64	5068	0,12	5,13
	1.Schnitt, Jun. 09	6,0	935	0,76	1,68	7,1	0,06	0,28	5678	0,33	3,42
	2.Schnitt, Jul. 09	6,1	11515	0,80	10,22	6,7	0,04	0,43	7258	0,10	12,84
	3.Schnitt, Sept. 09	6,6	8928	1,63	4,64	8,5	0,07	0,35	6215	0,22	8,71
Maßnahmewert BBodSchV			50			20			1200		
Futtermittelgrenzwert						2			1		
									40		

rot = Überschreitung des Maßnahme- oder Grenzwertes

Die sehr hohen **Arsengehalte** im Oberboden (0 – 10 cm) spiegelten sich nicht in entsprechenden Gehalten der Aufwüchse wider. Nur bei der besonders belasteten Fläche GL 2 traten vermehrt Arsengehalte über 2 mg/kg Trockenmasse auf. Diese Aufwüchse dürften somit nicht mehr als Futtermittel eingesetzt werden. Der 2. Schnitt war bei allen drei Varianten meist höher mit Arsen belastet als der 1. Schnitt. Ähnliches beobachtete auch KLOSE (2003) in seinen Untersuchungen.

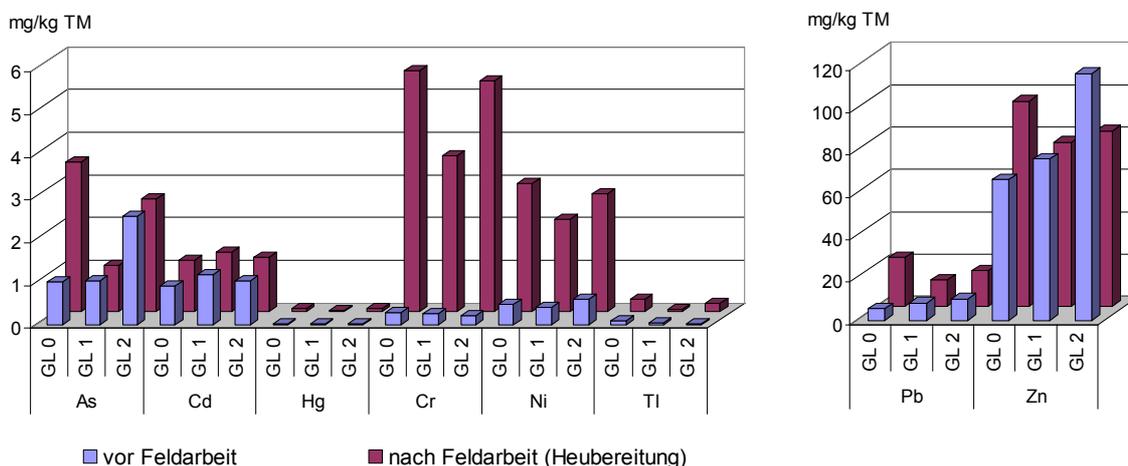
Die Gesamtgehalte an **Cadmium** im Oberboden (0 – 10 cm) lagen bei allen drei Versuchsvarianten stets unter dem Maßnahmewert der BBodSchV von 20 mg/kg. Jedoch wurden bei einzelnen Pflanzenproben Überschreitungen des Futtermittel-

grenzwertes festgestellt (Tabelle 4). Bei einem Cadmiumgehalt von 3,29 mg/kg (KW-Extrakt) im Oberboden erfolgte bereits eine Überschreitung des Futtermittelgrenzwertes.

Die Ergebnisse des fünfjährigen Versuchszeitraumes lassen tendenziell mit der Erhöhung des pH-Wertes eine Abnahme des mobilen Cadmiumanteils im Boden erkennen. Während die Cadmiumgehalte im Grünschnitt in den Anfangsjahren über den Grenzwerten der BBodSchV lagen, wurden nach der Kalkdüngung in den Jahren 2008 und 2009 Werte im Normbereich ermittelt. In Untersuchungen von KLOSE (2003) wurde ähnlich wie bei Arsen eine unterschiedlich hohe Cadmiumbelastung in den Aufwüchsen der zwei Schnitte festgestellt. Dies konnte in den eigenen Untersuchungen nur teilweise bestätigt werden.

Der Versuchsstandort Hilbersdorf wies neben Arsen eine besonders hohe Bodenbelastung mit **Blei** auf. Die Bleigehalte im Boden der Fläche GL 2 betragen das Fünffache des Maßnahmewertes der BBodSchV, jedoch konnte keine Überschreitung des Futtermittelgrenzwertes von 40 mg Pb/kg TM im Versuchszeitraum erfasst werden. Insgesamt geht von der Bleibelastung des Bodens im Untersuchungsgebiet kaum eine Gefahr der Kontamination des Grünlandaufwuchses aus. Nach den Ergebnissen von KLOSE (2003) stammen bei den Gehalten im Grünschnitt 30 – 40 % des Arsens, > 95 % des Cadmiums und 80 % des Bleis aus der systemischen Aufnahme durch die Wurzeln der Pflanzen. Dies unterstreicht die Bedeutung bodenchemischer Maßnahmen (Kalkung).

In Abbildung 9 sind die Arsen- und Schwermetallgehalte im Grünschnitt vor und nach der konventionellen Feldarbeit (Mähen, Wenden, Schwaden, Ballenpressen) dargestellt. Hier zeigt sich eine deutliche Erhöhung der Gehalte aller aufgeführten Elemente auf Grund der Verschmutzung mit Bodenpartikeln und Staub nach Durchführung der herkömmlichen Feldarbeiten.



**Abbildung 9: Arsen- und Schwermetallgehalte im Grünschnitt vor und nach der Feldarbeit (2006)**

Im Mittel der Kalkdüngungsvarianten konnte folgender prozentualer Anteil der Verschmutzung am jeweiligen Gesamtgehalt in der Trockenmasse der Grünlandaufwüchse ermittelt werden:

Arsen	27 %
Cadmium	20 %
Blei	50 %
Quecksilber	58 %
Chrom	95 %
Nickel	82 %
Thalium	68 %

Eine Reduzierung der Verschmutzung des Erntegutes durch die Feldarbeit ist nur begrenzt möglich. Auf belasteten Flächen sollten jedoch alle möglichen Maßnahmen zur Minderung der Verschmutzung des Futters ergriffen werden, wie z. B. Einstellung der Schnitthöhe auf 5 – 7 cm, Vermeidung lückiger Bestände, zügiges Anwelken mit hoher Schlagkraft, Überfahren des Futters (Silo) nur mit sauberen Schlepperreifen usw. (ELSÄßER & NUßBAUM, 1993).

## 2.2 Untersuchungen zur Kalkdüngungswirkung auf Ackerland

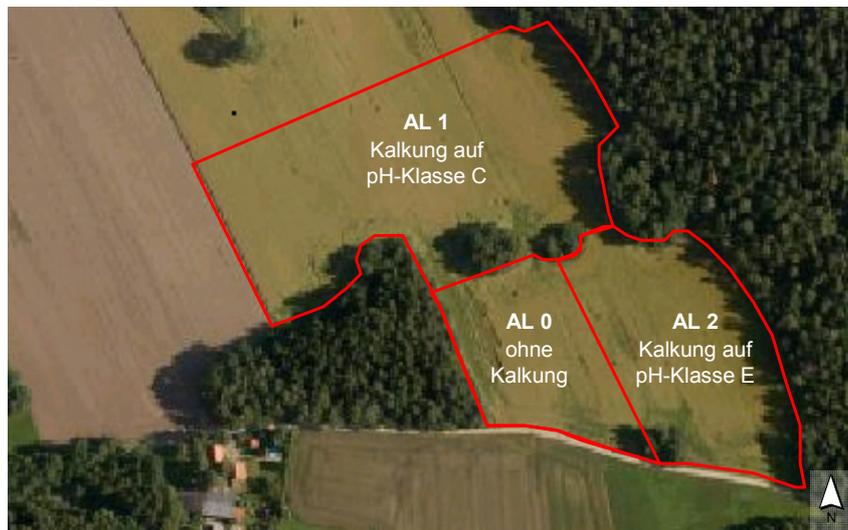
### 2.2.1 Versuchsanlage und Methodik

Neben den Kalkdüngungsversuchen auf Grünland erfolgte im Herbst 2005 die Anlage eines Kalkdüngungsversuches auf einem 7 ha großen Ackerschlag (Abbildung 10). Durch eine gezielte Anhebung des pH-Wertes (Kalkung) in der Ackerkrume sollte der Schwermetalltransfer in die Pflanze verringert werden. Der Versuch umfasst die nachfolgenden Prüfvarianten:

AL 0: ohne Kalkung

AL 1: Kalkung auf pH-Klasse C

AL 2: Kalkung auf die pH-Klasse E



**Abbildung 10: Kalkdüngungsversuch Ackerland**  
(Luftbild: Landesvermessungsamt Sachsen 2005)

Der mittlere pH-Wert im Oberboden (0 – 30 cm) der Ackerfläche lag mit 5,5 in der pH-Klasse B. Die Ermittlung der erforderlichen Kalkdüngungsmengen für die einzelnen Varianten erfolgte nach VDLUFA-Richtwerten (VDLUFA 2000). Die Kalkung wurde in den Jahren 2005, 2007 und 2009 mit Branntkalk durchgeführt. Um die pH-Werte und die Verfügbarkeit der Schwermetalle zu überwachen, wurden jährlich im Frühjahr und Herbst Bodenproben bis 90 cm Tiefe entnommen.

Eine Untersuchung der angebauten Fruchtarten hinsichtlich des Schwermetalltransfers Boden-Pflanze erfolgte 2006 bei Winterroggen und 2009 bei Wintergerste. Zum Zeitpunkt der Milchreife und des Druschs wurden Boden- und Pflanzenproben von je vier Wiederholungen pro Versuchsvariante entnommen. Die Analyse der Proben erfolgte durch das BfUL nach den in Anhang 1 aufgeführten Methoden.

## 2.2.2 Ergebnisse

Die Teilflächen des Ackerlandes wiesen eine unterschiedliche Belastung mit Arsen, Cadmium und Blei auf (Tabelle 5 und Tabelle 6). Dabei wurden teilweise die nach BBodSchV geltenden Prüf- bzw. Maßnahmewerte überschritten.

**Tabelle 5: pH-Wert, Humusgehalt und Gehalte an Arsen, Blei und Cadmium im Oberboden der Ackerfläche vor Versuchsbeginn (Entnahmetiefe 0 – 30 cm, April 2005)**

Variante	pH	Humus %	As	Pb	Cd	As	Pb	Cd
			mg/kg im KW-Extrakt			mg/kg im AN-Extrakt		
AL 0	5,5	3,4	1543	2960	4,9	0,321	1,300	0,285
AL 1	5,7	4,2	1382	3064	6,2	0,168	0,336	0,163
AL 2	5,5	4,2	616	1678	5,0	0,966	0,309	0,042
Prüf-/Maßnahmewerte BBodSchV			200 <sup>1)</sup>			0,1		0,1 <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> bei Böden mit zeitweise reduzierenden Verhältnissen gilt PW = 50 mg/kg.

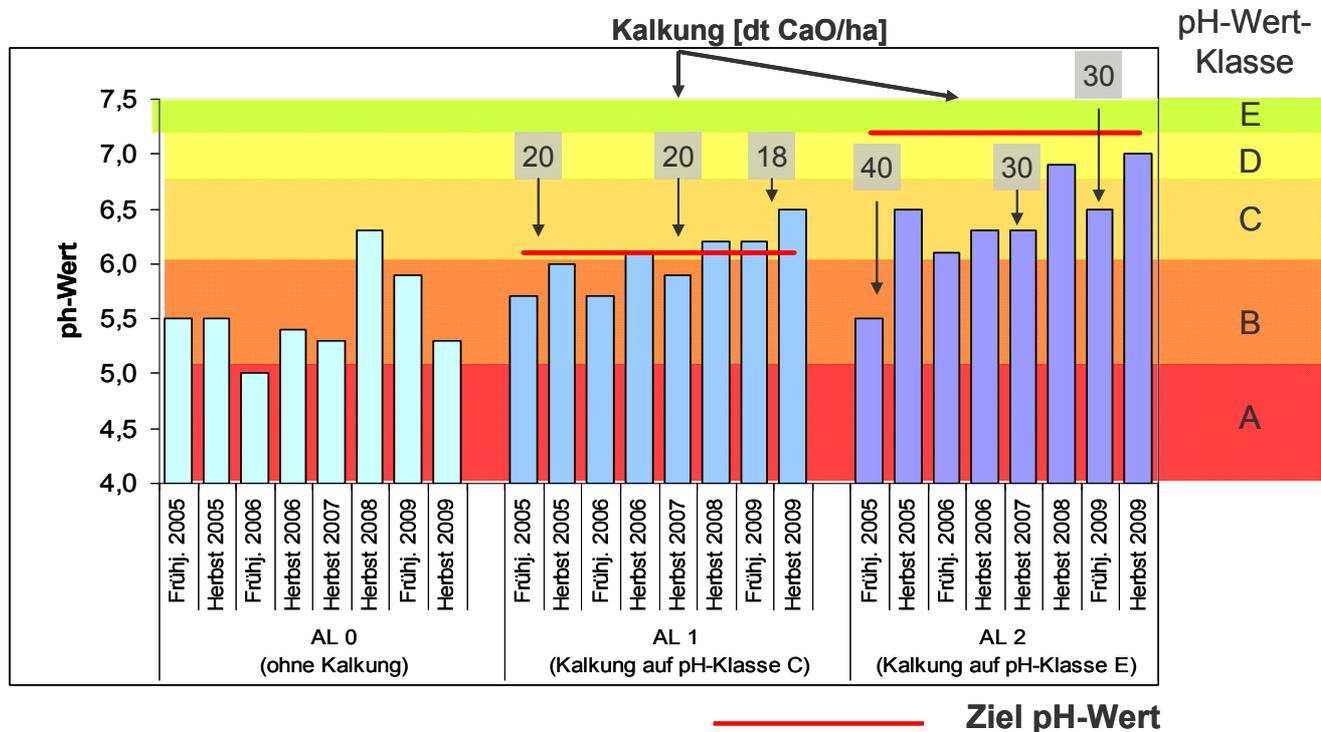
<sup>2)</sup> Maßnahmewert der BBodSchV; bei Anbau von Brotweizen oder stark Cadmium-anreichernder Gemüsearten gilt als Maßnahmewert 0,04 mg/kg

**Tabelle 6: Gehalte an Schwermetallen im Oberboden der Ackerfläche vor Versuchsbeginn (Entnahmetiefe 0 – 30 cm, April 2005) im KW-Extrakt**

Variante	Cu	Ni	Hg	Tl	Zn
	mg/kg				
AL 0	110	33,6	0,30	0,60	500
AL 1	107	29,1	0,29	0,67	485
AL 2	100	28,6	0,35	0,67	389
Prüfwerte BodSchV			5	-- <sup>1)</sup>	

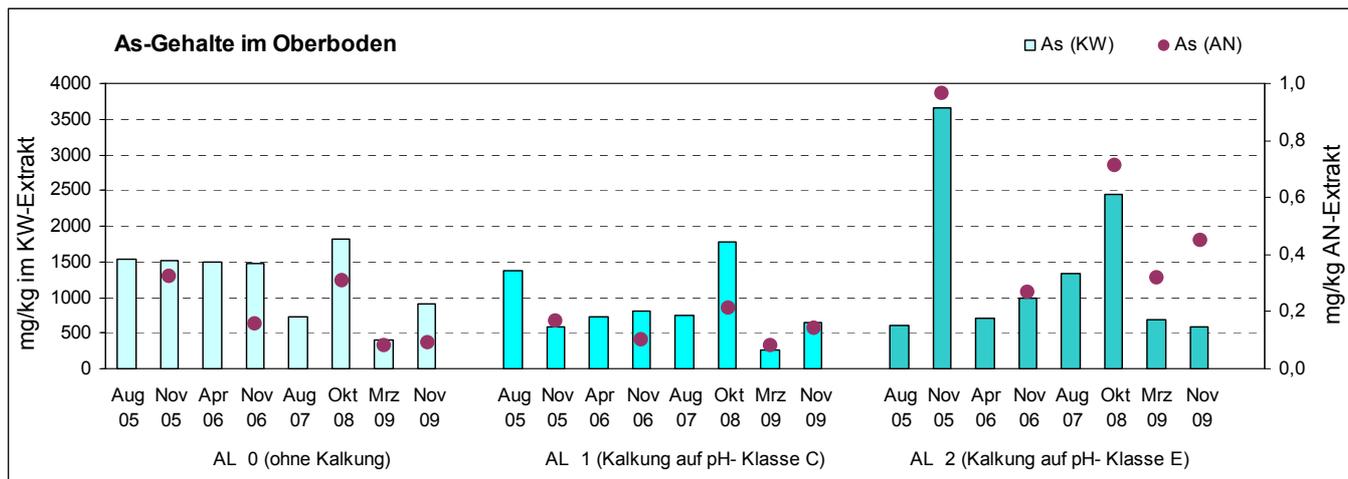
<sup>1)</sup> Prüfwert für Tl im AN-Extrakt = 0,1 mg/kg

Die bei der Versuchsvariante AL 1 angestrebte pH-Wert-Klasse C konnte erst im Versuchsjahr 2008 erreicht werden. 2009 fand auf dieser Fläche eine Erhaltungskalkung mit 18 dt CaO/ha statt. Die pH-Wert Klasse E auf der Variante AL 2 konnte trotz erhöhter Kalkgaben in den Jahren 2005, 2007 und 2009 nicht erreicht werden (Abbildung 11).

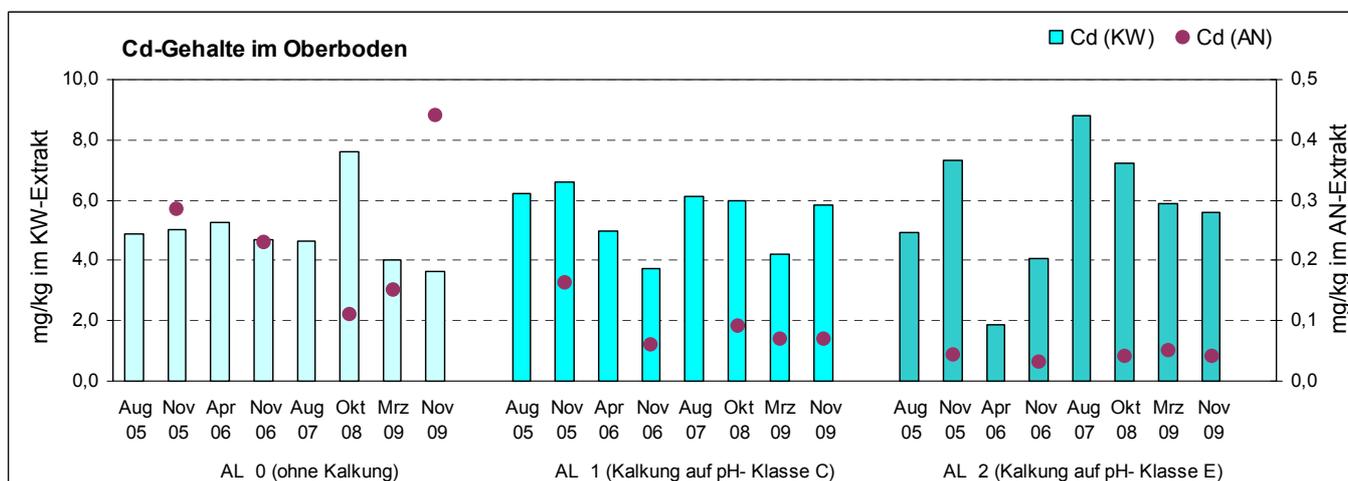


**Abbildung 11: Kalkdüngungsmengen und Entwicklung des pH-Wertes im Oberboden Ackerland (0 – 30 cm) im Zeitraum August 2005 bis November 2009**

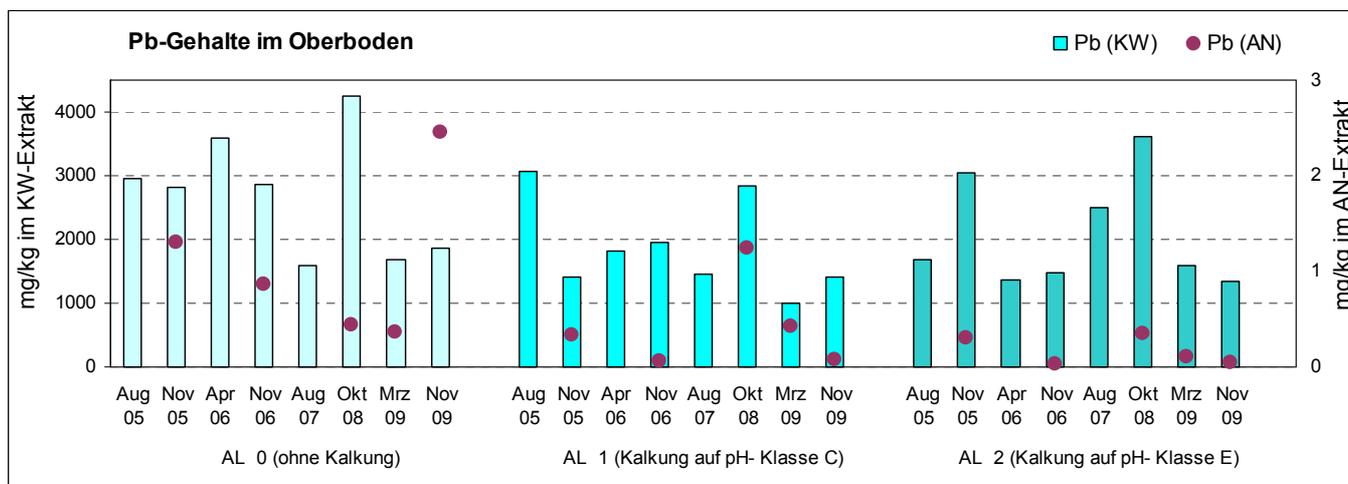
Die Gehalte an Arsen, Cadmium und Blei im Oberboden (0-30 cm) der Varianten AL 0, AL 1 und AL 2 sind in den Abbildungen 12 bis 14 dargestellt. Die Gehalte der Elemente schwankten zwischen den Probenahmeterminen bei beiden Extraktionsverfahren sehr stark.



**Abbildung 12: Entwicklung der KW- und AN-löslichen Arsengehalte im Oberboden Ackerland (0 – 30 cm) von August 2005 bis November 2009**

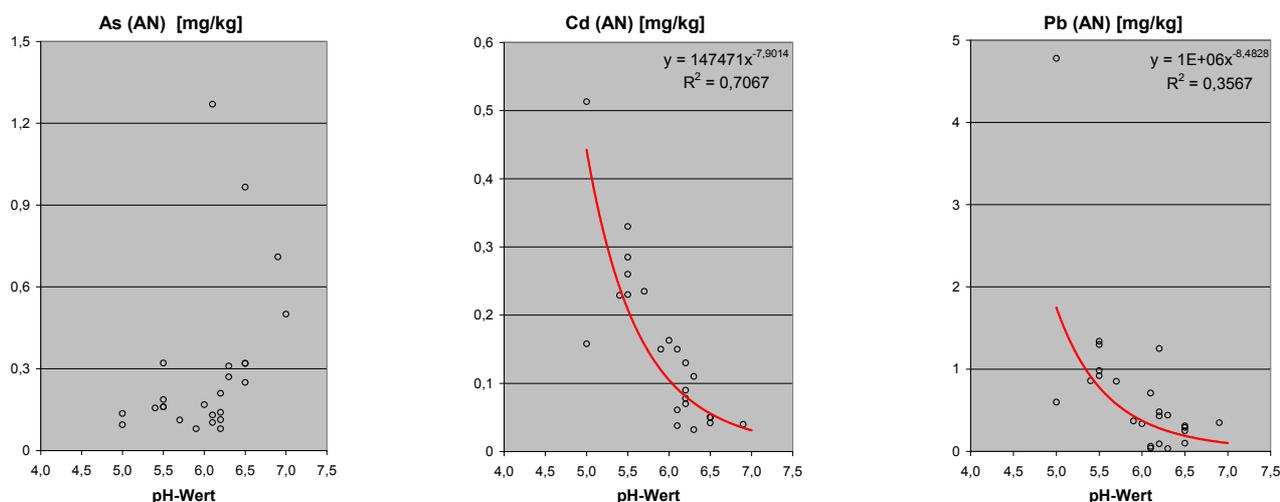


**Abbildung 13: Entwicklung der KW- und AN-löslichen Cadmiumgehalte im Oberboden Ackerland (0 – 30 cm) von August 2005 bis November 2009**



**Abbildung 14: Entwicklung der KW- und AN-löslichen Blei-gehalte im Oberboden Ackerland (0 – 30 cm) von August 2005 bis November 2009**

Durch die Kalkdüngung und der daraus folgenden pH-Wert-Erhöhung wurde der mobile Anteil an Cadmium im Boden reduziert, teilweise auch der an Blei. Dies belegen die regressionsanalytischen Untersuchungen in Abbildung 15. Für den Gehalt an pflanzenverfügbarem Arsen (AN) konnte kein Zusammenhang zum pH-Wert des Bodens nachgewiesen werden.



**Abbildung 15: Abhängigkeit des pflanzenverfügbaren Anteils an Arsen, Cadmium und Blei (AN-Extrakt) im Boden Ackerland (0 – 30 cm) vom pH-Wert**

Auf den drei Versuchsvarianten wurden im Jahr 2006 Winterroggen und im Jahr 2009 Wintergerste angebaut und hinsichtlich ihrer Aufnahme von Arsen, Cadmium und Blei untersucht (Tabelle 7). Die Gehalte an Cadmium und Blei überschritten bei beiden Fruchtarten in allen drei Kalkdüngungsvarianten die Lebensmittelgrenzwerte von 0,1 mg Cd/kg und 0,2 mg Pb/kg. Nach KLOSE (2003) treten Grenzwertüberschreitungen des Cadmiumgehaltes nach dem Lebensmittelgesetz bereits ab einem Bodengehalt von 1 mg Cd/kg auf.

Bei der Wintergerste wurden die Futtermittelgrenzwerte von Arsen und Cadmium in der Ganzpflanze und im Stroh bei allen Prüfvarianten überschritten; bei Winterroggen hingegen vor allem auf der Fläche AL 2. Bei Futtermitteln geht man bei einem Gehalt von  $\geq 7$  mg Cd/kg Boden davon aus, dass der Grenzwert überschritten werden kann (KLOSE 2003). Durch den Anstieg des pH-Wertes aufgrund der Kalkung ist der Anteil der pflanzenverfügbaren Schwermetalle 2009 niedriger als 2006. Trotzdem sind die Gehalte von Arsen und Cadmium in der Wintergerste erheblich höher als 2006 beim Winterroggen. Dies lässt eine vergleichsweise höhere Schwermetallaufnahme der Gerste vermuten. Für Winterweizen liegen sortenabhängig signifikante Unterschiede zur Cadmiumaufnahme vor (KLOSE 2003).

**Tabelle 7: Gehalte an Kontaminanten in Winterroggen (2006) und Wintergerste (2009)**

Ernteprodukt	Variante	Arsen [mg/kg TM]		Cadmium [mg/kg TM]		Blei [mg/kg TM]	
		WRO	WG	WRO	WG	WRO	WG
Ganzpflanze	AL 0	1,0	3,8	1,1	1,1	3,2	2,5
	AL 1	1,1	8,1	0,6	1,2	3,0	5,8
	AL 2	9,7	5,3	1,4	1,8	14,3	4,5
Korn	AL 0	0,3	1,2	0,3	0,6	0,3	0,4
	AL 1	0,3	1,8	0,3	0,6	0,2	0,8
	AL 2	0,4	1,3	0,6	0,9	0,2	0,6
Stroh	AL 0	1,4	8,3	0,5	2,0	1,8	2,3
	AL 1	1,4	13,0	0,4	1,7	1,4	3,0
	AL 2	12,0	10,4	1,7	3,1	16,6	3,3
Grenzwert Futter		2,0		1,0		10,0*	
Grenzwert Lebensmittel		nicht definiert		0,1		0,2	

\*Grenzwert Einzelfutter

rot: Überschreitung Lebensmittelgrenzwert; farbiger Hintergrund = Futtermittelgrenzwert überschritten

Die Arsen-, Cadmium- und Bleigehalte im Erntegut der Kalkdüngungsvarianten (AL 1, AL 2) lassen im Vergleich zur Kontrollvariante (AL 0) derzeit keine Verminderung der Aufnahme in das Erntegut erkennen. Ursache dafür könnte die inhomogene Verteilung der Elemente auf den Schlägen sein, welche große Abweichungen in den Meßwerten verursachen. Weiterhin wurden nur zwei Ernten mit unterschiedlichen Früchten betrachtet, von denen keine allgemeingültigen Aussagen abgeleitet werden können.

## 2.3 Ökonomische Bewertung

Eine Kalkung der Flächen fand bis auf das Jahr 2008 in allen Versuchsjahren statt. Die Kalkmengen variierten je nach Versuchsvariante (Abbildung 4, Abbildung 11). Die zu kalkende Fläche des Grün- und Ackerlandversuches war 7 ha groß. Zu den Kalkungsterminen wurden jährlich ca. 28 t Branntkalk auf dem Grün- und Ackerlandversuch ausgebracht. Die Preise für den Branntkalk schwankten zwischen 2.600 und 2.800 € pro Jahr. Für die Ausbringung entstanden zusätzlich jährlich Kosten von etwa 480 €.

Tabelle 8 und Tabelle 9 zeigen die entstandenen Kosten für die zwei Versuchsvarianten auf Grün- und Ackerland. Bei beiden Varianten fand eine Aufkalkung auf die jeweilige pH-Wert-Klasse statt, was die Kosten von ca. 200 bzw. 400 €/ha erklärt. Bei der ökonomischen Betrachtung ist zu beachten, dass es in der landwirtschaftlichen Praxis nicht üblich ist, bis auf pH-Klasse E aufzukalken. So würden normalerweise lediglich Kosten für die Aufkalkung auf pH-Klasse C bzw. regelmäßige Erhaltungskalkungen anfallen. Außerdem wurde bei dem Versuch der teurere, schnell verfügbare Branntkalk angewandt. Dies war notwendig, um möglichst schnell die jeweilige im Versuch angestrebte pH-Klasse zu erreichen.

In den Anfangsjahren 2005 und 2006 überschritten die Grünschnitte teilweise den Grenzwert für Futtermittel (Tabelle 4). Durch die erfolgte Kalkung im Rahmen des Versuches und die damit verbundene pH-Wert-Erhöhung sanken die Cadmiumgehalte in den Jahren 2008 und 2009 unter den Futtermittelgrenzwert. Das ermöglichte die Nutzung des Grünlandes zur Futterproduktion.

Die Aufwüchse der Ackerlandversuche überschritten trotz ansteigendem pH-Wert die Lebensmittelgrenzwerte. Nur das Korn könnte überhaupt als Futtermittel Verwendung finden. Die Kalkdüngung ist in diesem Fall lediglich als Präventionsmaßnahme zu betrachten, durch die die Mobilität (Wasserlöslichkeit bzw. Pflanzenverfügbarkeit) der Schwermetalle eingeschränkt wird. Dadurch wird eine Verschlimmerung des Zustandes, welche eine Überschreitung der Futtermittelgrenzwerte zur Folge hätte, verhindert. Die Erträge haben sich durch die Kalkdüngung nicht verändert.

**Tabelle 8: Kosten des Kalkdüngungsversuches auf belastetem Ackerland in Hilbersdorf 2005 – 2009 (Erntegut: 2006 Winterroggen, 2009 Wintergerste)**

Variante		2005	2006	2007	2008	2009	Vgl. Erhaltung
AL 0	Kornertrag [dt TM/ha]	n.b.	39	n.b.	n.b.	61	
AL 1	Kornertrag [dt TM/ha]	n.b.	46	n.b.	n.b.	50	
AL 2	Kornertrag [dt TM/ha]	n.b.	27	n.b.	n.b.	56	
	ausgebrachte Kalkmenge [dt/ha]	22	0	22	0	21	5
AL 1	Kosten Kalk [€/ha]	196	0	196	0	185	45
	Kosten Ausbringung [€/dt]	1,6	0	1,6	0	1,6	1,6
	<b>Gesamtkosten Kalkung [€/ha]</b>	<b>232</b>	<b>0</b>	<b>232</b>	<b>0</b>	<b>218</b>	<b>53</b>
	ausgebrachte Kalkmenge [dt/ha]	44	0	33	0	35	5
AL 2	Kosten Kalk [€/ha]	393	0	295	0	308	45
	Kosten Ausbringung [€/dt]	1,6	0	1,6	0	1,6	1,6
	<b>Gesamtkosten Kalkung [€/ha]</b>	<b>463</b>	<b>0</b>	<b>347</b>	<b>0</b>	<b>363</b>	<b>53</b>

**Tabelle 9: Kosten des Kalkdüngungsversuches auf belastetem Grünland in Hilbersdorf 2005 – 2009**

Variante		2005	2006	2007	2008*	2009	Vgl. Erhaltung
GL 0	Ertrag [dt TM/ha]	25	40	n.b.	12	73	
GL 1	Ertrag [dt TM/ha]	29	49	n.b.	11	86	
GL 2	Ertrag [dt TM/ha]	66	43	n.b.	13	78	
	ausgebrachte Kalkmenge [dt/ha]	20,9	9	0	0	7	2
GL 1	Kosten Kalk [€/ha]	187	79	0	0	62	18
	Kosten Ausbringung [€/dt]	1,60	1,60	0	0	1,60	1,60
	<b>Gesamtkosten Kalkung [€/ha]</b>	<b>220</b>	<b>93</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>73</b>	<b>21</b>
	ausgebrachte Kalkmenge [dt/ha]	39,6	20	22	0	14	2
GL 2	Kosten Kalk [€/ha]	354	177	196	0	123	18
	Kosten Ausbringung [€/dt]	1,60	1,60	1,60	0	1,60	1,60
	<b>Gesamtkosten Kalkung [€/ha]</b>	<b>417</b>	<b>208</b>	<b>232</b>	<b>0</b>	<b>145</b>	<b>21</b>

\* Die Erträge für 2008 fallen so niedrig aus, da die Masse des 1. Schnittes komplett fehlt.

## 2.4 Fazit der Kalkdüngungsversuche

Die Kalkdüngungsversuche auf arsen- und schwermetallbelastetem Grün- und Ackerland in Hilbersdorf wurden im Jahr 2005 angelegt und bis zum Jahr 2009 fortgeführt. Die angestrebte pH-Wert Klasse C bei den Versuchsvarianten GL 1 bzw. AL 1 wurde bereits in den Jahren 2006 und 2007 erreicht. Auf diesen Flächen wurden in den Folgejahren Erhaltungskalkungen durchgeführt. Die pH-Wert Klasse E wurde auf dem Grünland erst im Versuchsjahr 2009 erreicht; auf dem Ackerland wurde die Klasse E nicht erreicht.

In dem fünfjährigen Kalkdüngungsversuch auf Ackerland bzw. Grünland konnte nachgewiesen werden, dass durch die Kalkung und der daraus folgenden pH-Wert-Erhöhung der mobile, pflanzenverfügbare Anteil an Cadmium und Blei im Oberboden abnimmt. Bei Arsen konnte dieser Effekt nicht bestätigt werden.

Obwohl die in den Versuchen genutzten Grünlandflächen extrem mit Arsen und Blei belastet waren, konnten bei Blei keine und bei Arsen vereinzelt Überschreitungen der Futtermittelgrenzwerte festgestellt werden. Die Belastung der Flächen mit Cadmium lag unter dem Maßnahmewert der BBodSchV. Trotzdem überschritten in den Jahren 2005 und 2006 einige Schnitte den Futtermittelgrenzwert. Erst mit zunehmendem pH-Wert und sinkendem pflanzenverfügbaren Anteil an Cadmium konnten die Grenzwerte eingehalten werden.

Auf dem genutzten Ackerland ist eine Verwendung des Kornes als Lebensmittel auf Grund der strengen gesetzlichen Grenzwerte nach der Lebensmittelverordnung nicht möglich. Das Korn der Aufwüchse kann lediglich als Futtermittel Verwendung finden. Die Ganzpflanze und das Stroh überschreiten bei der Wintergerste in allen geprüften Varianten die Futtermittelgrenzwerte für Arsen und Cadmium. Hingegen traten bei dem untersuchten Winterroggen nur vereinzelt Grenzwertüberschreitungen auf. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass sich die dargestellten Ergebnisse für Winterroggen und Wintergerste auf jeweils nur einjährige Untersuchungen (2006 bzw. 2009) beziehen.

Seit einiger Zeit wird kontrovers über die Einführung eines Grenzwertes für Arsen in Lebensmitteln diskutiert (KLOSE 2003). Mittelfristig ist zudem mit einer Verschärfung der bestehenden Grenzwerte zu rechnen. Dadurch würde die Nutzung von kontaminierten Flächen zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion zukünftig noch mehr eingeschränkt werden. Insbesondere bei Überschreitung der Grenzwerte für Cadmium und Blei könnte die Kalkdüngung eine Möglichkeit zur Reduzierung der Schwermetallgehalte im Erntegut darstellen. Eine alternative Nutzungsmöglichkeit stellt die energetische Verwertung der Aufwüchse dar (siehe Kapitel 4).

# 3 Anbau von schnellwachsenden Baumarten

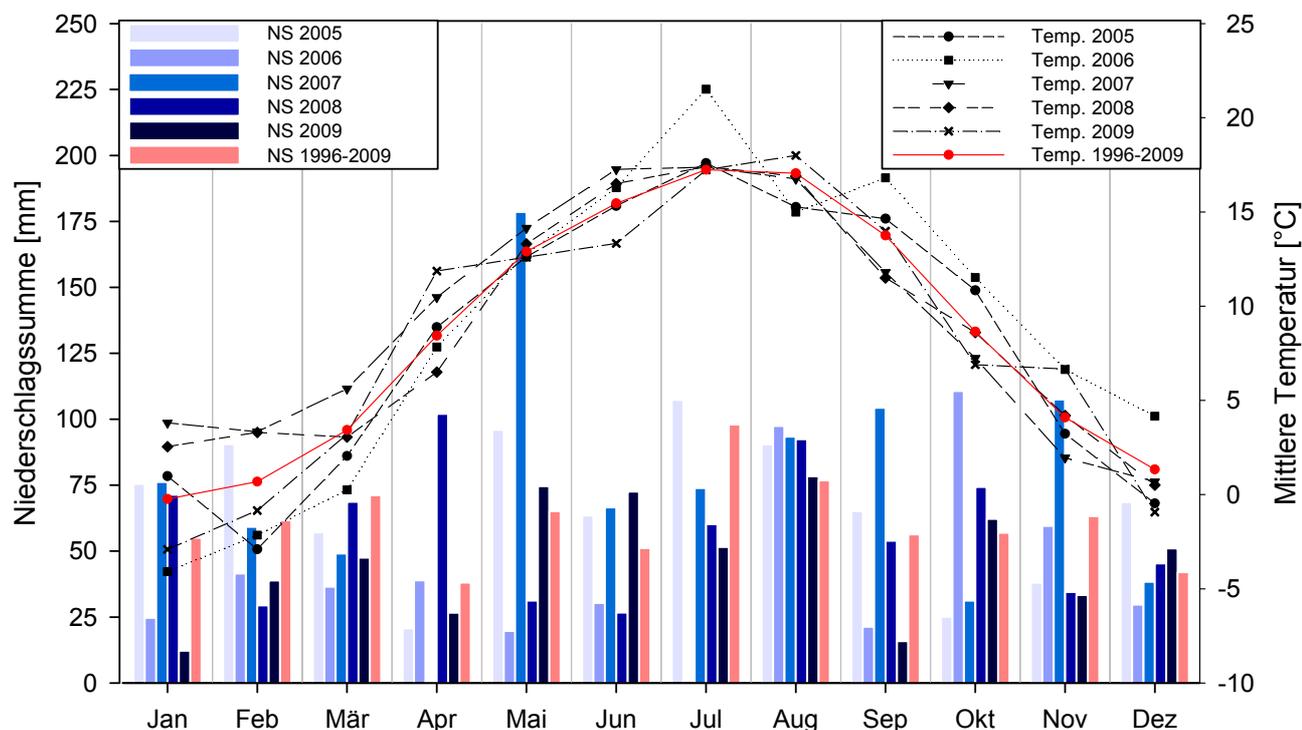
Der Anbau von Energiepflanzen wie schnellwachsenden Baumarten bietet eine Möglichkeit, kontaminierte landwirtschaftliche Flächen langfristig sinnvoll zu nutzen. Pappeln und insbesondere Weiden zählen für bestimmte Schwermetalle (Cadmium) zu den sogenannten Exkluderpflanzen. BUNGART (1999) ermittelte beim Anbau verschiedener Pappelklone auf unbelastetem Kippenboden erhöhte Schwermetallgehalte im Erntegut. In den Versuchen der ehemaligen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) am Versuchsstandort Kalkreuth wurden im Erntegut verschiedener Pappel- und Weidenklone (zwei- und dreijähriger Umtrieb) ebenfalls erhöhte Gehalte an Cadmium im Erntegut nachgewiesen, obwohl die Fläche geogen nicht belastet ist (RÖHRICHT et al. 2002). Dies weist auf eine spezifische Aufnahme von Schwermetallen bei diesen Baumarten hin.

Im Jahr 2005 erfolgte die Anpflanzung einer 2 ha großen Fläche mit schnellwachsenden Baumarten am Standort Krummenhennersdorf bei Freiberg. Der gewählte Standort weist den für die Region Freiberg typischen Belastungsgrad mit Schwermetallen und Arsen auf. Als wesentliche Ursache für die Kontamination sind neben geogen bedingten Faktoren vor allem die dort über Jahrzehnte betriebene metallurgische Industrie zu nennen. Auf dieser Fläche wurden drei Pappel- und fünf Weidensorten hinsichtlich ihrer Standorteignung, des Ertragspotentials sowie der Schwermetallakkumulation geprüft. In weiteren Arbeitspaketen wurde die energetische Nutzung dieser Aufwüchse in Verbindung mit der Schwermetallbilanz untersucht. Die Plantage wurde in der fünfjährigen Versuchszeit zweimal geerntet. Die erste Ernte erfolgte im Februar 2008 nach dreijähriger Standzeit, die zweite Ernte im Februar 2010 nach zweijähriger Standzeit.

## 3.1 Versuchsdurchführung und Methodik

### 3.1.1 Standortcharakteristik und Versuchsanlage

Die Versuchsfläche ist ein für die Vorgebirgslage des Gebietes Freiberg/Sachsen typischer, flachgründiger Lössboden der Entstehungsstufe Lö 6. Die Bodenart ist ein sandiger Lehm mittlerer Qualität (Ackerzahl 45). Weiterhin kennzeichnen den Versuchsstandort hohe jährliche Niederschlagssummen (820 mm/a) bei vergleichsweise niedrigen Jahresdurchschnittstemperaturen (7,2 °C). Die Höhenlage ist mit 320 m über Normal Null angegeben. Insgesamt bieten diese bodenklimatischen Verhältnisse günstige Voraussetzungen für den Anbau schnellwachsender Baumarten. Das Anlagejahr 2005 entsprach im Witterungsverlauf (Niederschlag, Lufttemperatur) weitgehend den langjährigen Mittelwerten (Abbildung 16). Das Versuchsjahr 2006 kann im Vergleich zu den anderen Versuchsjahren als sehr niederschlagsarm in der Vegetationszeit (April - September) eingestuft werden. Der Juli 2006 war mit einer Durchschnittstemperatur von 21,5 °C der wärmste Monat der letzten 10 Jahre. Insgesamt boten die Versuchsjahre im Niederschlags- und Temperaturverhalten gute Wachstumsbedingungen. In den letzten 10 Jahren hat sich die Jahresdurchschnittstemperatur auf 8,6 °C erhöht und die jährlichen Niederschläge sind auf 745 mm pro Jahr gesunken.



**Abbildung 16: Witterungsdaten 2005 - 2009 im Vergleich zu den Mittelwerten der letzten 12 Jahre (1996 – 2009) der Klimastation Hilbersdorf (April 2007: NS 0,5 mm; Juli 2006: keine Angaben)**

Die Ackerkrume der Versuchsfläche weist mit Ausnahme von Phosphor (Gehaltsklasse B) einen guten bis sehr guten Versorgungszustand (Kalium, Magnesium) auf (Tabelle 10). Der Gehalt an pflanzenverfügbarem Stickstoff zu Vegetationsbeginn im Pflanzjahr 2005 war mit 125 kg/ha überdurchschnittlich hoch. Der pH-Wert im Boden ist der Gehaltsklasse B (niedrig) zuzuordnen. In seiner bodenchemischen Zusammensetzung (Makronährstoffe) bietet der Boden gute Wachstumsbedingungen für das Gedeihen der schnellwachsenden Pappel- und Weidensorten.

**Tabelle 10: pH-Wert, Humus- u. Nährstoffgehalte im Boden, 1. Standjahr (2005), Krummenhennersdorf**

Termin	Tiefe cm	N <sub>min</sub> kg/ha	pH-Wert	Humus %	P <sub>CAL</sub>	K <sub>CAL</sub> mg/100g Boden	Mg	N <sub>t</sub> %	C <sub>t</sub>
Mai 2005	0 – 30	125,0	5,7	2,5	3,3	11,8	11,7	0,16	1,5
	30 – 60	23,4	6,0	0,7	1,0	4,2	10,4	0,05	0,4
November 2005	0 – 20	-	5,7	2,7	3,2	12,4	10,5	0,2	1,5
	0 – 30	58,0	5,6	2,5	2,6	9,9	9,9	0,1	1,4
	30 – 60	53,0	5,8	0,8	1,0	4,8	8,9	0,0	0,5
	60 – 90	25,0	5,7	1,3	1,5	7,4	10,5	0,1	0,8

Den Belastungsgrad der Ackerkrume der Versuchsfläche mit Arsen und Schwermetallen charakterisiert Tabelle 11. Im Vergleich zwischen den Kontaminanten ist hervorzuheben, dass in der Ackerkrume erhöhte Konzentrationen an Arsen und Blei vorlagen. Die Prüf-/Maßnahmewerte der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) wurden jedoch nicht überschritten. Die einzige Ausnahme bildet Arsen, welches den Prüfwert von 50 mg/kg bei Grünland überschritt. Bezüglich der Schichttiefe war der Krumenbereich 0 – 30 cm am stärksten belastet. Die bis in 90 cm Tiefe gemessenen Werte zeigen, dass besonders Arsen, Blei und Zink auch in tieferen Schichten des Bodens in höheren Konzentrationen anzutreffen sind. Bis in diese Tiefen breitet sich der Wurzelstock und das Feinwurzelsystem der Bäume ab dem 2. Standjahr aus.

**Tabelle 11: Arsen- und Schwermetallgehalte im Boden, 1. Standjahr (2005), Krummenhennersdorf**

Termin	Tiefe cm	As	Cd	Pb	Hg mg/kg (KW-E.)	Cu	Cr	Ni	Zn
Mai 2005	0 – 30	118	3,2	374	0,4	n.b.	n.b.	18	n.b.
	30 – 60	33	0,7	97	0,1	n.b.	n.b.	9	n.b.
November 2005	0 – 20	109	3,1	416	0,3	24	27	18	206
	0 – 30	98	3,0	394	0,3	23	29	20	197
	30 – 60	45	1,0	153	0,1	16	32	24	130
	60 – 90	63	1,5	216	0,2	20	32	24	155
Prüf-/Maßnahmewerte BBodSchV	Acker	200			5				
	Grünland	50	20	1200	2	1300		1900	

Im Untersuchungszeitraum (2005 - 2010) konnten hinsichtlich der Humus- und Nährstoffgehalte in der Ackerkrume im Vergleich zum Ausgangsstatus (2005) nur geringfügige Veränderungen festgestellt werden. Dies trifft auch für die Gehalte an Arsen und Schwermetallen zu (Tabelle 12). Im Jahr 2007 fanden keine Untersuchungen statt.

**Tabelle 12: Nährstoff- und Schwermetallgehalte im Boden (0 – 30 cm) aller Versuchsjahre 2005 – 2010, Krummenhennersdorf**

Versuchsjahre (Schicht 0-30 cm)	P <sub>CaL</sub>	K <sub>CaL</sub>	Mg	Humus %	pH-Wert	As	Cd	Pb	Hg	Cu	Zn
	mg/100g Boden					mg/kg (KW-E.)					
2005	2,9	10,9	10,8	2,5	5,7	108	3,1	384	0,3	23,4	197
2006	3,7	14,5	14,5	2,7	5,8	79	2,3	311	0,3	19,4	150
2008	3,6	13,9	13,9	n.b.	5,6	112	3,0	362	0,3	19,4	181
2009	2,7	8,7	8,7	2,4	5,6	87	2,3	349	0,2	17,4	190
2010	2,0	6,3	8,9	1,6	5,5	87	1,9	213	0,2	21,9	154

### Sortenauswahl und Pflanzgut

Auf Grund der Standortcharakteristik wurden drei verschiedene Pappelklone und fünf Weidensorten für den Anbau in Krummenhennersdorf ausgewählt (Tabelle 13). Die in den Versuch einbezogenen Pappelsorten beruhen auf Kreuzungen der nordamerikanischen und asiatischen Balsampappeln sowie der Schwarzpappel. In Versuchen kristallisierten sich diese Sorten als sehr leistungsstark heraus (HOFMANN 2008). Das geprüfte Sortiment an Weidensorten basiert auf Kreuzungen der Korbweide und sibirischen Korbweide. Die Sorte „Gudrun“ ist auf Basis der Filzastweide gezüchtet worden. Auch hier erfolgte die Sortenwahl nach Analyse bisher erzielter Ertragsresultate und Anwuchs- sowie Resistenzeigenschaften.

**Tabelle 13: Pappel- und Weidensorten, Krummenhennersdorf**

Variante	Sorte	Kreuzungspartner
	Pappel	
1	Weser 6	<i>Populus trichocarpa</i> [Westliche Balsampappel]
2	Max 3	<i>P. nigra</i> [Schwarzpappel] x <i>P. trichocarpa</i>
3	Hybride 275	<i>P. maximowiczii</i> [Maximowitsch' Pappel] x <i>P. trichocarpa</i>
	Weide	
4	Jorr	<i>Salix viminalis</i> [Hanf- oder Korbweide]
5	Sven	<i>S. viminalis</i> x ( <i>S. viminalis</i> x <i>S. schwerinii</i> ) [Sibirische Korbweide]
6	Tora	<i>S. schwerinii</i> x <i>Salix viminalis</i>
7	Tordis	( <i>S. viminalis</i> x <i>S. schwerinii</i> ) x <i>S. viminalis</i>
8	Gudrun	<i>S. dasyclados</i> [Filzastweide]

Als Pflanzmaterial wurden unbewurzelte Steckhölzer genutzt. Die ausgewählten Pappelklone stammten vom Forschungsinstitut für schnellwachsende Baumarten in Hannoversch Münden und die Weidensorten wurden von der Firma Agrobränsle AB in Örebro (Schweden) bezogen.

## Pflanzung und Pflanzsystem

Nach einer Frühjahrsbodenbearbeitung erfolgte Ende Mai die Pflanzung der Stechkölzer per Hand durch die ortsansässige Baumschule. Mit Blick auf die Ernte- und Pflégetechnik pflanzte man die Stechkölzer im Doppelreihensystem (Abbildung 17). Die Pflanzdichte (11.850 Bäume/ha) ist auf eine mittlere Umtriebszeit (3 – 4 Jahre) ausgerichtet. Die Einzelheiten zur sortenspezifischen Parzellengröße und Stechkölzlerzahl sind Tabelle 14 zu entnehmen.

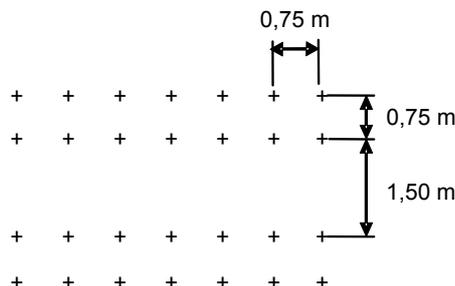


Abbildung 17: Skizze des Doppelreihensystems

Tabelle 14: Anbaufläche und Anzahl der Stechkölzer pro Sorte/Klon, Krummenhennersdorf

Art	Sorte	Anbaufläche ha	Anzahl der Stechkölzer	
			Stck./Sorte	Stck./ha
Pappel	Weser 6	0,2025	2.217	10.948
	Max 3	0,2025	1.924	11.812
	Hybride 275	0,2025	2.308	11.398
Weide	Jorr	0,2025	2.386	11.783
	Sven	0,2025	2.403	11.867
	Tora	0,2025	2.481	12.252
	Tordis	0,2025	2.517	12.430
	Gudrun	0,2025	2.158	10.657

## Pflegemaßnahmen

Die Pflegemaßnahmen auf der Versuchsanlage umfassten Pflanzbettvorbereitung, Herbizideinsatz und den Bau eines Wildschutzzaunes (Tabelle 15). Um den Unkrautdruck im ersten Standjahr 2005 zu reduzieren, wurde ca. 5 Tage nach der Pflanzung das Herbizid „Flexidor“ ausgebracht. Dieses selektive Voraufauf-Herbizid dämmt die Keimung von Samen zweikeimblättriger Unkräuter für etwa drei Monate nach der Pflanzung wirksam ein. In einigen Bereichen der Versuchsfäche trat vermehrt Stumpfblättriger (Großblättriger) Ampfer auf. Um eine großflächige Ausbreitung zu verhindern, erfolgte eine Einzelpflanzenbehandlung (Dochtstreichgerät) mit dem Totalherbizid „Glyfos“. Der im Herbst beobachtete Befall der Fläche mit Schermäusen erforderte das Auslegen von entsprechenden Bekämpfungsmitteln. Auf Grund des guten Versorgungszustandes der Fläche mit Pflanzennährstoffen (Tabelle 12) wurde auf eine Düngung der Versuchsfäche verzichtet. Als weitere Schutzmaßnahme war die Errichtung eines Wildschutzzaunes in dieser sehr rehwildreichen Gegend unumgänglich.

Tabelle 15: Anbau- und Pflegemaßnahmen im 1. und 2. Standjahr auf der KUP Krummenhennersdorf

Maßnahme	Beschreibung	Termin
Bodenvorbereitung:	2 x Grubbern mit Egge	29. März, 15. April 2005
	2 x Grubbern mit Ringwalze	28. April, 19. Mai 2005
Pflanzung:	mit Steckeisen (per Hand)	26.-28. Mai 2005
Pflanzenschutz:	Flexidor (Voraufauf-Herbizid zur Bekämpfung von aus Samen auflaufenden zweikeimblättrigen Unkräutern), 1 Liter/ha	31. Mai 2005
	Glyfos (Einzelpflanzenbehandlung von großblättrigen Ampfer, Totalherbizid), 200 ml/Gesamtfläche	8. September .2005
	Ratron Feldmausköder, 10 kg/ha	3. November 2005 8. April 2006
Zaubau:	Wildschutzzaun 2 m Höhe	10. August 2005

### 3.1.2 Methodik der Erfassung von Prüfmerkmalen, der pflanzensoziologischen Kartierung und faunistischen Aufnahmen

Auf der KUP Krummenhennersdorf fanden umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich Sorteneignung (Wachstum, Ertrag) und der Aufnahme von Arsen und Schwermetallen statt. Im Herbst des Pflanzjahres 2005 erfolgten Aufnahmen zur Ermittlung der Anwuchsrate. Dabei wurden alle angewachsenen Steckhölzer von jeder Sorte ermittelt. Es wurde unterschieden, ob der Steckling nicht angewachsen oder durch Wild verbissen war (Tabelle 16). Die Kontrolle des Austriebes erfolgte nochmals nach der ersten Ernte.

Zur vegetationsfreien Zeit (meist Januar oder Februar) fanden Bonituren zur Ermittlung der Wachstumsparameter statt. In der 1. Rotation wurden pro Sorte 100 Bäume bonitiert. Dabei wurden jeweils 20 aufeinander folgende Stöcke pro Doppelreihe aufgenommen. Es wurde von jedem Baum die Anzahl der Triebe ermittelt. Weiterhin wurde von jedem Trieb die Höhe, der Wurzelhalsdurchmesser (WHD) in 10 cm Höhe und der Brusthöhendurchmesser (BHD) in 1,3 m Höhe gemessen. Aufgrund der Vielzahl der Triebe pro Baum nach der 1. Ernte musste der Bonituraufwand in den Jahren 2009 und 2010 etwas reduziert werden. Bei den Pappeln wurden noch 60 Bäume und bei den Weiden 40 Bäume pro Sorte bonitiert, weiterhin erfolgte nur die Ermittlung der stärksten Wurzelhalsdurchmesser und nur noch einer Höhe pro Baum. Die Aufnahme der Anzahl der Triebe und des Brusthöhendurchmessers blieb gleich.

Um die Gehalte an Arsen und Schwermetallen in den Aufwüchsen zu ermitteln, wurden jährlich sortenweise Holzproben und Blattproben entnommen. Die Holzprobeentnahme erfolgte in der vegetationsfreien Zeit als Mischprobe aus drei Bäumen pro Sorte. Die Blattproben (je ca. 500 g) wurden zum Ende der Vegetationszeit (September) ebenfalls als Mischprobe über jede Sorte erstellt. Des Weiteren wurden jährlich im Frühjahr sortenweise Bodenproben in den Tiefen 0 – 20 cm, 0 – 30 cm und 30 – 60 cm entnommen und diese auf die Gehalte an Nährstoffen, Arsen und Schwermetallen im Boden untersucht.

Zusätzlich fanden auf der Fläche floristische und faunistische Begleituntersuchungen nach folgendem Schema statt:

#### Pflanzensoziologische Kartierung

Die Untersuchungen zur Begleitflora auf der Kurzumtriebsfläche dienten dem Ziel, das Arteninventar, die Biodiversität und die Bestandessituation und -entwicklung auf einer größeren Anbaufläche mit schnellwachsenden Baumarten zu erfassen. Die Ersterhebung der Vegetation erfolgte im Jahr 2006. Wiederholungsaufnahmen wurden 2007, 2008 und 2009 durchgeführt. Die pflanzensoziologischen Kartierungen fanden in den Zeiräumen zwischen Juni und August statt und spiegeln somit den Frühsummer- und Hochsummeraspekt auf der Kurzumtriebsplantage wider.

Die pflanzensoziologische Kartierung erfolgte durch das Ingenieurbüro Landschafts-Planung Dr. Böhnert & Dr. Reichhoff GmbH nach der Methode von BRAUN-BLANQUET (1964). Für jeden Sortenstreifen, einschließlich seines schmalen Randbereiches, wurde eine pflanzensoziologische Aufnahme angefertigt.

Die vorkommenden Pflanzenarten wurden nach der sächsischen Roten Liste hinsichtlich ihres Gefährdungsstatus bewertet (SCHULZ 1999). Die Ermittlung ökologischer Zeigerwerte der Pflanzenarten erfolgte nach ELLENBERG et al. (1992).

Dabei bedeuten:

Lichtzahl	1 = Tiefschattenpflanze, 9 = Volllichtpflanze
Temperaturzahl	1 = Kältezeiger, 9 = extremer Wärmezeiger
Kontinentalitätszahl	1 = euozanisch, 9 = eukontinental
Feuchtezahl	1 = Starktrockniszeiger, 9 = Nässezeiger
Reaktionszahl	1 = Starksäurezeiger, 9 = Basen- und Kalkzeiger
Stickstoffzahl	1 = auf stickstoffärmsten Standorten, 9 = auf übermäßig stickstoffreichen Standorten
Salzzahl	0 = nicht salzertragend, 1 = salzertragend, 9 = auf Böden mit sehr hohem Salzgehalt

Zum Vergleich der floristischen Ähnlichkeit der Erstaufnahme 2006 mit den Wiederholungsaufnahmen 2007, 2008 und 2009 wurde der Präsenz-Gemeinschaftskoeffizient GS nach SØRENSEN (1948) berechnet:

$$G_S = \frac{2C}{A+B} \cdot 100$$

- $G_S$       Präsenz-Gemeinschaftskoeffizient  
 $A, B$     Gesamtartenzahl der beiden Aufnahmen  
 $C$         Anzahl der gemeinsamen Arten beider Aufnahmen

Er stellt das Verhältnis der Artübereinstimmung (Übereinstimmungsgrad) für die "bloße Anwesenheit" (Präsenz) dar.  $\frac{1}{2}(A+B)$  ist die Summe der theoretisch möglichen Gemeinsamkeiten. Der Quotient kennzeichnet den Anteil aktueller Gemeinsamkeiten an den theoretisch möglichen (vgl. DIERSCHKE 1994).

### Faunistische Untersuchungen

Im Rahmen der faunistischen Erhebungen wurde die epigäische (oberirdische) Fauna auf der Versuchsfläche mit schnellwachsenden Baumarten erfasst, aus landschaftsökologischer Sicht bewertet und in ihrer Entwicklung im Beobachtungszeitraum 2006 bis 2009 charakterisiert. Die Untersuchungen wurden in den Bereichen der Pappelsorten „Max 3“ und „Hybrid 275“ sowie der Weidensorten „Jorr“ und „Tora“ vorgenommen. Im Jahr 2006 war nur eine Herbstbeprobung möglich. In den Jahren 2007 bis 2009 erstreckte sich die Beprobung jeweils über den Zeitraum vom Frühjahr bis Herbst im dreiwöchigen Beprobungsrhythmus.

Die Durchführung der faunistischen Untersuchungen erfolgten im gesamten Versuchszeitraum (2006 – 2009) durch das Ingenieurbüro AL Hussein mit Sitz in Halle/Saale. Zur Erfassung der oberirdischen Fauna dienten Barberfallen, die einen Öffnungsdurchmesser von 10,5 cm hatten und mit Formalinlösung (3 %) unter Zusatz von Detergenz gefüllt waren. Die Leerung der Fallen fand in monatlichen Abständen statt. Durch Kescherfänge, Handfänge sowie visuelle Beobachtungen wurden die in der Kraut- und Strauchschicht lebenden Schädlinge und Nützlinge bonitiert.

Die Bestimmung der Webspinnen (*Arachnida: Araneae*) erfolgte nach WIEHLE (1956; 1960), GRIMM (1985), ROBERTS (1985; 1987) sowie HEIMER & NENTWIG (1991). Zur Bezeichnung der Fauna wurde die Nomenklatur von PLATNICK (1993) herangezogen. Für die Auswertung der gefährdeten Arten bilden die Roten Listen der Bundesrepublik Deutschland (RLD) nach PLATEN et al. (1996) und des Freistaates Sachsens (RLSN) nach HIEBSCH & TOLKE (1996) die Grundlage.

Zur Determination der Laufkäfer dienten die Werke von FREUDE et al. (1976) und LOHSE & LUCHT (1989). Zur Einschätzung der Gefährdungssituation fanden die Roten Listen der BRD (RLD) nach TRAUTNER et al. (1997) und des Freistaates Sachsen (RLSN) nach ARNDT & RICHTER (1995) Verwendung. Die Nomenklatur der Laufkäfer orientiert sich an KLAUSNITZER (2004), der die bis dahin publizierten Revisionen berücksichtigt. Die Anmerkungen zu den ökologischen Ansprüchen der Spinnenarten (*Araneae*) erfolgten in erster Linie in Anlehnung an PLATEN et al. (1991).

### 3.1.3 Methodik der Ernte und Ertragsbestimmung

Die Plantage wurde in ihrer fünfjährigen Standzeit zweimal vollmechanisiert beerntet. Die erste Ernte erfolgte im Februar 2008 nach dreijähriger Standzeit mit einem Vollernter der Firma Claas. Die zweite Ernte wurde nach zweijährigem Umtrieb im Februar 2010 mit einem Mähhäcksler der Firma New Holland durchgeführt. Die Ernten erfolgten sortenweise getrennt, sodass für jeden Klon die exakte Biomasseleistung ermittelt werden konnte.

#### Ernte der 1. Rotation

Zur ersten Ernte im Februar 2008 herrschten optimale Witterungsbedingungen. Der Boden war gefroren und es lag kein Schnee. Zum Einsatz kam der Claas-Jaguar-Feldhäcksler mit dem Schwachholzvorsatz HS-2 (Abbildung 18). Es ist das einzige Aggregat, das bereits seit mehreren Jahren erfolgreich in der Praxis zur Beerntung von Kurzumtriebsflächen Anwendung findet. Der entwickelte Schwachholzvorsatz HS-2 ist in der Lage, Vollbäume in einem Arbeitsgang vom Stock zu trennen und über eine Einzugsvorrichtung einer modifizierten Hacktrommel zuzuführen. Diese zerkleinert die Vollbäume zu Hackschnitzeln mit einstellbaren Kantenlängen von 8 – 34 mm. Das Schneidwerk besteht aus zwei rotierenden, horizontal angeordneten Sägeblättern, die jeweils in 15 cm Schnitthöhe die Bäume einer Doppelreihe (0,75 m x 0,75 m) auf den Stock setzen (Abbildung 19). Ein Abweiser biegt die Triebe. Durch diese Vorspannung können sie optimal in die Häckseltrommel eingezogen werden. Von den Leistungsparametern ist das Aggregat so ausgelegt, dass Stämme bis 7 cm Wurzelhalsdurchmesser geerntet werden können.

Diese Stärke hatten die Pappeln und Weiden des Versuches im Februar 2008 bereits nach dreijähriger Wachstumsdauer erreicht. Mit dieser Maschine erfolgte praxisnah die sortenweise Beerntung der Versuchsfläche. Das so geworbene Erntegut wurde anschließend gewogen und in einer Trocknungsanlage in Niederbobritzsch mit der Abwärme einer Biogasanlage getrocknet.



Abbildung 18: Jaguar-Häcksler mit Schneidvorsatz

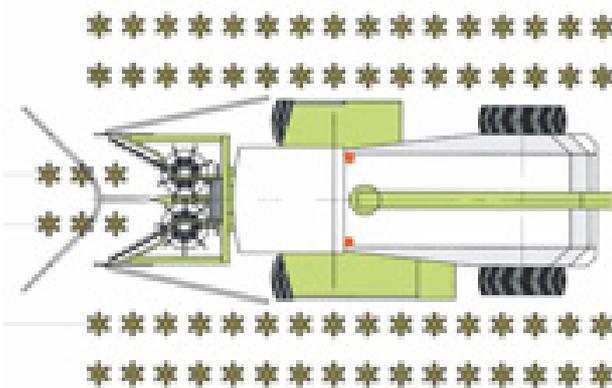
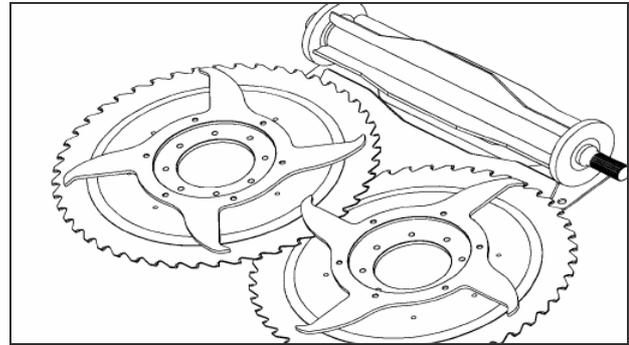


Abbildung 19: Holzschneidwerk/Doppelreihensystem des Jaguar-Feldhäckslers der Firma Claas mit Schwachholzvorsatz HS-2 (Quelle: www.claas.de)

**Ernte der 2. Rotation**

Die Ernte des 2. Umtriebes erfolgte nach zweijähriger Standzeit mit einem Vollernter der Firma New Holland (Abbildung 20). Der Holzerntevorsatz 130 FB kann im Doppel- oder Einzelreihenverband eingesetzt werden. Im Gegensatz zum Claas-Häcksler überlappen sich die Schneidmesser. Durch eine nachgeschaltete Paddelwalze werden die Triebe der Häckseltrommel zugeführt (Abbildung 21). Mit diesem Vorsatz können Stammstärken bis 15 cm bewältigt werden. Die Häcksellänge ist durch die Anzahl der Messer und von der Kabine aus durch die Trommeldrehzahl variiert (2\*6 Messer = 8 – 44 mm; 2\*8 Messer = 6 – 33 mm). Die Maschine kann eine Leistung von bis zu 2 ha/h erbringen.



**Abbildung 20: Schematische Darstellung des Häckslers sowie der Sägeblätter und Paddelwalze**  
(Quelle: New Holland)



**Abbildung 21: Einzug zur Hacktrommel; Erntevorgang**

Die Erntebedingungen waren im Februar 2010 nicht optimal. Es lag eine ca. 30 cm hohe Schneedecke. Die Zufahrt zur Fläche musste geräumt werden. Die Witterungsbedingungen stellten kein Problem für den Häckslers dar, jedoch für die Abfuhrfahrzeuge. Weil die Fläche leicht geneigt ist, wurden die Abfuhrbedingungen nach mehrmaligem Befahren immer schwieriger. Alle Traktoren mussten mit Schneeketten ausgestattet werden. Bei diesen erschwerten Bedingungen sind eine ausreichende Motorisierung und eine gute Bereifung von Traktoren und Anhängern unverzichtbar. Aufgrund der relativ hohen Schneedecke (ca. 30 – 40 cm) war eine bodennahe Beerntung nicht möglich. Dadurch wiesen die verbliebenen Stöcke eine Höhe von ca. 20 – 30 cm (Abbildung 22) auf. Des Weiteren wurde mit dem Erntegut sehr viel Schnee aufgenommen (Abbildung 23).



**Abbildung 22: Pappelstock nach Ernte im Februar 2010**



**Abbildung 23: Hackschnitzel mit hohem Eis- und Schneeanteil**

Zukünftige Ernten könnten durch zu enge Reihenabstände erschwert werden. Wie die Ernte 2010 zeigte, sind 1,5 m Reihenabstand mindestens notwendig, um einem Häcksler mit 800 mm breiten Reifen eine problemlose Durchfahrt zu gewährleisten. Bei noch enger werdenden Reihenabständen oder noch breiter ausladenden Stöcken besteht die Gefahr, die Reifen zu durchfahren, wie es Abbildung 24 auf einer anderen Fläche mit 1,3 m Reihenabstand zeigt. Um solche Materialschäden zu vermeiden, sollte ein Reihenabstand von 1,8 m angestrebt oder alternativ auf Forstbereifung zurückgegriffen werden, womit allerdings höhere Anschaffungskosten verbunden sind.



**Abbildung 24: Reifenschäden auf einer KUP bei Zschadras, Folge zu enger Reihenabstände**

### Ertragsbestimmung

Neben den tatsächlich gewogenen Erträgen zu den Ernten wurden aus den jährlichen Boniturdaten die Biomasseaufwüchse geschätzt. Die Schätzung erfolgte mittels der allometrischen Biomassefunktion nach Röhle (RÖHLE et al. 2006):

$$BM = a * BHD^b$$

Die Biomassefunktion wurde sortenweise aufgestellt. Dafür wurden für mehrere BHD-Stufen Einzeltriebgewichte ermittelt. Anschließend wurden die Parameter (a,b) für die Biomassefunktion über eine Regressionskurve ermittelt. Die aufgestellten Biomassefunktionen für die einzelnen Sorten befinden sich im Anhang 2. Die ermittelten Einzeltriebgewichte wurden mit der Triebzahl pro ha multipliziert, um den Biomasseaufwuchs der Sorten pro ha zu ermitteln. Die Biomassefunktion für die Sorten in Krummenhennersdorf wurde für dreijährige Triebe im Januar 2008 vor der 1. Ernte aufgestellt.

## 3.2 Ergebnisse

### 3.2.1 Anwuchsrate und Wildverbiss

Nach der Anpflanzung der Versuchsfläche Ende Mai 2005 erfolgte eine ständige Kontrolle der Bestände hinsichtlich der Anwuchsrate, des Schädlingsbefalls sowie eventueller Schäden durch Wildverbiss (Tabelle 16).

**Tabelle 16: Anwuchsrate, Wildverbiss und Ausfallraten am Ende des 1. Standjahres (2005), KUP Krummenhennersdorf**

Art	Sorte	Anzahl der Steckhölzer	Anwuchsrate	Wildverbiss	Ausfallrate
		[Stck/Sorte]			
Pappel	Weser 6	2217	57	0	43
	Max 3	1924	92	2	8
	Hybride 275	2308	92	5	8
	<i>Mittel</i>		<i>81</i>	<i>2</i>	<i>19</i>
Weide	Jorr	2386	98	50	2
	Sven	2403	94	47	6
	Tora	2481	92	45	8
	Tordis	2517	88	42	12
	Gudrun	2158	76	28	24
	<i>Mittel</i>		<i>90</i>	<i>42</i>	<i>10</i>

Die Bonituren zum Anwuchs der Steckhölzer zeigten bei der Mehrzahl der Pappel- und Weidensorten sehr hohe Anwuchsraten von > 90 %. Wichtige Voraussetzungen für den guten Anwuchserfolg waren das ausreichend tief gelockerte (25 cm), feinkrümelige Pflanzbett, die sehr gute Steckholzqualität und das sorgfältige Pflanzen (vollständiges Umfütern des Steckholzes mit Boden im Pflanzloch). Die bei der Sorte „Weser 6“ und „Gudrun“ beobachtete geringe bzw. mittlere Anwuchsrate ist vermutlich auf witterungs- und reliefbedingte (Hangneigung) Einwirkung von Staunässe zurückzuführen.

In den ersten zwei Monaten nach der Pflanzung schädigte Rehwild besonders die Weidenpflanzen durch Verbiss der Triebspitzen und jungen Blätter. Die Pappelsorten waren davon kaum betroffen. Dies führte zu einer stärkeren Verzweigung der Ruten. Auf Grund des Schadensumfanges erfolgte Anfang August die Einzäunung der Versuchsfläche. Im Herbst 2005 zeigte sich ein starkes Aufkommen an Mäusen (Abbildung 25). Daraufhin wurden Giftköder (Ratron) ausgebracht. Im Frühjahr 2006 waren nur wenige Bäume auf Grund des starken Wurzelverbisses abgestorben. Der Totalausfall beschränkte sich auf insgesamt ca. 10 bis 20 Weiden im ganzen Versuch. Im Jahr 2009 traten an den einjährigen Trieben der Pappel vereinzelt Windbruchschäden auf.



**Abbildung 25: links: Wühlmäuse/Schermäuse 2005; rechts: Schäden durch Windbruch 2009**

### 3.2.2 Wachstumsparameter

#### 3.2.2.1 Wuchshöhe

Abbildung 26 veranschaulicht die Wuchshöhen aller Standjahre in den beiden Rotationen. Die drei Pappelsorten wiesen in beiden Umtrieben durchschnittlich höhere Wuchshöhen als die Weide auf. Zum Ende der 1. Rotation (R1) lag die Wuchshöhe der Pappeln zwischen 5,3 und 6,1 m. Zwischen den 3 Pappelsorten gab es keine signifikanten Unterschiede im Höhenwachstum (Tukey,  $p = 0,05$ ). Die Höhen der Weiden schwankten zwischen 3,3 m bei der Sorte „Gudrun“ und 6,1 m bei der Sorte „Tora“. In der 2. Rotation (R2), nach der ersten Ernte, vollzog sich ein enormes Höhenwachstum. Bereits im ersten Standjahr erreichten die meisten Klone Höhen, die sie erst nach zweijähriger Standzeit in der ersten Rotation aufwiesen. Die einjährigen Triebe der Pappeln waren 3,5 bis 3,8 m hoch. Die einjährigen Triebe der Weiden bewegten sich zwischen 2,9 und 4,6 m Höhe. Im 2. Standjahr erreichten die Pappeln Höhen von ca. 6,7 m. Der wüchsigste Pappelklon war in beiden Rotationen „Max 3“. Bis auf „Gudrun“ bewegten sich die Weidenklone in einem Höhenrahmen zwischen 5,7 und 7 m. Der Klon „Gudrun“ hatte mit 4,6 m, ähnlich wie in der ersten Rotation, das niedrigste Höhenwachstum. Im Gegensatz zu „Tora“ in der ersten Rotation erreichte der Weidenklon „Tordis“ mit durchschnittlich 7 m die höchsten Triebe in der 2. Rotation. Die Weidensorten unterschieden sich signifikant in ihrem Höhenwachstum (Tukey,  $p = 0,05$ ). Zwischen den Sorten „Jorr“ und „Sven“ sowie zwischen „Tora“ und „Tordis“ gab es keine signifikanten Unterschiede im Höhenwachstum (Tukey,  $p = 0,05$ ).

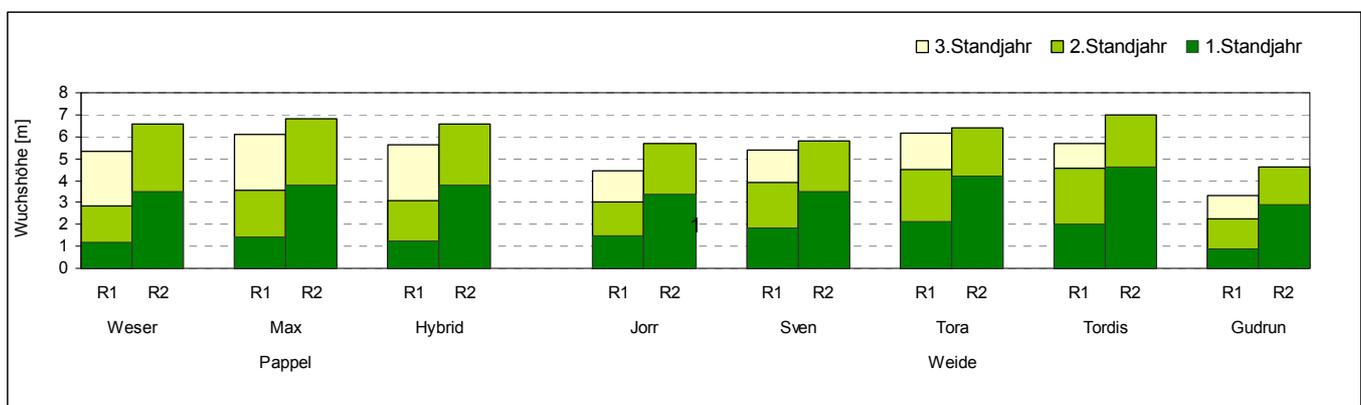


Abbildung 26: Wuchshöhen der Pappel- und Weidenklone in den einzelnen Standjahren der KUP Krummenhennersdorf (R1 = 1. Rotation; R2 = 2. Rotation)

#### 3.2.2.2 Wurzelhalsdurchmesser (WHD)

Der Wurzelhalsdurchmesser ist eine wichtige Kenngröße für den Erntezeitpunkt einer Plantage. Je nach Erntemethode schwanken die von der Technik zu bewältigenden Durchmesser sehr stark. Der bei der ersten Ernte 2008 eingesetzte Vollernter der Firma Claas konnte Wurzelhälse bis 7 cm Durchmesser schneiden. Der Vollernter der Firma New Holland, welcher 2010 zum Einsatz kam, erreicht seine Arbeitsgrenze bei 15 cm Wurzelhalsdurchmesser. Bei den bonitierten Stöcken wurde jeweils der stärkste Wurzelhals erfasst.

Tabelle 17 zeigt die Mittelwerte der gemessenen Wurzelhalsdurchmesser aller Versuchsjahre. Die Wurzelhalsdurchmesser der Pappeln sind ca. 0,5 bis 1,5 cm stärker als die der Weiden. Zum Ende der ersten Rotation wiesen die Pappeln durchschnittliche Wurzelhalsdurchmesser von 5,3 und die Weiden von 4,5 cm auf. Nach der 2. Rotation lagen die durchschnittlichen Wurzelhälse bei den Pappeln bei 4,9 und bei den Weiden bei 3,1 cm. Bei den Pappeln hat die Sorte „Weser“ einen signifikant stärkeren Durchmesser als die Sorten „Max 3“ und „Hybrid 275“ (Tukey,  $p = 0,05$ ). Bei den Weiden gibt es ebenfalls signifikante Unterschiede in der Stärke der Wurzelhalsdurchmesser (Tabelle 17). In der zweiten Rotation traten bei den Pappeln vereinzelt Überstärken von bis zu 10 cm auf, was eine Ernte bereits nach 2 Standjahren zur Folge hatte.

**Tabelle 17: Wurzelhalsdurchmesser in cm der Pappel- und Weidensorten der KUP Krummenhennersdorf (Mittelwerte), unterschiedliche Buchstaben = signifikante Unterschiede (Tukey, p = 0,05)**

Umtrieb	Standjahr	Pappeln				Weiden					
		Weser 6	Max 3	Hybrid 275	Mittel	Jorr	Sven	Tora	Tordis	Gudrun	Mittel
1. Rotation	1	1,5	1,5	1,4	1,5	1,1	1,3	1,6	1,5	1,0	1,3
	2	3,2	3,3	3,0	3,2	2,3	2,6	3,1	2,7	1,9	2,8
	3	5,5	5,2	5,2	5,3	3,6	4,1	4,6	3,8	3,5	4,5
2. Rotation	1	2,7	2,6	3,1	2,8	1,8	1,9	2,4	2,3	2,0	2,4
	2	5,5 <sup>a</sup>	4,4 <sup>b</sup>	4,8 <sup>b</sup>	4,9	2,7 <sup>a</sup>	2,8 <sup>ab</sup>	3,3 <sup>c</sup>	3,4 <sup>c</sup>	3,1 <sup>b</sup>	3,1

rot  $\triangleq$  Höchstwert des Standjahres

### 3.2.2.3 Brusthöhendurchmesser (BHD)

In der Ertragsschätzung ist der Brusthöhendurchmesser die wichtigste Kenngröße. Über ihn und die Anzahl der Triebe pro ha kann der Biomasseaufwuchs von Kurzumtriebsplantagen bestimmt werden. Bei allen bonitierten Stöcken wurde in 1,30 m Höhe bei jedem Trieb der Brusthöhendurchmesser gemessen. Die stärksten Triebe traten in der 1. Rotation bei der Pappelsorte „Max 3“ mit 3,6 cm auf. In der 2. Rotation wies der Klon „Hybrid 275“ mit 2,4 cm das größte Dickenwachstum auf. Die Durchmesser des 2. Standjahres der 2. Rotation waren aufgrund der Ausschlagskraft der Wurzelstöcke stärker als im 2. Standjahr der 1. Rotation. Die Sorte „Max 3“ hat in der 2. Rotation mit 2 cm einen signifikant niedrigeren Brusthöhendurchmesser als die Sorten „Weser 6“ und „Hybrid 275“. Die Weidensorten wiesen geringere Durchmesser als die Pappeln auf. Es gab signifikante Unterschiede zwischen den Sorten (Tabelle 18). Die stärksten Triebe hatte zum Ende der 1. Rotation der Klon „Tora“. In der zweiten Rotation wiesen die Klone „Tora“ und „Tordis“ gleiche Durchmesserbereiche auf. Die schwächsten Triebe wurden bei der Sorte „Gudrun“ gemessen.

**Tabelle 18: Brusthöhendurchmesser in cm der Pappel- und Weidensorten der KUP Krummenhennersdorf (Mittelwerte), unterschiedliche Buchstaben = signifikante Unterschiede (Tukey, p = 0,05)**

Umtrieb	Standjahr	Pappeln				Weiden					
		Weser 6	Max 3	Hybrid 275	Mittel	Jorr	Sven	Tora	Tordis	Gudrun	Mittel
1. Rotation	1	0,3	0,5	0,3	0,4	0,4	0,6	0,8	0,7	/	0,6
	2	1,3	2,2	1,6	1,7	1,3	1,7	2,1	1,9	0,8	1,6
	3	3,5	3,6	3,5	3,5	2,0	2,5	2,8	2,3	1,5	2,2
2. Rotation	1	1,1	1,1	1,2	1,1	0,9	1,0	1,1	1,1	0,9	1,0
	2	2,3 <sup>a</sup>	2,0 <sup>b</sup>	2,4 <sup>a</sup>	2,2	1,5 <sup>ab</sup>	1,6 <sup>bc</sup>	1,7 <sup>cd</sup>	1,7 <sup>d</sup>	1,4 <sup>a</sup>	1,6

rot  $\triangleq$  Höchstwert des Standjahres

### 3.2.2.4 Anzahl der Triebe/Baum

Zu den Bonituren wurden von jedem aufgenommenen Stock die Anzahl der Triebe ermittelt. Tabelle 19 veranschaulicht die Anzahl der Triebe für alle Sorten in allen Versuchsjahren. Die Pappeln erreichten in der 1. Rotation ca. 1,2 Triebe pro Baum, die Weiden 1,8. Die meisten Triebe erschienen bei der Pappelsorte „Weser 6“ und den Weidensorten „Gudrun“ und „Jorr“. Nach der ersten Ernte hat sich die Anzahl der Triebe vervielfacht. Im ersten Standjahr der 2. Rotation hatten die Pappeln durchschnittlich 5,3 und die Weiden durchschnittlich 11,6 Triebe. Im 2. Standjahr verringerte sich die Anzahl der Triebe bei den Pappeln auf 4,1 und bei den Weiden auf 8,5 Triebe pro Baum. Ursache dafür könnte das schnelle Wachstum und die somit auftretende Konkurrenz nach Licht sein, was zu einem Ausdunkeln schwächerer Triebe führte. Im ersten Jahr nach der Ernte hatten die Klone „Weser 6“ und „Jorr“ die meisten Triebe. Im 2. Standjahr wiesen die Pappelsorten „Max 3“ und die Weidensorte „Gudrun“ die meisten Triebe auf. Die Pappelsorte „Hybrid 275“ hatte signifikant weniger Triebe/Baum als die Klone „Weser 6“ und „Max 3“. Bei den Weiden hatten die Sorten „Jorr“, „Tora“ und „Tordis“ signifikant weniger Triebe als „Sven“ und „Gudrun“.

**Tabelle 19: Triebzahlen der verschiedenen Pappel- und Weidenklone der KUP Krummenhennersdorf, unterschiedliche Buchstaben = signifikante Unterschiede (Tukey, p = 0,05)**

Umtrieb	Standjahr	Pappeln				Weiden					
		Weser 6	Max 3	Hybrid 275	Mittel	Jorr	Sven	Tora	Tordis	Gudrun	Mittel
1. Rotation	1	1,6	1,3	1,4	1,4	2,0	1,6	1,8	1,7	1,5	1,7
	2	1,2	1,2	1,2	1,2	2,0	1,6	1,7	1,8	1,7	1,8
	3	1,1	1,2	1,2	1,2	1,9	1,6	1,8	1,8	2,1	1,8
	Mittel	1,3	1,2	1,2		2,0	1,6	1,8	1,8	1,8	
2. Rotation	1	5,9	5,8	4,2	5,3	13,7	12,4	9,0	9,5	13,2	11,6
	2	4,3 <sup>a</sup>	4,7 <sup>a</sup>	3,4 <sup>b</sup>	4,1	7,3 <sup>a</sup>	9,5 <sup>b</sup>	7,7 <sup>a</sup>	7,8 <sup>a</sup>	10,5 <sup>b</sup>	8,5
	Mittel	5,1	5,3	3,8		10,5	10,9	8,3	8,7	11,8	

rot  $\triangleq$  Höchstwert

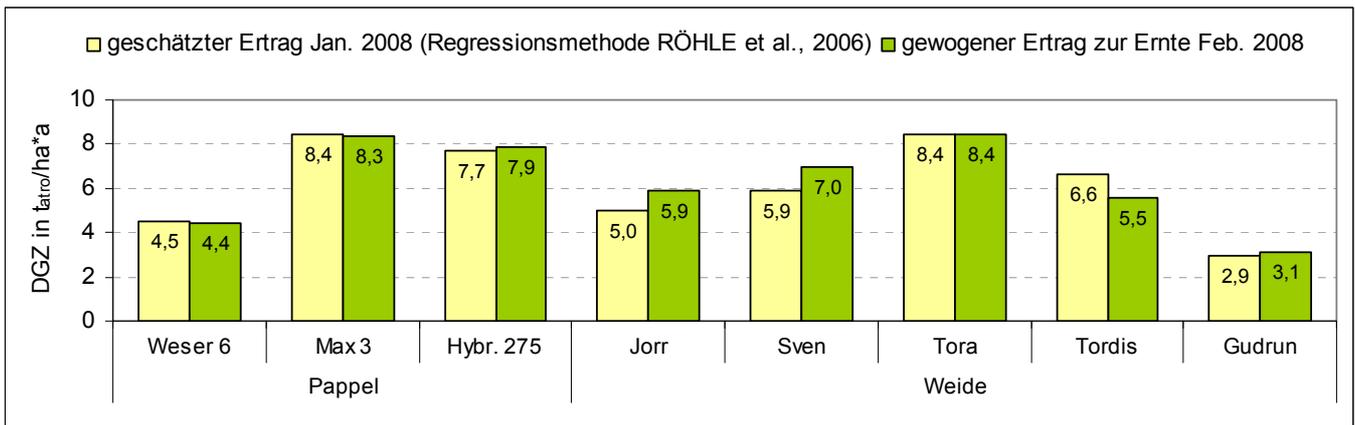
Um die Gesamttriebzahl je Sorte zu berechnen, ist die Anzahl der Triebe pro Baum mit der Anzahl der angewachsenen Steckhölzer pro Sorte zu multiplizieren. Tabelle 20 zeigt die deutlichen Unterschiede in der Anzahl der Triebe beider Rotationen. Erreichten die Pappeln in der 1. Rotation ca. 7.000 – 13.000 Triebe pro ha, so verdrei- bis vervierfachte sich dies in der 2. Rotation auf 27.000 – 51.000 Triebe pro ha. Die Weiden wiesen in der 1. Rotation ca. 17.000 – 20.000 Triebe pro ha auf. Durch die vermehrte Triebzahl nach der Ernte vervielfachte sich die Anzahl der Triebe pro ha auf ca. 80.000 – 100.000 Triebe.

**Tabelle 20: Anzahl der Triebe/ha zum Ende beider Rotationen der KUP Krummenhennersdorf**

Art	Sorte	Bäume [Stck/ha]	Ende 1. Rotation		Ende 2. Rotation	
			Triebe je Baum	Triebe/ha	Triebe je Baum	Triebe/ha
Pappel	Weser 6	6.247	1,1	6.872	4,3	26.862
	Max 3	10.922	1,2	13.106	4,7	51.333
	Hybrid 275	10.528	1,2	12.634	3,4	35.795
Weide	Jorr	11.551	1,9	21.947	7,3	84.322
	Sven	11.170	1,6	17.872	9,5	106.115
	Tora	11.319	1,8	20.374	7,7	87.156
	Tordis	10.909	1,8	19.636	7,8	85.090
	Gudrun	8.148	2,1	17.111	10,5	85.554

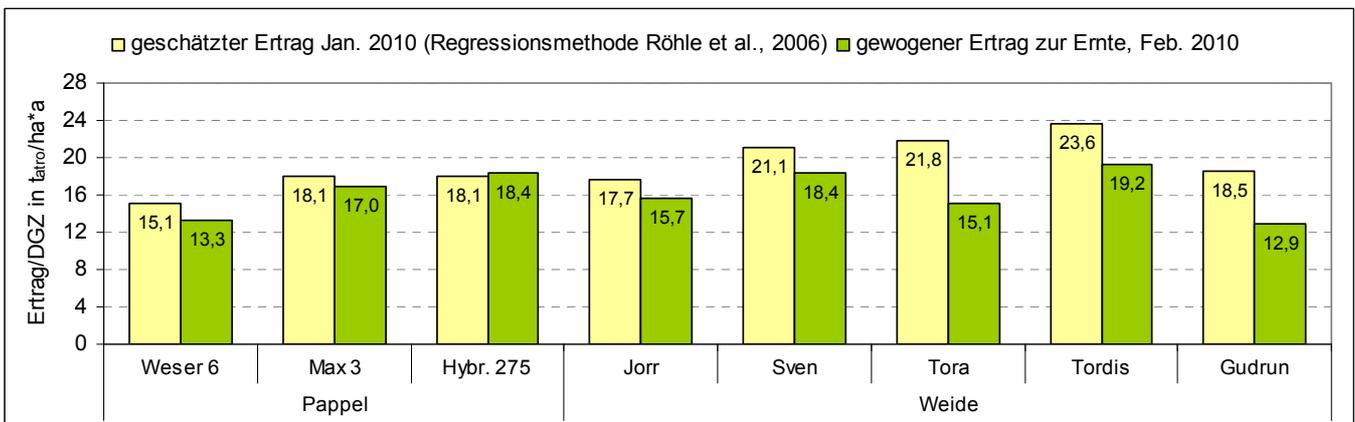
### 3.2.2.5 Erträge

In Abbildung 27 sind die nach der Biomassefunktion nach RÖHLE (siehe 3.1.3 sowie Anhang 2) geschätzten Erträge des Jahres 2008 den tatsächlichen Erntemengen gegenübergestellt. Aufgrund der zeitlichen Nähe zwischen Aufstellen der Biomassefunktion und Ernte der Aufwüchse sind die Differenzen zwischen geschätztem und gewogenem Ertrag sehr gering. Die Funktion nach RÖHLE ist also eine gute Schätzmethode, mit der man relativ genau den Biomasseaufwuchs ermitteln kann. Die höchsten Ertragsleistungen brachten die Klone „Max 3“ und „Tora“. Die geringe Biomasseleistung der Sorte „Weser 6“ ist auf die hohen Ausfälle der Stecklinge im Begründungsjahr zurückzuführen. Die Weidensorte „Gudrun“ hatte mit 3,1 t TM/ha\*a die niedrigste Ertragsleistung.



**Abbildung 27: Vergleich geschätzter und tatsächlicher Ertrag des 1. Umtriebes (3 Jahre) der KUP Krummenhennersdorf**

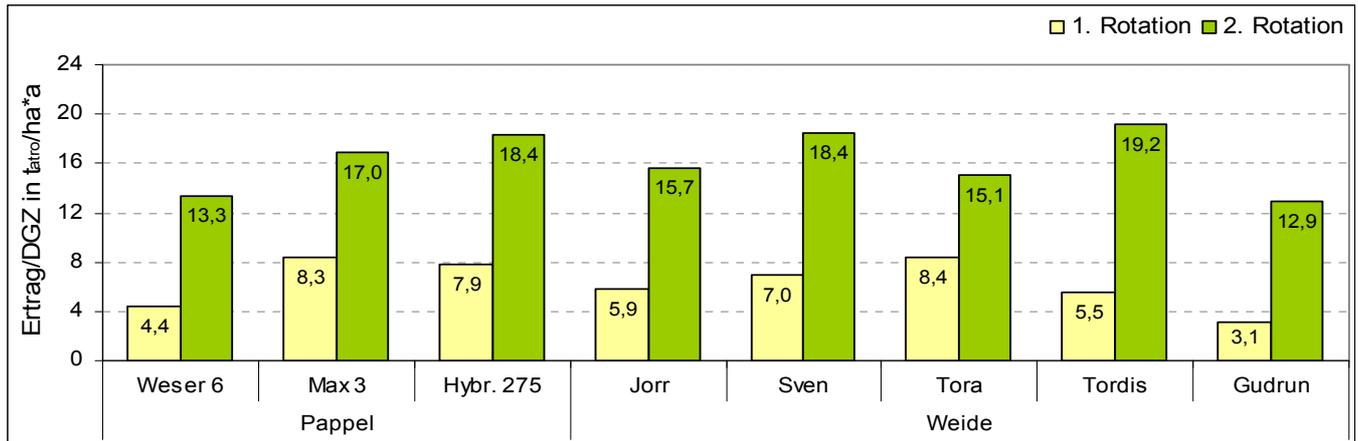
Mit den Boniturdaten aus dem Jahr 2010 und der 2008 aufgestellten Formel wurden die Biomasseerträge der 2-jährigen Triebe erneut geschätzt. 2010 wurde die geschätzte Ertragsleistung mittels der Funktion nach RÖHLE im Vergleich zu den tatsächlich ermittelten Erträgen durchschnittlich um drei Tonnen überschätzt (Abbildung 28). Die Schätzung 2010 ist damit wesentlich ungenauer als die Ertragsschätzung 2008. Das liegt zum einen daran, dass die Boniturdaten der zweijährigen Triebe 2010 mit einer für dreijährige Triebe der 1. Rotation aufgestellten Formel von 2008 berechnet wurden. Die genaue Anwendbarkeit und Übertragbarkeit einer bereits aufgestellten RÖHLE -Funktion auf andere Wuchsjahre und Umtriebe ist noch nicht endgültig geklärt. Zu dem Thema laufen noch Studien an der TU Dresden, die die optimale Methode zur Ertragsermittlung untersuchen. Zum anderen ist der durch die große Schneehöhe bedingte hohe Schnitt zu berücksichtigen.



**Abbildung 28: Vergleich geschätzter und tatsächlicher Ertrag des 2. Umtriebes (3 Jahre) der KUP Krummenhennersdorf**

Abbildung 29 zeigt die geernteten Erträge beider Rotationen im Vergleich. Die durchschnittliche Ertragsleistung der 1. Rotation lag bei ca. 6 t TM/ha\*a. Hier waren die Sorten „Max 3“ und „Tora“ diejenigen mit dem höchsten Ertrag. Die Biomasseleistung hat sich in der 2. Rotation fast verdreifacht. Als wüchsigste Pappelsorte hat sich in dieser Rotation die Sorte „Hybrid 275“ mit 18,4 t TM/ha\*a erwiesen. Bei den Weiden erreichte die Sorte „Tordis“ mit 19,2 t TM/ ha\*a die höchste Ertragsleistung. Der Grund dafür liegt im stärksten Brusthöhendurchmesser von 17,4 mm der Weidensorten sowie der relativ hohen Anzahl von 7,8 Trieben pro Baum. Ein gutes Ertragsniveau ist ebenso für die Sorte „Sven“ festzustellen. Die durchschnittliche Ertragsleistung der Fläche lag bei ca. 16 t TM/ha\*a. Der vergleichsweise geringe Flächenertrag der Sorten „Weser 6“ und „Gudrun“ ist im Zusammenhang mit der zum Soll deutlich reduzierten Bestandesdichte durch Ausfall der gepflanzten Steckhölzer aufgrund von Staunässe zu sehen (Tabelle 16). Hatten in der 1. Rotation noch die Pappeln mehr Ertragsleistung, so erreichten in der 2. Rotation die Weiden ähnliche Erträge. „Tordis“ übertraf mit 19,2 t TM/ha\*a sogar die Pappeln. Der enorme Ertragszuwachs ist

auf die sehr gute Wasserversorgung des Standortes, die gut ausgebildeten Wurzelstöcke sowie die hohe Anzahl der Triebe pro Baum zurückzuführen.



**Abbildung 29: Durchschnittlicher Gesamtwuchs (DGZ) der Pappel- und Weidenklone am Standort Krummenhennersdorf zur 1. Rotation (dreijähriger Umtrieb) und zur 2. Rotation (zweijähriger Umtrieb)**

Auf der Kurzumtriebsplantage in Krummenhennersdorf konnte in den ersten sechs Versuchsjahren eine enorme Wuchsdynamik beobachtet werden. Einige Eindrücke vermittelt die nachfolgende Abbildung 30.



Juli 2005



September 2005



Oktober 2005



April 2008



Mai 2008



August 2008



Februar 2009



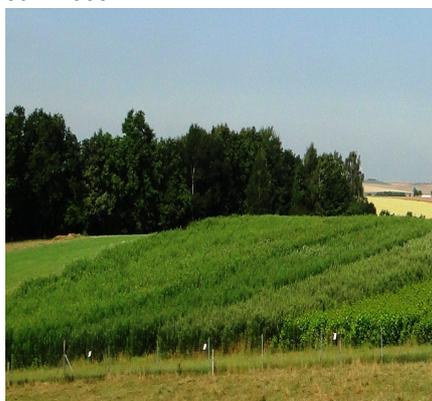
Juni 2009



Januar 2010



März 2010



Juli 2010

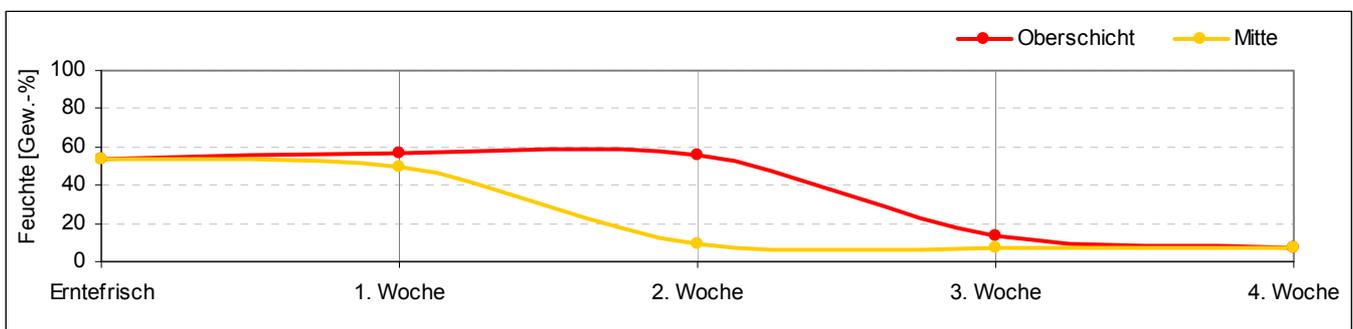


Oktober 2010

**Abbildung 30: Entwicklung KUP Krummenhennersdorf 2005 – 2010**

### 3.2.3 Trocknung der Hackschnitzel

Im Rahmen der **1. Ernte** im Jahr 2008 wurde das Erntegut einem Trocknungsversuch unterzogen. Das frisch geerntete Holz wies noch einen hohen Wassergehalt (53,7 %) auf und unterlag im Lager stärkeren Substanzverlusten durch Erwärmung und Schimmelbildung. Zur stabilen, verlustarmen Lagerung ist das Hackgut auf einen Wassergehalt von  $\leq 20$  % Wasser zu trocknen. Im Vergleich zu einer natürlichen Trocknung durch Wind- und Sonnenenergie sowie biologische Selbsterwärmung erlauben die Verfahren der technischen Trocknung eine rasche Abtrocknung des Materials. Die Substanz- und Energieverluste liegen nur bei ca. 2 %. Die natürliche Trocknung führt zu Substanzverlusten von 20 – 25 % bei Mittelhackgut (SCHOLZ, 2007). Im durchgeführten Versuch mit dem relativ feinen Hackgut (Kantenlänge 20 – 34 mm) wurde das Warmluftverfahren mit Abwärme (BHKW) einer Biogasanlage genutzt. Die Warmluft (ca. 30°C) wurde über eine Unterflurbelüftungsanlage in den 1,50 m hohen Stapel geführt, so dass sich der Trocknungsprozess von innen nach außen vollzog. Innerhalb der ersten zwei Wochen erfolgte zunächst im Kern des Stapels eine rasche Abtrocknung des Hackgutes auf einen Wassergehalt von 9 %. In der äußeren Schicht (Randzone) des Stapels stieg der Wassergehalt durch Kondensation des aus dem Inneren des Stapels aufsteigenden Wassers zunächst an. Erst in der dritten Woche konnte ein wirksamer Trocknungseffekt nachgewiesen werden (Abbildung 31). Im Vergleich zu einer natürlichen Trocknung, die mehrere Monate erfordert, ist durch die Warmbelüftung ein zuverlässiger Trocknungserfolg in kurzer Zeitspanne zu erreichen. Die 67 Tonnen Frischmasse der ersten Ernte ergaben 31 Tonnen Trockenmasse.



**Abbildung 31: Verlauf der Hackschnitzeltrocknung in der Biogasanlage Bieberstein, 2008**

Bei der **2. Ernte** im Februar 2010 wurde mit dem Erntegut sehr viel Schnee aufgenommen (Abbildung 32). Die Folge war ein überdurchschnittlich hoher Wassergehalt der Hackschnitzel. Bei normalen Erntebedingungen haben Holz hackschnitzel einen Trockensubstanzgehalt von 45 – 50 %. Aufgrund des hohen Schneeanteils lag der Trockensubstanzgehalt nur bei 30 – 35 %. Die Hackschnitzel dieser Ernte wurden durch Abwärme des BHKW's der Biogasanlage in Bieberstein getrocknet. Aufgrund des hohen Wassergehaltes der Hackschnitzel dauerte die Trocknung sehr lange und verlief durch die eingeschlossenen Eisklumpen sehr inhomogen. Insgesamt wurden 156 Tonnen Frischmasse der Trocknung zugeführt. Nach der Trocknung hatten die Hackschnitzel einen Wassergehalt zwischen 5 – 10 %. Zur weiteren Verwertung (siehe Kapitel 4.1.4) wurden 46 Tonnen getrocknete Hackschnitzel an das LVG Köllitsch geliefert. Somit lag die Trockenmasse der Hackschnitzel nur bei etwa 30 %, was wiederum bedeutet, dass das Erntegut mit 70 % Wassergehalt (incl. Schnee) von der Fläche abgefahren wurde.



**Abbildung 32: Trocknung der Hackschnitzel in der Trockenhalle der Biogasanlage Bieberstein, Hackgut z. T. stark mit Eis und Schnee durchsetzt**

### 3.2.4 Qualität der Hackschnitzel

Die Eingruppierung der Holzhackschnitzel erfolgt je nach Kantenlänge und Wassergehalt in drei verschiedene Hackgut- und fünf verschiedene Wassergehalts-Klassen (Tabelle 21; Tabelle 22).

**Tabelle 21: Hackschnitzel- Klassifizierung nach Ö-Norm**

Hackgut-Klasse	zulässige Bandbreite für Teilchengröße (Siebanalyse)				zulässige Extremwerte für Teilchen	
	max. 20%	60 – 100%	max. 20%	max. 4%	max. Querschnitt	Länge
G 30	> 16,0 mm	16,0 – 2,8 mm	1,8 – 1 mm	< 1mm	3 cm <sup>2</sup>	8,5 cm
G 50	> 31,5 mm	31,5 – 5,6 mm	5,6 – 1 mm	< 1mm	5 cm <sup>2</sup>	12,0 cm
G 100	> 63,0 mm	63,0 – 11,2 mm	11,2 – 1 mm	< 1mm	10 cm <sup>2</sup>	25,0 cm

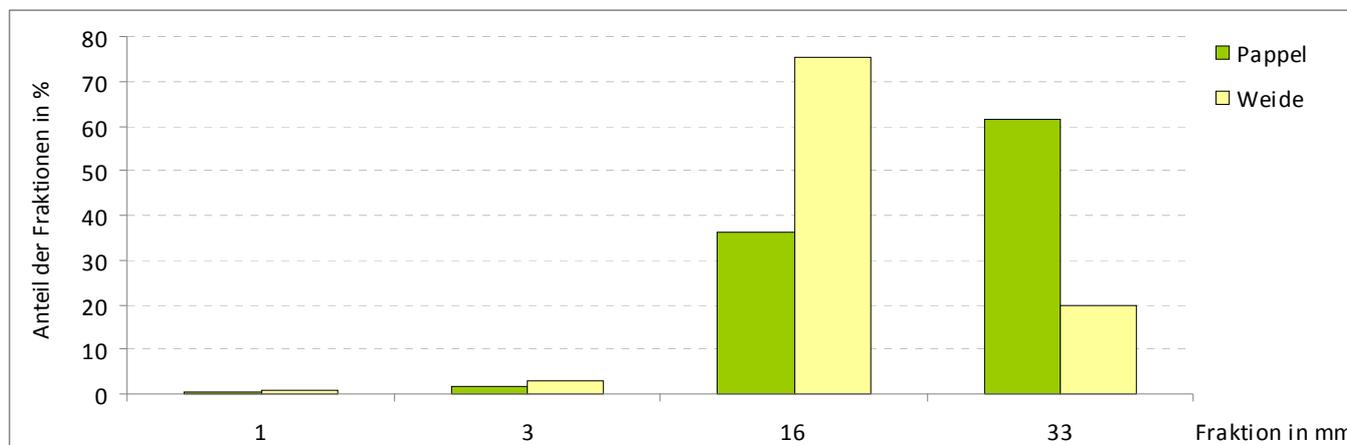
**Tabelle 22: Klassifizierung der Wassergehalts-Klassen von Hackschnitzeln nach Ö-Norm**

Wassergehalts-Klasse (Wassergehalt bezogen auf feuchte Masse)	Klassengrenzen	Erläuterungen
W 20	< 20 %	lufttrocken
W 30	20 – 30 %	lagerbeständig
W 35	30 – 35 %	beschränkt lagerbeständig
W 40	35 – 40 %	feucht
W 50	40 – 50 %	erntefrisch

Je nach Feuerungsanlage ist die einzuhaltende Hackschnitzel-Qualität vorgegeben. Der Biomasseheizkessel im LVG Köllitsch, in dem die Hackschnitzel der Ernte 2010 verbrannt wurden, fordert die Einhaltung der Hackgut-Klasse G 50 und eines Wassergehaltes von unter 25 % (W 25).

Unter Federführung der TU Dresden, Professur für Forst- und Holzwirtschaft Osteuropas, wurden zur Ernte Hackschnitzelproben von Pappel und Weide entnommen, um eine Fraktionierung der Größenverteilung durchzuführen. Beide Baumarten wurden mit der gleichen Häckslereinstellung (2\*8 Messer = 6 – 33 mm) beerntet. Abbildung 33 zeigt die Größenverteilung. Den größten Anteil nehmen die Fraktionen von 16 bis 33 mm ein. Der Feinanteil unter 5 % und das Fehlen größere Fraktionen lässt auf eine sehr homogene Häckselqualität schließen. Trotz gleicher Häckslereinstellung unterscheiden sich die Massenanteile von Pappel und Weide in den 16 und 33 mm Fraktionen. Die Weide ist mengenmäßig in der 16 mm Fraktion stärker vertreten, wohingegen die Pappel die größten Hackschnitzelanteile in der 33 mm Fraktion aufweist. Die Ursache dafür liegt in den dünneren Trieben der Weide zum Erntezeitpunkt. Die Pappel hat aufgrund der stärkeren Durchmesser einen größeren Holzanteil.

Mit einer Hackgutklasse G 50 und einer Wassergehaltsklasse W 20 (8 – 10 %) hatten beide Holzarten eine gute Qualität und entsprachen den Anforderungen des Heizkessels.



**Abbildung 33: Fraktionierung der Hackschnitzel zur Ernte der KUP Krummenhennersdorf 2010, Erntemaschine New Holland (TU Dresden)**

### 3.2.5 Nährstoff- und Schwermetallentzüge

Auf der Versuchsanlage wurden jährlich Blatt- und Holzproben aller Sorten entnommen, um die Nährstoffgehalte und den Schwermetalltransfer in die Pflanze zu bestimmen. Die Gehalte der einzelnen Sorten ähnelten sich stark. In Tabelle 23 sind die Werte für die Arten Pappel und Weide zusammengefasst dargestellt. Wie die Analyse der Nährstoffgehalte der Holztrockenmasse zeigt, bestehen zwischen den Baumarten Pappel und Weide ebenfalls kaum Unterschiede. Kalium ist im Vergleich zu halmgutartigen Biomassen in niedriger Konzentration in den Baumarten vorhanden. Dadurch hat Holz einen höheren Ascheschmelzpunkt und somit ein besseres Abbrandverhalten. Die Asche neigt weniger zur Verschlackung. Weiterhin ist die Nährstoffzusammensetzung auch für den geringen Aschegehalt von ca. 2 % der Holzbiomasse verantwortlich. Dagegen liegen in halmgutartigen Biomassen die Aschegehalte zwischen 5 und 8 %, was wiederum den Zyklus der Ascheentleerung und die Emission von Feinaschepartikeln im Rauchgasstrom bei einer thermischen Verwertung von halmgutartigen Biomassen bedingt. Die Gehalte an Kohlenstoff liegen in der Größenordnung von 49 bis 50 % in der Trockenmasse.

**Tabelle 23: Nährstoffgehalte in den Pappeln und Weiden der KUP Krummenhennersdorf**

		N	P	K	Mg	Ca	C	Asche
		<b>Gehalte in den Blättern ( September 2006 – September 2009) [% der TS]</b>						
	Min	1,63	0,21	0,91	0,22	1,32	46,10	6,17
Pappel	<i>Mittel</i>	2,20	0,30	1,31	0,26	1,99	49,08	8,36
	Max	2,86	0,45	2,27	0,37	3,45	51,39	12,45
	Min	0,89	0,11	0,83	0,21	1,36	47,89	6,92
Weide	<i>Mittel</i>	2,74	0,30	1,32	0,28	2,23	49,06	8,49
	Max	3,28	0,38	1,85	0,39	3,34	50,65	10,61
		<b>Gehalte im Stamm (Februar 2007 – Februar 2010) [% der TS]</b>						
	Min	0,32	0,06	0,20	0,03	0,22	49,52	1,01
Pappel	<i>Mittel</i>	0,63	0,11	0,29	0,07	0,49	50,49	1,90
	Max	1,02	0,16	0,47	0,10	0,68	52,23	2,83
	Min	0,44	0,08	0,12	0,03	0,28	46,40	1,07
Weide	<i>Mittel</i>	0,66	0,10	0,26	0,06	0,50	49,93	1,80
	Max	1,08	0,15	0,43	0,08	0,89	52,43	2,76

Die Analysen der Nährstoff-, Arsen- und Schwermetallgehalte in den Blättern der Pappel- und Weidensorten erlauben eine Wertung, in welchem Umfang diese Stoffe in die einzelnen Pflanzenteile der oberirdischen Biomasse eingelagert werden.

Betrachtet man die Gehalte an Arsen und Schwermetallen in der Holztrockenmasse, weisen die Weidensorten höhere Werte für Cadmium und Zink auf als die geprüften Pappelsorten (Tabelle 24). Die Gehalte an Cadmium betragen bei der Weide in den Blättern und dem Stammholz ca. das 2,5-fache der Gehalte in den Pappeln. Für Zink wurde eine 1,7-fache Konzentration im Holz und den Blättern der Weiden festgestellt. Damit übertreffen die schnell wachsenden Baumarten den Zinkgehalt der meisten landwirtschaftlichen Kulturen (KATALYMOW 1969). Aus den Untersuchungen wird deutlich, dass beide Baumarten in höherer Konzentration den Mikronährstoff Zink enthalten. Hier ist eine Kontrolle der Bodengehalte notwendig. Ebenso ist der durchschnittliche Bleigehalt in den Blättern der Weiden fast doppelt so hoch wie in den Pappelblättern. Die Untersuchungen bestätigen, dass es sich bei der Weide um eine Pflanze mit verstärkter Akkumulation handelt (BUNGART 1999; RÖHRICHT et al. 2002; SCHOLZ et al. 2000). Für die übrigen analysierten Schwermetalle und für das Arsen liegen die Gehalte der Pappeln und Weiden etwa auf einem Niveau.

Wie der Vergleich zeigt, sind die Makronährstoffe in wesentlich höherer Konzentration in der Blatttrockenmasse als in der Holztrockenmasse vertreten. Somit ist die Blattmasse, die im Kreislauf Boden-Pflanze verbleibt, mineralstoffreicher (höherer Aschegehalt) als die Holzbiomasse. Im Vergleich der Nährstoffe weisen die Blätter wie auch die Holzbiomasse höhere Gehalte an Stickstoff, Kalzium und Kalium als an Phosphor und Magnesium auf. Zwischen den Baumarten und -sorten wiederum sind kaum Unterschiede in der Konzentration bei den einzelnen Nährstoffen zu beobachten.

**Tabelle 24: Gehalte an Schwermetallen und Arsen in Pappeln und Weiden der KUP Krummenhennersdorf**

		As	Cd	Pb	Cu	Zn
		Gehalte in den Blättern ( September 2006 – September 2009) [mg/kg TS]				
Pappel	Min	0,19	3,99	1,82	7,67	200,42
	Mittel	0,45	10,64	3,90	9,57	517,11
	Max	0,80	19,63	6,54	13,23	933,96
Weide	Min	0,23	10,06	2,40	6,84	368,03
	Mittel	0,55	27,24	6,58	9,03	810,64
	Max	1,52	55,29	11,70	11,33	1369,29
		Gehalte im Stamm (Februar 2007 – Februar 2010) [% der TS]				
Pappel	Min	0,05	1,90	1,21	2,08	55,04
	Mittel	0,12	3,94	2,11	4,02	83,50
	Max	0,22	9,33	2,85	6,14	122,75
Weide	Min	0,08	5,39	0,69	3,24	91,41
	Mittel	0,14	10,11	2,17	4,67	141,84
	Max	0,33	15,91	3,71	7,25	210,03
unbelastete Fläche*		< 0,03	0,64	0,90	3,30	

\* nach RÖHRICHT ET AL., 2002

Durch die Holzbiomasse werden dem Boden vor allem Stickstoff (ca. 63 – 66 kg/ha\*a bei einem angenommenen Ertrag von 10 t TM/ha\*a) und Calcium (49 – 50 kg/ha\*a) entzogen. Bei Kalium beträgt die Größenordnung des Entzuges 26 – 29 kg/ha\*a. Vergleichsweise gering sind die jährlichen Entzüge an Phosphor und Magnesium (Tabelle 25). Die in der Holzbiomasse angereicherten Mineralstoffe könnten durch die Rückführung der Asche auf die Fläche wieder in den Nährstoffkreislauf eingebracht werden. Wie Tabelle 23 zeigt, sind die Mineralstoffgehalte in den Blättern höher als in der Holzbiomasse. Durch den Verbleib der Blattmasse auf der Fläche ist die Rückführung der Nährstoffe in den Boden sichergestellt. Weiterhin wirkt die auf der Fläche verbleibende Blattmasse humusanreichernd.

Hervorzuheben ist die beachtliche Brutto-CO<sub>2</sub>-Fixierung der Holzbiomasse. Bei einer Ertragsleistung von 10 t TM/ha\*a werden durchschnittlich pro Jahr ca. 5.000 kg Kohlenstoff durch die Pappel- und Weidensorten gebunden.

**Tabelle 25: Entzüge der Nährelemente durch das Holz auf der KUP Krummenhennersdorf**

	Gehalt im Boden <sup>1</sup>	Pappeln <sup>2</sup>		Weiden <sup>3</sup>	
	zur Anpflanzung im Mai 2005	Gehalt im Stamm	Entzug <sup>4</sup>	Gehalt im Stamm	Entzug <sup>4</sup>
	(0 – 30 cm) kg/ha	% der TS	kg/ha*a	% der TS	kg/ha*a
N	125	0,63	63	0,66	66
C	66.150	50,49	5.049	49,93	4.993
P	147	0,11	11	0,10	10
K	531	0,29	29	0,26	26
Mg	527	0,07	7	0,06	6
Ca	n. b.	0,49	49	0,50	50

<sup>1</sup> 1 ha (0 – 30 cm)  $\cong$  4.500 t

<sup>2</sup> Durchschnitt aus 3 Sorten

<sup>3</sup> Durchschnitt aus 5 Sorten

<sup>4</sup> angenommener Ertrag von 10 t TM/ha\*a

Wie die Entzüge an Arsen und Schwermetallen aus Tabelle 26 deutlich machen, bezieht sich die vorrangige Aufnahme vor allem bei den Weiden auf die Elemente Cadmium (101 g/ha\*a) und Zink (1.418 g/ha\*a). Eine merkliche Verringerung der Bodengehalte durch den Anbau schnellwachsender Baumarten ist nur sehr langfristig zu erreichen (Tabelle 26). Weiterhin kommt es durch den Verbleib der Blattmasse auf der Fläche zu einer ständigen Rückführung der Stoffe in den Boden. Allerdings bietet auf stark belasteten Flächen der Anbau von schnellwachsenden Baumarten eine Nutzungsalternative zur Lebens- und Futtermittelproduktion. Die nachgewiesenen Konzentrationen an Arsen und vor allem Schwermetallen in der Holzbiomasse müssen bei der anschließenden Verwertung beachtet werden (Kapitel 4).

**Tabelle 26: Entzüge von Arsen und Schwermetallen durch das Holz auf der KUP Krummenhennersdorf**

	Gehalt im Boden <sup>1</sup> zur Anpflanzung im Mai 2005 (0 – 30 cm) kg/ha	Pappeln <sup>2</sup>		Weiden <sup>3</sup>		Boden-sanierende Wirkung	
		Gehalt im Stamm mg/kg TS	Entzug <sup>4</sup> kg/ha*a	Gehalt im Stamm mg/kg TS	Entzug <sup>4</sup> kg/ha*a	Pappel in Jahren	Weide in Jahren
As	435	0,12	0,001	01,4	0,001	362.238	310.490
Cd	12	3,94	0,039	10,11	0,101	306	119
Pb	1582	2,11	0,021	2,17	0,022	74.999	72.925
Cu	90	4,02	0,040	4,67	0,047	2.227	1.917
Zn	807	83,5	0,835	141,84	1,418	967	569

<sup>1</sup> 1 ha (0 – 30 cm)  $\cong$  4.500 t  
<sup>2</sup> Durchschnitt aus 3 Sorten  
<sup>3</sup> Durchschnitt aus 5 Sorten  
<sup>4</sup> angenommener Ertrag von 10 t TM/ha\*a

### 3.2.6 Pflanzensoziologische Kartierung der Begleitflora

Im Jahr 2006 und 2007 wurden insgesamt je 65 Pflanzenarten in der Krautschicht festgestellt. Die Zahl der Moose hat sich auf Kosten der Samenpflanzen im Jahr 2007 jedoch leicht erhöht. Nach der Ernte im Februar 2008 war ein Anstieg auf 73 Arten zu verzeichnen. Allerdings ist die Gesamtartenzahl im 2. Standjahr nach der Ernte auf 44 Arten zurückgegangen. Nach der Ernte im Jahr 2008 ging die Anzahl der Moose zurück. Die Ursache dafür liegt in der nicht vorhandenen Beschattung und der schnelleren Abtrocknung der Fläche durch die fehlende Gehölzschicht. Auch im Jahr 2009 hat sich die Anzahl der Moose nicht wieder erhöht.

Die Gesamtartenzahl aller Aufnahmejahre liegt bei 111. Dabei wurden in den ersten drei Aufnahmejahren im Durchschnitt pro Sortenstreifen ca. 31 Arten ermittelt. Im Jahr 2009 lag die durchschnittliche Artenanzahl pro Sortenstreifen nur bei 20,6 Arten. Auffällige, bestandsbildende Arten, die in allen acht Sorten vorkamen, sind vor allem Acker-Kratzdistel (*Cirsium arvense*), Gemeine Quecke (*Agropyron repens*), Vierkantiges Weidenröschen (*Epilobium tetragonum*), Stumpfblättriger Ampfer (*Rumex obtusifolius*) und Große Brennnessel (*Urtica dioica*). Stete, weniger auffällige Begleiter sind u. a. Schmalblättriges und Drüsiges Weidenröschen (*Epilobium angustifolium und ciliatum*), Gewöhnliches Rispengras (*Poa trivialis*) und Gemeiner Löwenzahn (*Taraxacum officinale*). Ebenso hat sich Gehölzjungwuchs von Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*), Birke (*Betula pendula*), Esche (*Fraxinus excelsior*) und Eiche (*Quercus spec.*) angesiedelt. Bioindikatorisch wichtige Pflanzenarten sind in Tabelle 27 genannt. Ampfer, Hirtentäschel, Gänsefuß, Große Brennnessel und Löwenzahn stehen für einen nährstoffreichen (N) Boden. Die Jährige und Gemeine Risse sind Zeigerpflanzen für feuchte Böden.

Je nach Stadium, in dem sich die Kurzumtriebsplantage gerade befindet, variieren die Grade der Schichtdeckungen. Die Deckung der Strauch- und Gehölzschicht steigt mit zunehmendem Standjahr pro Rotation. Bereits in der zweiten Vegetationsperiode (2009) nach der ersten Ernte hat die Strauch- und Gehölzschicht einen Deckungsgrad von 80 – 95 % wieder erreicht. Dieser Wert wird erst durch eine Ernte oder ein unvorhergesehenes Ereignis, wie einer Kalamität, zurückgesetzt. Die Deckung der Kraut- und Mooschicht schwankt, unabhängig von derjenigen der Gehölzschicht. Den geringsten Deckungsgrad wies die Mooschicht mit 1 – 3 % in der ersten Rotation auf. Im 2. Standjahr der 2. Rotation hatte die Mooschicht eine Deckung von 15 – 75 % erreicht.

**Tabelle 27: Bestandsbildende Arten der Begleitflora auf der KUP Krummenhennersdorf**

Art	Indikatorart	2006	2007	2008	2009
Gewöhnliches Hirtentäschel ( <i>Capsella bursa-pastoris</i> )	Ackerwildart	X			
Weißer Gänsefuß ( <i>Chenopodium album</i> )	Ackerwildart	X			
Floh-Knöterich ( <i>Polygonum persicaria</i> )	Ackerwildart	X			
Breitwegerich ( <i>Plantago major</i> )	Wiesenart	X			
Gewöhnlicher Vogelknöterich ( <i>Polygonum aviculare</i> )	Ackerwildart	X			
Kanadisches Berufskraut ( <i>Conyza canadensis</i> )	Ruderalart	X	X		
Rotklee ( <i>Trifolium pratense</i> )	Wiesenart	X			
Küsten-Kamille ( <i>Tripleurospermum maritimum</i> )	Ackerwildart	X	X		
Acker-Windhalm ( <i>Apera spic-venti</i> )	Ackerwildart	X		X	
Schmalblättriges Weidenröschen ( <i>Epilobium angustifolium</i> )	Ruderalart	X	X	X	X
Gewöhnliches Rispengras ( <i>Poa trivialis</i> )	Wiesenart		X	X	X
Große Brennnessel ( <i>Urtica dioica</i> )	Ruderalart		X	X	X
Acker-Kratzdistel ( <i>Cirsium arvense</i> )	Ackerwildart	X	X	X	
Gewöhnliche Quecke ( <i>Elymus repens</i> )	Wiesenart	X	X	X	X
Vierkantiges Weidenröschen ( <i>Epilobium tetragonum</i> )	Ruderalart	X	X	X	X
Einjähriges Rispengras ( <i>Poa annua</i> )	Ackerwildart	X	X	X	
Stumpfbblätteriger Ampfer ( <i>Rumex obtusifolius</i> )	Wiesenart	X	X	X	X
Berg-Ahorn ( <i>Acer pseudoplatanus</i> )	Waldart	X	X	X	X
Gemeine Birke ( <i>Betula pendula</i> )	Waldart			X	X
Gewöhnlicher Löwenzahn ( <i>Taraxacum officinale</i> )	Ruderalart			X	X
Acker-Windenknöterich ( <i>Fallopia convolvulus</i> )	Ackerwildart	X			X
Drüsiges Weidenröschen ( <i>Epilobium ciliatum</i> )	Ruderalart			X	X
Kanadische Goldrute ( <i>Solidago canadensis</i> )	Waldart				X
Himbeere ( <i>Rubus idaeus</i> )	Waldart				X
Gemeine Esche ( <i>Fraxinus excelsior</i> )	Waldart				X
Traubeneiche ( <i>Quercus petrae</i> )	Waldart				X
<b>Artensumme</b>		<b>17</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>15</b>

nach BÖHNERT, REICHHOFF, 2008

Anhand Tabelle 27 ist zu erkennen, dass sich im Jahresvergleich die Zusammensetzung der Indikatorarten geändert hat. Mehrere anfänglich vorkommende Ackerwildkräuter sind verschwunden. Dafür sind einige ausdauernde und kurzlebige Arten hinzugekommen.

Unabhängig von der kaum veränderten Samenpflanzenartenzahl zeigt sich eine deutliche Artenumschichtung. Beginnend bei einigen Indikatorarten setzt sich diese über den Ausfall weiterer Ackerwildkräuter bis zum vermehrten Auftreten von Jungpflanzen von Waldbäumen (Berg-Ahorn, Birke, Esche und Eiche) fort. Insgesamt ist die Zahl der ausgefallenen Ackerwildkräuter recht hoch (Acker-Windhalm, Kornblume, Weißer und Vielsamiger Gänsefuß, Raps, Acker-Winde, Acker-Windenknöterich, Gewöhnlicher Vogelknöterich, Acker-Hellerkraut, Feld-Ehrenpreis). Ausgefallen sind auch einige Wiesenarten wie Spitz- und Breitwegerich sowie Rotklee. Insgesamt hat sich eine qualitative Artenumschichtung hin zu überwiegend mehrjährigen, Schatten ertragenden Ruderal- und Waldarten ergeben. Die Gesamtartenzahl und die durchschnittliche Artenzahl pro Sortenstreifen sind im Vergleich zu bewirtschafteten Äckern als relativ hoch zu bewerten. Die Ursache ist die Artenmischung auf dem ehemaligen Ackerstandort, die noch von der Sukzession bedingt wird. Die qualitativen (ökologischen) Unterschiede im Artenbestand zwischen den Sortenstreifen sind nur gering.

Die in der ersten Rotation vorkommenden Rote-Liste-Arten Acker-Filzkraut (*Filago arvensis*) und Roter Zahntrost (*Odontites vulgaris*) konnten im Jahr 2008 und 2009 nach der ersten Ernte nicht mehr nachgewiesen werden. Hinsichtlich der pflanzensoziologischen Klassifizierung wurden die Arten in die folgenden ökologisch-vegetationskundlichen Gruppen eingeteilt (Tabelle 28).

**Tabelle 28: Einteilung der Blütenpflanzen (Phanerogamen) in ökologische Gruppen – Untersuchungen der Kurzumtriebsplantage in Krummenhennersdorf**

Ökologische Gruppe	Artenzahl Phanerogamen				Anteil an Gesamtartenzahl Phanerogamen (%)			
	2006	2007	2008	2009	2006 (n = 62)	2007 (n = 59)	2008 (n = 68)	2009 (n = 40)
Ackerwildkräuter	23	12	18	5	37	20	26	12,5
Ruderalarten	14	17	22	12	23	29	32	30,0
Wiesenarten	18	21	19	13	29	36	28	32,5
Waldarten	4	8	9	9	6	13	13	22,5
Sonstige	3	1	0	1	5	2	0	2,5
<b>Artensumme</b>	<b>62</b>	<b>59</b>	<b>68</b>	<b>40</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>

nach BÖHNERT, REICHHOFF 2008

Die Zuordnung der Arten zu den ökologischen Gruppen kann nur grob schematisch erfolgen, weil sich manche Arten, beispielsweise die Ackerart Acker-Kratzdistel und die Wiesenart Stumpfblätriger Ampfer, auch gruppenübergreifend ruderal verhalten. Im Jahr 2007 überwogen die Wiesenarten (n = 21), gefolgt von Ruderal- und Ackerarten (n = 16, n = 12). Im Vergleich zum ersten Jahr nach der Etablierung der schnellwachsenden Baumarten (2006) ist 2007 ein Rückgang bei den Ackerarten eingetreten. Die Waldarten haben dagegen im Betrachtungszeitraum zugenommen. Nach der Beerntung des ersten Umtriebes (2008) überwogen in der Krautschicht die Ruderalarten. Die Acker- und Wiesenarten sind hingegen weiter stark zurückgegangen. Mit dieser Artenzusammensetzung ist keine Zuordnung zu einer Pflanzengesellschaft im pflanzensoziologischen System möglich (vgl. BÖHNERT et al. 2001). Das trifft auch für die Charakterisierung der einzelnen Sortenstreifen zu. Es handelt sich jeweils um heterogen zusammengesetzte Pflanzenbestände aus Wiesen-, Ruderal- und Ackerarten.

Die oben genannten Indikatorarten werden den ökologischen Gruppen in Tabelle 29 zugeordnet.

**Tabelle 29: Ökologische Gruppen – Untersuchungen der Kurzumtriebsplantage in Krummenhennersdorf**

Ökologische Gruppe	2006	2007	2008	2009
Ackerarten	9	3	3	1
Ruderalarten	3	4	4	5
Wiesenarten	4	3	4	4
Waldarten	1	1	2	5
<b>Artensumme</b>	<b>17</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>15</b>

nach BÖHNERT, REICHHOFF 2008

Somit wird auch mittels der Indikatorarten die begonnene Artenumschichtung deutlich. Für die Auswertung der ökologischen Zeigerwerte (Tabelle 30) wurden die jeweiligen Mittelwerte aller Arten berechnet. Die Artenzusammensetzung steht im Durchschnitt für eine lichtliebende Flora des mitteleuropäischen Hügellandes auf frischen, schwach sauren und stickstoffreichen Standorten, die für Äcker bzw. ruderale Plätze typisch ist. Für die Salzzahl liegen zu wenige Werte vor, um den Mittelwert sinnvoll berechnen zu können. Zwischen den Aufnahmejahren deuten sich Veränderungstendenzen bei der Abnahme der Lichtzahl und Zunahme der Feuchtezahl an. Dies entspricht der Artenumschichtung, die man zu einem dunklen und feuchten Waldinnenklima beobachten kann.

**Tabelle 30: Artenzusammensetzung nach ökologischen Zeigerwerten – Bonituren auf der Kurzumtriebsfläche (Pappel, Weide) am Standort Krummenhennersdorf**

Zeigerwert	Mittelwert				Charakterisierung des Mittelwertes
	2006 (n = 65)	2007 (n = 65)	2008 (n = 71)	2009 (n = 44)	
Lichtzahl	7,0	6,8	6,7	6,4	Halblichtpflanzen, die volles Licht bevorzugen, aber auch mäßigen Schatten ertragen
Temperaturzahl	5,6	5,5	5,6	5,3	Mäßigwärmezeiger, meist im Hügelland
Kontinentalitätszahl	3,9	3,9	4,0	3,9	subozeanisch, Schwerpunkt in Mitteleuropa
Feuchtezahl	5,3	5,1	5,5	5,7	Frischezeiger
Reaktionszahl	5,9	6,0	6,3	5,6	Schwachsäurezeiger
Stickstoffzahl	6,0	6,0	6,2	6,3	auf stickstoffreichen Standorten häufiger

nach BÖHNERT, REICHHOFF 2008

Der Präsenz-Gemeinschaftskoeffizient ist ein Maß für die Artenverschiebung. Je kleiner der Koeffizient ist, umso größer ist die Veränderung in der floristischen Zusammensetzung. Die Präsenz-Gemeinschaftskoeffizienten zeigen zwei deutliche Tendenzen (Tabelle 31). Einerseits verändern sich die Bestände mit fortschreitender zeitlicher Entfernung vom Ausgangsjahr zunehmend (Vergleichsreihe 2006/2007 bis 2006/2009), andererseits ähneln sich die Bestände mit zunehmender Wirkung des Waldinnenklimas immer mehr an und stabilisieren sich (Vergleichsreihe 2008/2009). Es findet ein Wandel von kurzlebigen zu langlebigen Arten statt.

**Tabelle 31: Floristischer Vergleich der Erst- und Wiederholungsaufnahmen auf der Kurzumtriebsfläche (Pappel, Weide), am Standort Krummenhennersdorf, Anlagejahr 2005**

Sorte		Präsenz-Gemeinschaftskoeffizient $G_s$					
Code	Name	2006/2007	2006/2008	2006/2009	2007/2008	2007/2009	2008/2009
W 01	Gudrun	56,3	47,2	43,3	61,5	60,4	70,4
W 02	Tordis	48,5	31,6	23,0	70,6	50,9	69,6
W 03	Tora	48,5	34,4	28,1	72,7	50,9	66,7
W 04	Sven	55,7	42,1	35,3	66,7	51,9	64,0
W 05	Jorr	40,8	49,1	34,8	68,0	55,8	59,6
P 01	Hybrid 275	44,0	54,9	35,9	47,3	38,1	55,8
P 02	Max	34,8	64,2	37,8	51,1	51,6	40,0
P 03	Weser 6	48,5	54,3	36,7	33,3	54,9	54,5

nach BÖHNERT, REICHHOFF 2008

Artenverluste sind bei konkurrenzschwachen und kurzlebigen Arten zu erwarten bzw. schon eingetreten (z. B. Acker-Windhalm, Kornblume, Weißer und Vielsamiger Gänsefuß, Acker-Filzkraut, Sumpf-Ruhrkraut, Saat-Mohn, Liegendes Mastkraut, Wildes Stiefmütterchen). Diese Arten sind mehrheitlich den Ackerwildkräutern zuzuordnen.

Dagegen haben sich konkurrenzkräftige und meist ausdauernde Arten ausgedehnt (z. B. Gewöhnliche Quecke, Brombeere, Himbeere, Stumpfbältriger Ampfer, Große Brennnessel, Berg-Ahorn, Birke, Esche, Schwarzer Holunder). Diese Arten gelten als Ruderal-, Wiesen- und Waldarten. Die Waldarten werden vermutlich weiterhin zunehmen. Gefährdete Arten sind nach der Ernte 2008 verschwunden.

Hinsichtlich der pflanzensoziologischen Zugehörigkeit wird die Artenzahl der Ackerwildkräuter abnehmen, während vorhandene Ruderal- und Waldarten größere Flächenanteile erreichen werden. Es ist anzunehmen, dass auch neue Ruderal- und Waldarten (Bäume) einwandern. Typische Wiesenarten, die an eine Bewirtschaftung gebunden sind, werden zurückgehen (z. B. Rotklee).

Die ökologischen Zeigerwerte werden sich im Durchschnitt der Arten etwas verringern. Das bedeutet, dass der Licht- und Wärmehanspruch nicht mehr so hoch sein wird. Das entspricht der Zunahme von Ruderal- und Waldarten. Weil aber in regelmäßigen Abständen ein Kurzumtrieb geplant ist, wird die zunehmende Beschattung immer wieder auf den Ausgangswert mit hohem Lichtgenuss zurückgesetzt, sodass sich keine stabile Waldschattenflora einstellen kann. Wegen der regelmäßigen Dynamik von Licht und Schatten nach der jeweiligen Rotation kann die Artenzahl relativ hoch sein. Ein Vergleich mit neu angelegten Heckenstreifen ist schwierig. Wenn Heckenstreifen in der Ackerlandschaft liegen, könnte die Artenzusammensetzung ähnlich sein. Liegen diese jedoch in Wiesenflächen, wird die Artenzusammensetzung vermutlich von derjenigen der Energieholzanlage abweichen. Die Bewirtschaftung der Gehölze im Kurzumtrieb ähnelt etwas der historischen Niederwaldbewirtschaftung, bei der die Gehölze alle 15 bis 20 Jahre „auf den Stock gesetzt“ wurden. Solche lichten Niederwälder können sehr artenreich und ökologisch wertvoll sein (Krautschicht). Insgesamt etablierte sich in den ersten drei Jahren nach der Bestandesbegründung der Kurzumtriebsfläche eine artenreiche Krautschicht in den verschiedenen Sortenquartieren. Bis 2008 stieg die Artenzusammensetzung, im Jahr 2009 ging die Artenanzahl aus unerklärlichen Gründen stark zurück.

Die vollständigen Berichte über die pflanzensoziologischen Untersuchungen sind zusammen mit dem Abschlussbericht des Gesamtvorhabens im Internet des LfULG verfügbar.

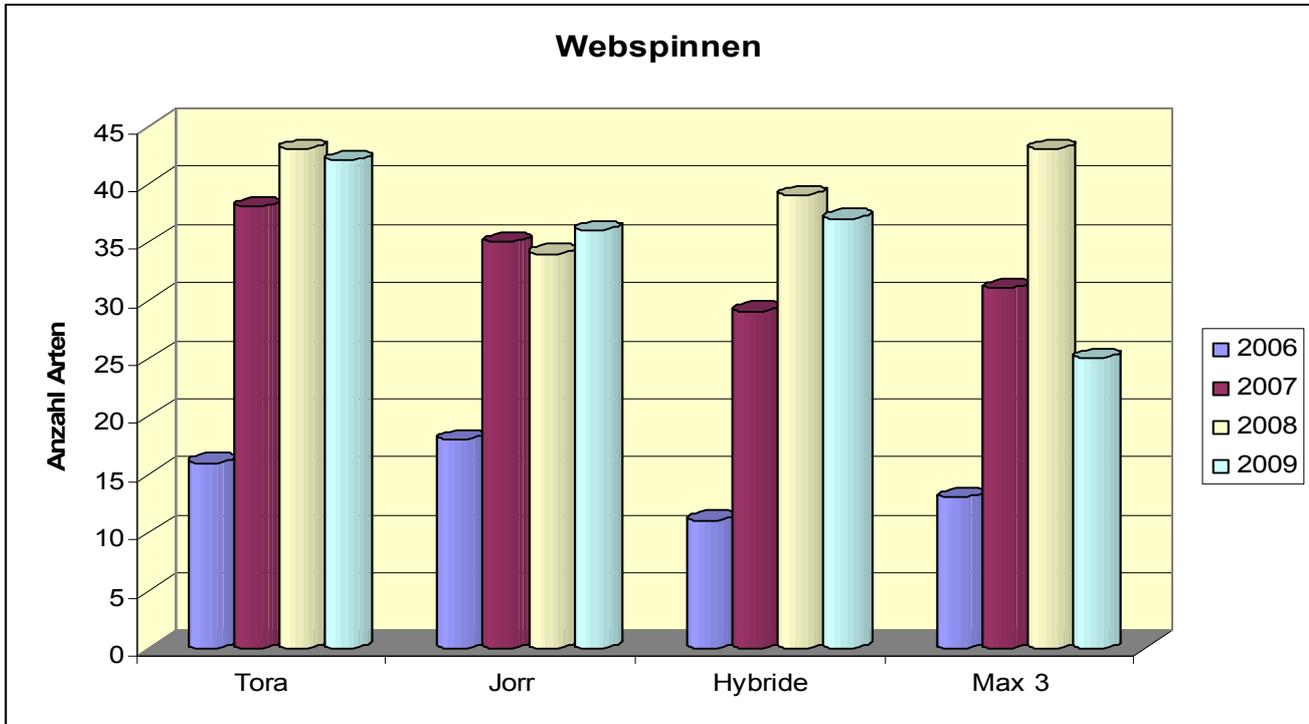
### 3.2.7 Faunistische Untersuchungen

#### Webspinnen

Die Webspinnen (*Arachnida: Araneae*) gehören zu den arten- und individuenreichsten terrestrischen Prädatorengruppen. Sie werden daher sowohl für ökologische Untersuchungen in der Naturschutzpraxis als auch zur Bewertung von Agrarbiotopen herangezogen. Gerade anhand dieser Arthropodengruppe lassen sich wertvolle Informationen über die Schutzwürdigkeit und den Zustand von Biotopen gewinnen. Neben euryöken Arten gibt es viele mehr oder weniger spezialisierte, zum Teil auch ausgesprochen stenöke Arten. Spinnen erweisen sich zunehmend als sehr gut geeignete Indikatoren für die Bewertung von Lebensräumen.

Auf der Versuchsfläche konnten in allen Sortenquartieren die Webspinnen (*Araneae*) in hoher Artenzahl nachgewiesen werden. Im Vergleich über die Untersuchungsjahre nahm die Artenzahl besonders von 2006 zu den Folgejahren deutlich zu (Abbildung 34). Die häufigsten Spinnenarten sind die Zwergspinnen (*Oedothorax retusus* und *apicatus*), die Wolfsspinne (*Trochosa ruricola*) und die Plattbauchspinne (*Drassyllus pusillus*).

Als Vertreter der Rote-Liste-Arten des Freistaates Sachsens wurden auf der Versuchsfläche die nachfolgend aufgeführten Arten bonitiert: die Plattbauchspinne *Drassyllus praeficus*, die Baldachinspinne *Microlinyphia impigra*, die Krabbenspinne *Ozypzila claveata*, die Wolfspinne *Pardosa hortensis* und die Bodenspinne *Hahnina nava*. Die Baldachin- und die Krabbenspinne sind auch nach der Roten Liste Deutschland als gefährdet einzustufen. Die meisten Rote-Liste-Arten kamen in der Weidensorte „Jorr“ vor. In Mitteleuropa gehören diese Arten zu den häufigsten Spinnen der Agrarökosysteme. Im Versuchszeitraum nahm die Anzahl der Feuchte liebenden Arten zu.

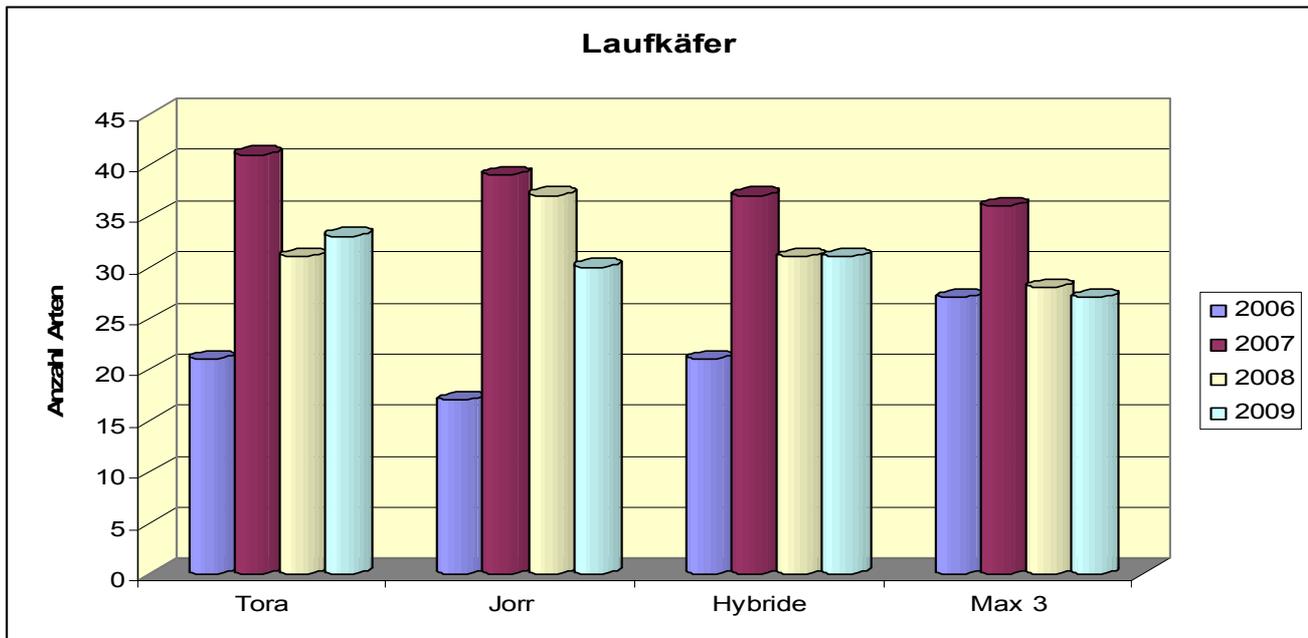


**Abbildung 34: Vergleich der Artenzahlen der Webspinnen (*Araneae*) am Versuchsstandort Krummenhennersdorf in den Jahren 2006 bis 2009 (AL HUSSEIN 2009)**

### Laufkäfer

Die Artenzahl an Laufkäfern (*Carabidae*) gilt als Indikator für die Qualität eines Standortes als Lebensraum für Insekten. Aus den Untersuchungen zu den Laufkäfern geht hervor, dass die Versuchsflächen durch eine insgesamt hohe Biodiversität ausgezeichnet sind (Abbildung 35). 2007 war das Jahr mit der höchsten Artenanzahl der Laufkäfer.

Beim Sortenvergleich wurden bei der Weidensorte „Tora“ die meisten und bei der Pappelsorte „Max 3“ die wenigsten Laufkäferarten festgestellt. Die häufigsten Laufkäferarten waren *Bembidion lampros*, *Pterostichus melanarius*, *Dyschirius globus* und *Poecilus cupreus*. Diese Arten sind auch in Mitteleuropa weit verbreitet und kommen hauptsächlich auf Äckern, in Ruderalfluren, Feldrainen und Hecken vor. Zu den Rote-Liste-Arten in Sachsen gehören *Carabus cancellatus*, *Carabus aurata*, *Amara ovata*, *Harpalus smaragdinus*, *Ophonus azureus* und *Trechus obtusus*. Die Körnerwanze (*Carabus cancellatus*) gehört in Sachsen zu den gefährdeten Arten. Die in 2008 vermehrten Funde des besonders geschützten Goldlaufkäfers *Carabus auratus* konnten 2009 nicht bestätigt werden. In den zurückliegenden Jahren 2006 und 2007 konnte er nicht nachgewiesen werden. In der Variante „Max 3“ wurden die meisten Rote-Liste-Arten gefunden. Die Plantage beherbergt verschiedene Laufkäferarten, die von Äckern über mesophile Laubwälder bis hin zu Nasswäldern und Frischwiesen vorkommen.



**Abbildung 35: Vergleich der Artenzahlen der Laufkäfer (*Carabidae*) am Versuchsstandort Krummenhennersdorf in den Jahren 2006 bis 2009 (AL HUSSEIN 2009)**

Im Fazit kann die mit verschiedenen Pappel- und Weidensorten begründete Kurzumtriebsfläche als sehr artenreiches Laufkäferbiotop mit einer vergleichsweise hohen Zahl von Rote-Liste-Arten des Freistaates Sachsen eingestuft werden. Im Zuge der faunistischen Aufnahmen wurden weitere Insekten ermittelt, die die Kurzumtriebsfläche als sehr biodivers charakterisieren. Die beiden sehr intensiv untersuchten Gruppen der Laufkäfer und Webspinnen zeigten in den vier Untersuchungsjahren starke Veränderungen hinsichtlich Artenspektrum, Artenzahl, Aktivitätsdichten und Dominanzstrukturen. In den Jahren 2008 und 2009 nahm die Aktivitätsdichte der Feuchte liebenden, Gehölzbestände bevorzugenden Arten zu. Häufige Arten der Agrarökosysteme sind stark zurückgegangen. Die Energieholzanlage ist immer noch durch die Arten der Ackerunkrautfluren geprägt.

### Nützlinge

Unter den Blattkäfern (*Chrysomelidae*) trat der Ampferblattkäfer (*Gastrophysa viridula*) in der Anlage in sehr hoher Dichte auf. Dieser Käfer und seine Larven ernähren sich vorzugsweise von Pflanzenteilen des Breitblättrigen Ampfers (*Rumex obtusifolius* L.). Daher kann diese Art auch als Vertilger von Unkräutern betrachtet werden.

Zu den wichtigsten Prädatoren bzw. Antagonisten von Schadinsekten zählten Arten der Familie Marienkäfer (*Coccinellidae*). Die häufigste Art der Marienkäfer in der Versuchsanlage war der Schwarzgefleckte Marienkäfer (*Propylaea quatuordecimpunctata*). Außerdem wurden in den Fallen die zu den Räubern zählenden Ohrwürmer (*Dermaptera*), insbesondere der Gemeine Ohrwurm *Forficula auricularia*, und Aaskäfer (*Silphidae*) in relativ hohen Zahlen in den Bodenfallen gefangen.

### Schadinsekten

In den Versuchsjahren 2007 und 2009 trat vermehrt der Gartenlaubkäfer (*Phyllopertha horticola*) auf den Bäumen der Versuchsanlage auf. Es wurden jedoch keine nennenswerten Schäden verursacht. Weitere, jedoch keine großen Schäden hinterlassende Insekten, waren die Weidenlaus (*T. salignus*), der Erlenwürger (*Cryptorhynchus lapathi*) und verschiedene Heuschrecken (*Saltatoria*).

### Pilzliche Schaderreger

Besonders stark durch Weidenschorf oder Triebspitzenkrankheit (anamorph *Pollaccia saliciperda*; telemorph *Venturia saliciperda*; Ascomycota) befallen waren im Jahre 2007 die Weidensorten „Tordis“ und „Gudrun“. Nach der Ernte im Januar 2008 konnte dieses Pathogen 2008 nicht mehr gefunden werden. 2009 waren alle Weiden stark an den dünneren Zweigen befallen.

Aus den Aufnahmen zur Fauna geht hervor, dass die Fläche von zahlreichen Nützlingen besiedelt ist. Ebenso sind in jährlich wechselnder Häufigkeit Schadinsekten der Pappel und Weide (z. B. der Graue Knospenwickler, Erlenwürger sowie Pappel- und

Weidenblattkäfer) vertreten. Kritisch sind auch die pilzlichen Schaderreger an den Bäumen zu bewerten. Die Daten signalisieren, dass sich hieraus durchaus auch wirtschaftliche Schäden in Kurzumtriebsplantagen ergeben könnten.

Die vollständigen Berichte über die faunistischen Untersuchungen sind zusammen mit dem Abschlussbericht des Gesamtvorhabens im Internet des LfULG verfügbar.

### 3.3 Ökonomische Bewertung des Anbaus schnellwachsender Baumarten

Allgemeingültige Aussagen zur Wirtschaftlichkeit von Kurzumtriebshölzern zu treffen ist sehr schwierig, da das Betriebsergebnis von sehr vielen Faktoren abhängig ist. Ein positives Ergebnis wird vor allem vom Ertrag beeinflusst. Dieser wird im Wesentlichen durch die Faktoren Standort, Sortenwahl und Pflanzverband bestimmt. Weiteren Einfluss auf anfallende Kosten und Erlöse haben der Ernterhythmus, das Ernteverfahren und der Preis, der für die Hackschnitzel erzielt wird. Durch die verschiedenen Anbauverfahren, die lange Nutzungsdauer und den Einsatz teilweise neuer, kaum erprobter Technik gibt es keine ausreichende Datengrundlage für exakte ökonomische Bewertungen. Weil es sich bei Kurzumtriebshölzern um Dauerkulturen mit unterschiedlichen Ernterhythmen handelt, entstehen im Vergleich zu annuellen landwirtschaftlichen Kulturen unregelmäßige Zahlungsrückflüsse. Um einen jährlichen Gewinn oder Verlust beziffern zu können, muss die Investitionsrechnung (Annuitätenmethode) angewandt werden. Das bedeutet, dass alle Kosten und Leistungen während der gesamten Nutzungsdauer auf den Investitionszeitpunkt abgezinst und aufsummiert werden. Nur so kann ein durchschnittlicher jährlicher Gewinn ermittelt werden. Tabelle 32 veranschaulicht an einem Beispiel die Anlagekosten, die sich in Abhängigkeit der betrachteten Baumart stark voneinander unterscheiden können. Ursache hierfür sind die jeweiligen Preise für die Stecklinge: Pappelstecklinge sind um das Doppelte teurer als Weidenstecklinge. Die Errichtung eines Wildschutzzaunes oder das Einsetzen von Bewässerung in der Anwuchsphase hat ebenfalls großen Einfluss auf die Anlagekosten.

**Tabelle 32: Anlagekosten einer KUP bei einer Pflanzzahl von 12.000 Stk./ha**

Kostenposition	Erläuterung	Pappel	Weide
		€/ha	
Unkrautbekämpfung	3 l/ha Roundup + Ausbringung	75	75
Pflügen	6-Schar-Drehpflug	85	85
Saatbettvorbereitung	6m Saatbettkombi	27	27
Stecklinge	0,23 €/Stk. (P.); 0,08 €/Stk. (W.)	2760	960
Pflanzung maschinell	0,04 €/Stk.	480	480
Unkrautbekämpfung	0,3 l/ha Flexidor; 1 l/ha Fusilade + Ausbringung	92	92
Pflege, Sonstiges	z.B. Mäusekontrolle	37	37
<b>Summe Anlagekosten [€/ha]</b>		<b>3556</b>	<b>1756</b>
Optional			
Zaunbau	1,8 €/ lfd. m	720	720
Bewässerung	30 mm/a mit Linearberegnungsmaschine	200	200
<b>Summe Anlagenkosten mit Zaun und Bewässerung</b>		<b>4476</b>	<b>2676</b>

ECKHARD, 2010

Einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben zudem die Bereitstellungskosten für die Hackschnitzel. Je nach Ernterhythmus, eingesetzter Technik, Trocknungsverfahren und Transportentfernungen zwischen Fläche, Trocknung und Abnehmer schwanken diese sehr stark. Aussagen zur Wirtschaftlichkeit einer KUP sind somit von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren abhängig und deshalb stets einzelfallbezogen zu betrachten.

Wie stark die Kosten selbst beim gleichen Ernte- und Trocknungsverfahren variieren können, zeigt Tabelle 33, in der die Bereitstellungskosten für die Ernten von 2008 und 2010 gegenübergestellt sind. Bei beiden Ernten kam ein Feldhäcksler (2008: Claas; 2010: New Holland) zum Einsatz und die Hackschnitzel wurden durch Abwärme von Biogasanlagen (2008: Niederbobritzsch; 2010: Bieberstein) getrocknet. Allein bei der Trocknung ergaben sich Preisschwankungen von 37 €/t.

**Tabelle 33: Gegenüberstellung der Bereitstellungskosten (inkl. MwSt.) für die Hackschnitzel aus den Ernten der KUP Krummenhennersdorf mit den zu erzielenden Erlösen**

Parameter	Ernte 1. Rotation 2008	Ernte 2. Rotation 2010
Erntemenge [ t Frischmasse]	67	156
Erntemenge [t Trockenmasse bei WG 10]	31	46
Ab- und Aufbau Zaun [€]	214	357
Feldhäcksler [€/ha]	628	655
Transport [€/t]	33	10
Trocknung [€/t]	54	17
Summe Gesamtkosten	7301	5870
Erlös Hackschnitzel <sup>1</sup>	4183	6206
Differenz	- 3118	337

<sup>1</sup>Hackschnitzelpreis für WG 20 = 134,92 €/t (inkl. MwSt.); Quelle: C.A.R.M.E.N e.V. Mittelwert für III. Quartal 2010

Durch die erhebliche Ertragssteigerung in der 2. Rotation und die günstigeren Preise für Trocknung und Transport hätte man mit dem aktuell üblichen Hackschnitzelpreis von 134,92 €/t (Quelle: C.A.R.M.E.N. e.V.) ein positives Betriebsergebnis erzielen können (Tabelle 33). Die Kosten für die Anlage der Plantage sind dabei nicht berücksichtigt. Unter günstigeren, schneefreien Erntebedingungen wäre weniger Wasser von der Fläche transportiert worden. Dies hätte die Transport- und Trocknungskosten nochmal wesentlich gesenkt und das Betriebsergebnis gesteigert.

Einen großen Einfluss hat zudem die Tatsache, ob auf die Fläche eine Betriebsprämie angerechnet wird. Bei welchem Niveau sich der Hackschnitzelpreis für einen wirtschaftlichen Kurzumtrieb bewegen muss, zeigt Tabelle 34. Hier erzielt die Weide durch ihre geringeren Anlagekosten schon bei einem niedrigeren Hackschnitzelpreis ein positiveres Betriebsergebnis als die Pappel.

**Tabelle 34: Erforderlicher Holzerlös in €/t TM für einen wirtschaftlichen Kurzumtrieb**

Hackschnitzelerträge	Pappel		Weide	
	ohne DZ	mit DZ <sup>1</sup>	ohne DZ	mit DZ <sup>1</sup>
Hackschnitzel ab Hof, ohne Trocknung und Lagerung				
15 t TM/ha*a	85	61	66	40
12 t TM/ha*a	105	72	80	48
10 t TM/ha*a	125	84	94	55
Hackschnitzel ab Hof, mit Trocknung, Lagerung und Wildschutzzaun				
15 t TM/ha*a	95	68	75	48
12 t TM/ha*a	115	82	90	57
10 t TM/ha*a	137	96	105	67

<sup>1</sup>DZ Betriebsprämie 344 €/ha\*a  
ECKHARD, 2010

Abbildung 36 zeigt verschiedene Anbauszenarien und das damit zu erzielende Betriebsergebnis. Am besten schneidet dabei die Weide mit einem dreijährigen Erntezyklus ab. Die Begründung dafür liegt wiederum in den niedrigeren Anlagekosten, dem enormen Stockausschlagsvermögen mit einer Vielzahl von Trieben pro Baum und dem der Pappel überlegenen Zuwachs in den ersten drei Standjahren.

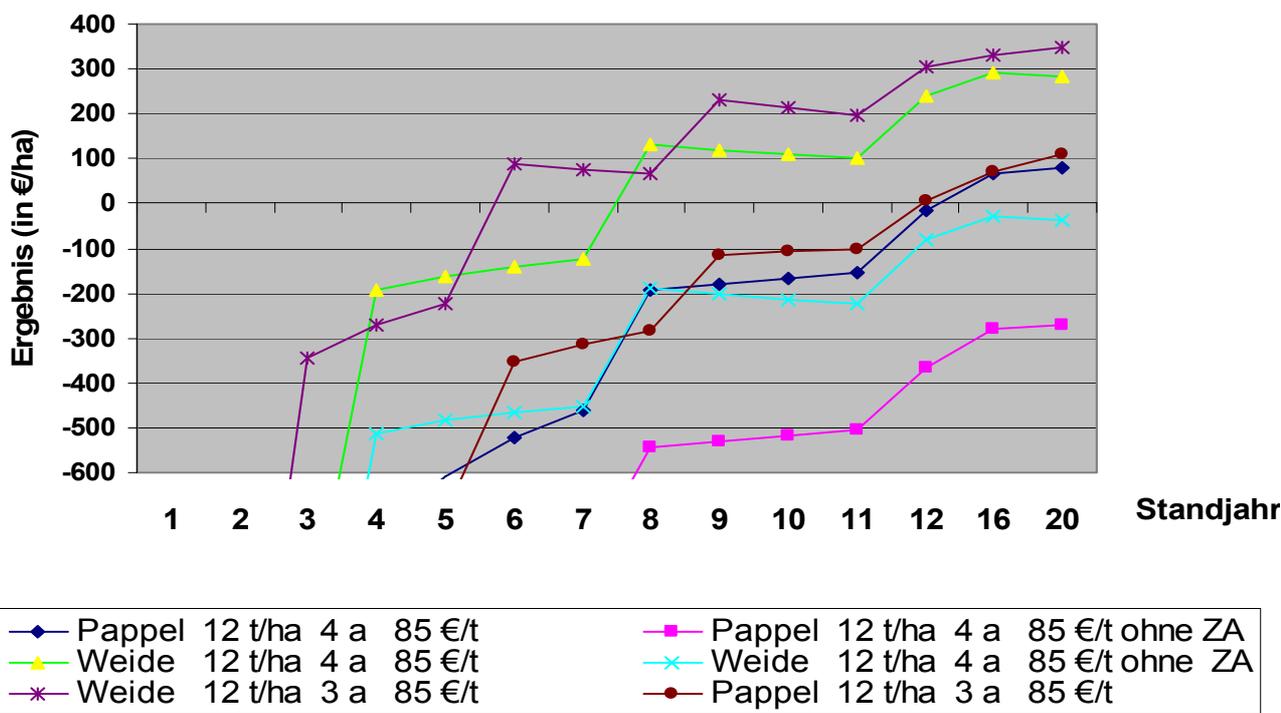


Abbildung 36: Betriebsergebnisse bei verschiedenen Anbauszenarien (ECKHARDT 2010)

### 3.4 Fazit KUP Krummenhennersdorf

Die im Jahr 2005 angelegte Kurzumtriebsplantage mit Pappeln und Weiden ist sehr gut angewachsen und zeigt auf dem optimal mit Wasser versorgten Standort ideale Ertragsleistungen. Die Plantage wurde in den letzten fünf Jahren zweimal beerntet. Die Ernte der 1. Rotation erfolgte nach dreijährigem Umtrieb, die der 2. Rotation nach zweijähriger Standzeit. Es war eine enorme Ertragssteigerung von durchschnittlich 6,3 t TM/ha\*a in der 1. Rotation auf durchschnittlich 16 t TM/ha\*a in der 2. Rotation zu verzeichnen. Die wüchsigsten Sorten waren bei den Pappeln die Klone „Max 3“ und „Hybrid 275“ und bei den Weiden die Sorten „Tora“ und „Tordis“. Die Ernten wurden jeweils im Februar durchgeführt, beide Male mit einem Feldhäcksler. Im Jahr 2008 verlief die Ernte problemlos. 2010 mussten die Stöcke auf Grund einer ca. 30 cm hohen Schneedecke höher abgeschnitten werden. Weiterhin wiesen die Hackschnitzel 2010 durch die aufgenommenen Schneemengen einen hohen Wassergehalt auf, der sich ungünstig auf Transport und Trocknung auswirkte. Bei beiden Ernten gab es logistische Probleme mit der Abfuhr. Der Häcksler hatte längere Wartezeiten, in denen er auf leere Anhänger warten musste. Weil es sich bei beiden Ernten um Demonstrationsveranstaltungen handelte, für die Fixpreise veranschlagt wurden, konnte die Arbeitsdauer vernachlässigt werden. In der Praxis werden Kosten von ca. 320 €/h für den Häcksler veranschlagt. Um ein wirtschaftliches Betriebsergebnis zu erzielen, ist eine reibungslose Logistik der Abfuhr nötig.

Die Aufwüchse wurden jedes Jahr hinsichtlich ihrer Schwermetallgehalte in der Blatt- und Holzbiomasse untersucht. Dabei fiel auf, dass die Weiden eine erhöhte Affinität zur Schwermetallaufnahme besitzen. Die Gehalte in den Blättern waren wesentlich höher als in der Holzbiomasse. Besonders für die Elemente Cadmium und Zink wurden bei den Weiden die doppelten bis dreifachen Gehalte im Vergleich zu den Pappeln gemessen. Eine Sanierung schwermetallbelasteter Böden durch eine phytosanitäre Wirkung der schnellwachsenden Baumarten ist in absehbaren Zeiträumen jedoch nicht zu erwarten. Dies ist aufgrund möglicher Belastungen von Asche und Abluft beim Verbrennen der Hackschnitzel und sich daraus ergebender Umweltbelastungen auch nicht erstrebenswert. Weil sich die Einlagerung der Schwermetalle hauptsächlich auf die auf der Fläche verbleibenden Blätter beschränkt, stellt der Anbau von KUP eine Nutzungsalternative für belastete Böden dar, die für die Nahrungs- und Futtermittelerzeugung nicht in Betracht kommen. Der Transfer der Schwermetalle in die Gehölze könnte auf besonders belasteten Flächen durch Kalkdüngung weiter vermindert werden. Jedoch sind zur Absicherung der Wirksamkeit weitere gezielte Untersuchungen erforderlich.

Die floristischen und faunistischen Begleituntersuchungen haben gezeigt, dass eine relativ hohe Artenanzahl auf der Fläche vertreten ist. Im Laufe der Standzeit der Anlage hat sich die Artenanzahl der Ackerpflanzen verringert und der Anteil der schatten- und feuchteliebenden Waldarten zugenommen. Die Artenvielfalt einer Kurzumtriebsplantage ist zwischen der einer monotonen Ackerkultur und der eines vielschichtigen Waldbestandes einzuordnen.

Ökonomische Betrachtungen sind durch die Vielzahl der Anlage- und Nutzungsformen und durch die geringe Datengrundlage für die verschiedenen Bereitstellungstechnologien schwer zu verallgemeinern. Der Hackschnitzelpreis ist in den letzten 20 Jahren kontinuierlich gestiegen. Durch die zunehmende Verknappung von Waldholz ist davon auszugehen, dass der Preis weiter steigt. Der Anbau von KUP könnte somit ein zusätzliches Standbein zu den stark schwankenden Preisen der Marktfrüchte im Betriebskonzept eines Landwirtes darstellen.

## 4 Untersuchungen zur energetischen Verwertung von belasteten Aufwüchsen

Ein Großteil der Flächen um Freiberg ist stark mit Schwermetallen belastet. Diese belasteten Aufwüchse scheiden teilweise für die Verwendung im Lebensmittelbereich aufgrund von überschrittenen Maß- und Prüfwerten der BBodSchV aus. Eine energetische Verwertung stellt eine sinnvolle Alternative zur Nutzung solcher belasteter Aufwüchse dar. Im Rahmen des Projektes fanden verschiedene thermochemische Versuche statt, um das Abbrand- und Vergasungsverhalten der belasteten Brennstoffe zu analysieren.

### 4.1 Untersuchung in Feuerungsanlagen

#### 4.1.1 Untersuchungen zur Staubabscheidung bei der thermischen Verwertung von Grünland-Biomassen

Der Versuch zur thermischen Verwertung von Grünlandaufwuchs wurde 2008 durch das Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK) in Dresden durchgeführt. Dabei wurde das Abbrand- und Abscheideverhalten von zwei halmgutartigen Biomassen getestet. Es handelt sich um Heu- und Roggenstrohpellets des mit Schwermetallen belasteten Versuchsstandortes in Hilbersdorf.

Frühere Abbrandversuche von Grüngut zeigten, dass vor allem Staubinhaltsstoffe mit toxischen Eigenschaften an der Feinpartikelfraktion der Flugasche anhaften. Ohne eine sekundäre Rauchgasreinigung werden die derzeit geltenden Grenzwerte bei weitem überschritten. Im Versuch fanden eingehende Analysen zum Schadstoffein- und -austrag statt. Die Staubemission wurde mit dem am ILK Dresden entwickelten Abscheider-Prototypen ermittelt. Die Gesamtemission und das Leistungsverhalten des Brennstoffes im Kessel wurden überprüft sowie eine Schwermetall-Alkali-Bilanz aufgestellt. Die Angabe der Abscheideleistung (d. h. welche Anteile im Abscheider und wieviel Schadstoffe trotz Filter in die Atmosphäre gelangen) erfolgte korngrößenaufgeteilt.

In der 116-kW Rostfeuerung wurden mit den Brennstoffen Kesselleistungen von 87 – 95 kW erreicht, was einem Wirkungsgrad um die 85 % entspricht. Für eine Leistung unter 100 kW fällt die Kleinf Feuerungsanlage in den Geltungsbereich der 1. BImSchV. Weil sich die Anlage im Grenzbereich zur Gültigkeit der TA-Luft (ab 100 kW) bewegt und zusätzlich die Zusammensetzung der Staubinhaltsstoffe Beachtung finden sollte, wurden die Grenzwerte der TA-Luft mit herangezogen (Tabelle 35). Die Brennstoffe hielten die bestehenden Grenzwerte der BImSchV von 1997 ein.<sup>1</sup>

Nach den Vorgaben der TA-Luft lagen die Werte der Strohpellets für CO und den Gesamtstaub unterhalb der Grenzwerte. Die Gesamtstaub- und CO-Werte der Heupellets überschritten die Grenzwerte um ca. 15 %. Die Strohpellets haben demnach eine höhere Verbrennungsgüte als die Heupellets. Aufgrund der Inhaltsstoffe überschreiten die Heupellets ebenfalls die Emissions-

<sup>1</sup> neue Grenzwerte siehe Tabelle 35

grenzwerte für NO<sub>x</sub>, HCL und SO<sub>2</sub>. Beide Brennstoffe überschritten bei weitem den Grenzwert für Arsen und Blei und somit auch den festgesetzten Summengrenzwert für As und Cd, sowie den für Pb und Ni.

Die eingesetzte Abscheidetechnik basiert auf folgendem Prinzip: Das Rauchgas wird durch ein elektrisches Feld zweier Elektroden geführt (9,5 kV). Durch die elektrische Ladung bewegen sich die Staubpartikel zu einer Elektrode hin und werden dort abgeschieden. Bei beiden Brennstoffen konnte speziell für die Elemente Cd, Zn und Pb ein deutliches Konzentrationsmaximum in der 0,2 µm-Partikelgrößenfraktion nachgewiesen werden.

Um eine entsprechende Verbrennungsqualität zu erhalten, musste der Abscheider mit 130 % Auslastung betrieben werden. Der Gesamtabseidegrad lag zwischen 35 und 49 %. Durch eine Erhöhung der Verbrennungsqualität (geringerer Rußanteil) und der Auslegung des Abscheiders (höhere Spannung) könnten die Gesamtstaubemissionen weiter gesenkt werden. Trotz Einsatz des elektrostatischen Abscheiders konnten die allgemeinen Grenzwerte der TA-Luft für mehrere Parameter nicht eingehalten werden. Speziell beim Einsatz schwermetallbelasteter Brennstoffe sollten Staubabscheidetechniken mit höheren Abscheidegraden Einsatz finden, d.h entweder elektrostatische Abscheider mit höheren Wirkungsgraden oder filternde Abscheider.

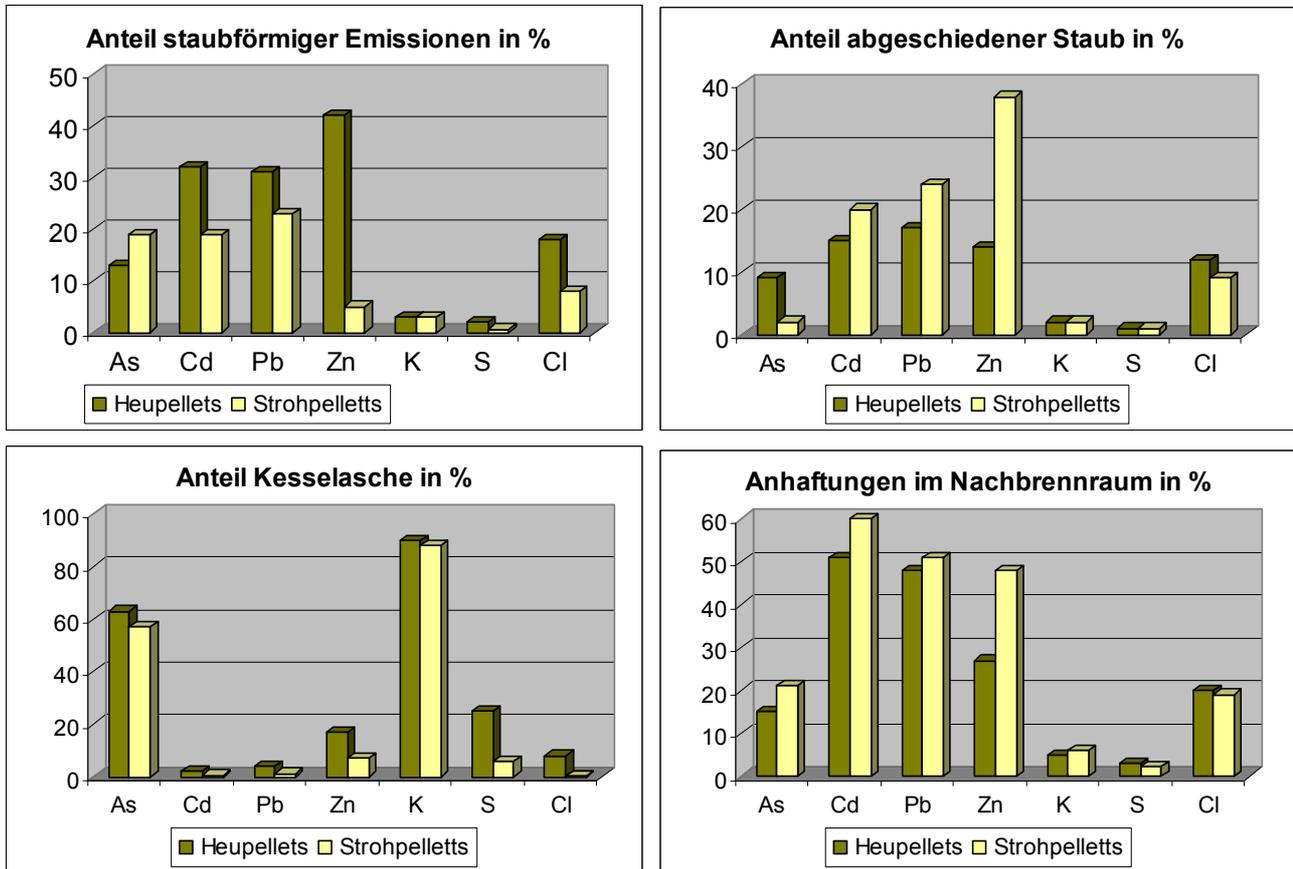
**Tabelle 35: Gegenüberstellung der Emissionsparameter von Heu- und Strohpellets zu verschiedenen Regelwerken**

Emissionsparameter	Grenzwerte				Heupellets	Strohpellets
	TA-Luft	BlmschV (1997)	BlmschV 1. Stufe (ab 2010)	BlmschV 2. Stufe (ab 2015)		
CO [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ] bei 13 Vol.-% O <sub>2</sub>	250	4000	1000	400	291	172
NO <sub>x</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ] bei 11 Vol.-% O <sub>2</sub>	500	-	-	-	671	456
SO <sub>2</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ] bei 11 Vol.-% O <sub>2</sub>	350	-	-	-	443	198
HCl [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ] bei 11 Vol.-% O <sub>2</sub>	30	-	-	-	59,9	28,1
allg. Grenzwert As, Cd [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ] bei 11 Vol.-% O <sub>2</sub> , Stoffe dürfen auch als Summe Grenzwert nicht überschreiten	0,05	-	-	-	As 0,63 Cd 0,07	As 0,66 Cd 0,07
allg. Grenzwert Pb, Ni [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ] bei 11 Vol.-% O <sub>2</sub> , Stoffe dürfen auch als Summe Grenzwert nicht überschreiten	0,5	-	-	-	Pb 2,69 Ni < 0,01	Pb 2,52 Ni < 0,01
Gesamtstaub [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ] (nur ¼ -h Mittel) bei 13 Vol.-% O <sub>2</sub>	50	150	100	20	112	24,2

Ein weiteres Hauptziel der Untersuchungen war die Aufstellung von Bilanzen. Als Austragungspfade wurden betrachtet:

- staubförmige Emissionen (Rohgas bzw. Reingas nach Abscheider)
- gasförmige Emissionen (bilanziert für SO<sub>2</sub> und HCl)
- Kesselasche (Rostasche)
- Flugasche (Brennraumende bzw. Eingang Nachbrennraum)
- Anhaftungen im Nachbrennraum und Wärmeübertrager
- abgeschiedener Staub auf der Niederschlagselektrode des Abscheiders.

Abbildung 37 zeigt die Schwermetall- und Stoffbilanzen der Hauptaustragungspfade der beiden Versuchsbrennstoffe.



**Abbildung 37: Schwermetall- und Stoffbilanzen des Gesamtaustrages bei der Verbrennung von Heu- und Strohpellets**

**Arsen** wurde bei beiden Brennstoffen vorwiegend in der Kesselasche ausgetragen (ca. 60 %). Weitere Anteile des Arsens befanden sich in den staubförmigen Emissionen (ca. 16 %) und den Anhaftungen im Kesselinneren (ca. 18 %). Arsen konnte nur in geringen Anteilen im abgeschiedenen Staub nachgewiesen werden.

Hauptaustragungspfad für den Stoff **Zink** sind die Anhaftungen im Kesselinneren und der abgeschiedene Staub des elektrostatischen Abscheiders.

**Cadmium** und **Blei** werden zu ca. 50 % durch Anhaftungen im Kesselinneren ausgetragen. Die Anteile der staubförmigen Emissionen schwanken zwischen 20 % bei Stroh und 30 % bei Heu. Die Anteile des abgeschiedenen Staubes sind bei Stroh etwa 5 – 10 % höher als beim Heu.

**Schwefel** und **Chlor** werden hauptsächlich als gasförmige Emission ausgetragen (SO<sub>2</sub> und HCl).

**Kalium** verlässt das Feuerungssystem hauptsächlich durch die Kesselasche.

Die aufgestellten Stoffbilanzen zeigen, dass als Austragungspfad für Schwermetalle die Kesselasche eine eher untergeordnete Rolle spielt. Die größten Schadstoffmengen verbleiben als Anhaftungen im Kesselinneren und werden als staubförmige Emissionen freigesetzt. In Anlagen ≥ 100 kW ist es daher notwendig, staubförmige Emissionen durch den Einsatz geeigneter Filtertechnik zu minimieren.

#### 4.1.2 Untersuchungen zur thermischen Nutzung von Biomassen aus der Landschaftspflege (Grünland)

Die Firma Janik GbR stellt Grüngutpellets von Grünland aus dem Erzgebirge her. Das Abbrand-, Verschlackungs- und Emissionsverhalten dieses Brennstoffes wurde in der 116 kW- Rostfeuerung des Biomasse-/Kesselprüfstandes am ILK Dresden untersucht. In dem 5-stündigen Versuch wurde der Kessel mit abgesenktem Vollastbetrieb gefahren, da vorangegangene Untersuchungen zeigten, dass Stroh und Grüngutbrennstoffe ein höheres Volumen an flüchtigen Verbrennungsgasen verursachen und somit erweiterte Feuerraumgeometrien benötigen.

Mit einer Kesselnennleistung < 100 kW fällt die Feuerungsanlage mit dem Brennstoff Grüngut in den Geltungsbereich der 1. BImSchV. Für Feuerungsanlagen ≥ 100 kW in Verbindung mit dem Brennstoff Grüngut gelten bereits die Grenzwerte der TA-Luft. In der TA-Luft werden zusätzlich die Emissionsparameter für NO<sub>x</sub>, Gesamt-C, SO<sub>2</sub> und HCl betrachtet. Im Verbrennungsversuch wurden beide Regelwerke einmal für einen optimierten und einmal für einen nicht optimierten Kesselbetrieb zum Vergleich herangezogen (Tabelle 36).

**Tabelle 36: Zusammenfassung der Messergebnisse/Durchschnitt der Viertel- bzw. Halbstundenmittelwerte des jeweiligen Beurteilungszeitraumes**

Emissionsparameter	Grenzwerte			nicht optimierter Betrieb		optimierter Betrieb	
	TA-Luft	BImSchV 1. Stufe (2010)	BImSchV 2. Stufe (2015)	13 Vol.-% O <sub>2</sub> (1. BImSchV)	11 Vol.-% O <sub>2</sub> (TA-Luft)	13 Vol.-% O <sub>2</sub> (1. BImSchV)	11 Vol.-% O <sub>2</sub> (TA-Luft)
CO [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	250	1000	400	866	1097	140	175
NO <sub>x</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	500	-	-	434	543	373	466
SO <sub>2</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	350	-	-	143	177	178	223
HCl [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	30	-	-	3,3	4,0	4,7	5,8
Gesamt-C [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	50	-	-	14,8	17,5	4,1	5,1
Gesamtstaub [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ] (nur ¼ -h Mittel)	50	100	20	412	515	149	187

In einem nicht optimierten Kesselbetrieb werden fast alle Grenzwerte für CO, NO<sub>x</sub> und Gesamtstaub überschritten. Anhand dieser Werte wird deutlich, wie wichtig eine optimale Kesseleinstellung für eine vollständige Verbrennung ist. Selbst im optimierten Betrieb wurde der Grenzwert für Gesamtstaub bereits für die 1. Stufe der novellierten BImSchV überschritten. Ursache dafür ist der höhere Aschegehalt von Grüngutpellets im Vergleich zu Holz. Um den anspruchsvollen Grenzwert von 20 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> Gesamtstaub der 2. Stufe (gültig ab 2015) einhalten zu können, sind sekundäre Maßnahmen in Form eines wirksamen Staubabscheiders im Abgasstrom notwendig.

Die Kesselwirkungsgrade lagen im Bereich von 72,5 % (nicht optimierter Betrieb) und 86,4 % (optimierter Betrieb). Im Vergleich mit anderen Verbrennungsversuchen entspricht dies einem mittleren bis gutem Niveau.

Die hohen Asche- und Chlorgehalte des Brennstoffes führten zu der für strohähnliche Brennstoffe typischen Verschlackung. In den Schlackeklumpen war die Struktur der eingesetzten Brennstoffpellets noch deutlich zu erkennen. Während der Versuchsdurchführung kam es zu keinerlei Beeinträchtigung der Kesseltechnik. Langfristig muss allerdings damit gerechnet werden. Insgesamt stellen die eingesetzten Grüngutpellets in Kombination mit dem Heizkessel einen einsatzfähigen Brennstoff mit guter Verbrennungsqualität dar. Vor dem Hintergrund der aktuellen Gesetzgebung ist der Einsatz eines Staubabscheiders jedoch unbedingt erforderlich.

#### 4.1.3 Untersuchungen zu Stoffbilanzen bei der thermischen Verwertung von Hölzern aus Kurzumtriebsplantagen

Der Verbrennungsversuch wurde ebenfalls am Institut für Luft- und Kältetechnik in Dresden durchgeführt. Es wurde das Abbrandverhalten verschiedener holzartiger Biomassen untersucht. **Unbelastetes Waldrestholz** wurde im Vergleich zu **belasteten Pappel- und Weidenhackschnitzeln** von der Kurzumtriebsanlage in Krummenhennersdorf verbrannt. Das Hauptaugenmerk lag auf der Zusammensetzung der Asche sowie der Partikelfracht und den Staubinhaltsstoffen der Emissionen. Bereits in vorangegangenen Untersuchungen des ILK zur Verbrennung von Grüngut konnten die Emissionsgrenzwerte für Arsen, Cadmium und Blei nach TA-Luft kaum oder nicht eingehalten werden. Es musste eine sekundäre Rauchgasreinigung erfolgen, um die Grenzwerte zu unterschreiten. Die Inhaltsstoffe eines Brennstoffes werden auf verschiedenen

Pfaden ausgetragen, zum Beispiel über die Rostasche, Anhaftungen am Kesselinneren oder am Wärmeübertrager sowie partikelförmige Emissionen. In dem Versuch wurden der Schadstoffein- und -austrag eingehend analysiert sowie entsprechende Schadstoffbilanzen erstellt.

Die Untersuchungen an den drei Holzbrennstoffen fanden in insgesamt sechs Verbrennungsversuchen statt (zwei gleichartige Verbrennungsversuche je Brennstoff). Für die Verbrennung wurde die 116 kW-Rostfeuerung des ILK-Biomasse-Prüfstandes genutzt. Zu Beginn des Versuches wurden die optimale Kesseleinstellung und die Brennstoffdaten für den jeweiligen Brennstoff ermittelt.

Während des Abbrandes wurden die Emissionscharakteristik und die Staubemissionen des Brennstoffes aufgenommen. Der Brennstoff wurde bezüglich seiner thermischen Nutzung unter Beachtung der 1. BImSchV und der TA-Luft geprüft. Um die Gesamtstaubbelastung und die Staubinhaltsstoffe im Abgas zu reduzieren, wurde ein im ILK entwickelter Prototyp eines durch Druckunterschied filternden Abscheiders eingesetzt. Ebenso wurde das Leistungsverhalten des Brennstoffes im Kessel beurteilt.

Bei der Aufstellung einer Schwermetall-Alkali-Bilanz wurde festgestellt, an welchen Orten im Verbrennungsraum und im Gasweg sich die Schadstoffe ablagern, welcher Anteil im Abscheider verbleibt und wieviel trotz Filter in die Atmosphäre gelangt. Die Messungen in Bezug auf die Abscheideleistung wurden korngößenaufgelöst durchgeführt.

Die 116 kW-Rostfeuerung des Kesselprüfstandes fällt mit einer Leistung von < 500 kW in den Geltungsbereich der 1. BImSchV. Alle drei Brennstoffe unterschritten die Emissionsgrenzwerte für Gesamtstaub und CO. Die Kurzumtriebshölzer Weide und Pappel zeigen eine Verbrennungsgüte auf gleichem Niveau wie Waldrestholz. Der Brennstoff Waldrestholz besitzt emissionstechnische Vorteile auf Grund seines geringeren Stickstoffgehaltes. Der Emissionswert für NO<sub>x</sub> lag 30 – 40 % unter dem der Kurzumtriebshölzer. Der eingesetzte Prototyp eines filternden Abscheiders wies hohe Abscheidegrade von durchschnittlich 96 % auf. Die Staubgehalte im Rohgas lagen auf einem Niveau von 250 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>, was den Einsatz der Abscheidetechnik bereits im Bereich der 1. BImSchV bedingt. Selbst wenn das Regelwerk der TA-Luft zugrunde gelegt würde, hätten alle drei Brennstoffe die Emissionsbegrenzungen für anorganische Stäube (As, Pb, Cd, Ni) deutlich unterschritten. Der Brennstoff Weide von der KUP Krummenhennersdorf würde laut dem Regelwerk der TA-Luft die Emissionsgrenzwerte für Cd um 0,015 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> überschreiten. Auch wenn das Regelwerk der TA-Luft in kleineren Anlagen nicht zum Einsatz kommt, sollten beim Einsatz von schwermetallbelasteten Brennstoffen Staubabscheidetechniken mit hohen Abscheidegraden zum Einsatz kommen, um die Schadstoffe aus dem Stoffkreislauf auszukoppeln.

Durch den Einsatz eines filternden Abscheiders konnte die Gesamtstaubbelastung im Abgas sowie die Gehalte an Schwermetallen (Cd, Pb) und der Stoffe As, Zn, S, Cl und K deutlich gemindert werden. Filternde Abscheider weisen im Vergleich zu elektrostatischen Abscheidern höhere Abscheidegrade auf.

Ein weiteres Hauptziel der Untersuchungen war die Aufstellung von Bilanzen über die Ein- und Austragspfade der Stoffe As, Cd, Cr, Pb, Ni, K, Zn, S, und Cl. Dazu wurden alle zugegebenen Brennstoffmengen und Rückstände ausgewogen und mittels chemischer Analyse auf ihre Inhaltsstoffe untersucht.

Folgende Austragspfade wurden in die Untersuchungen einbezogen:

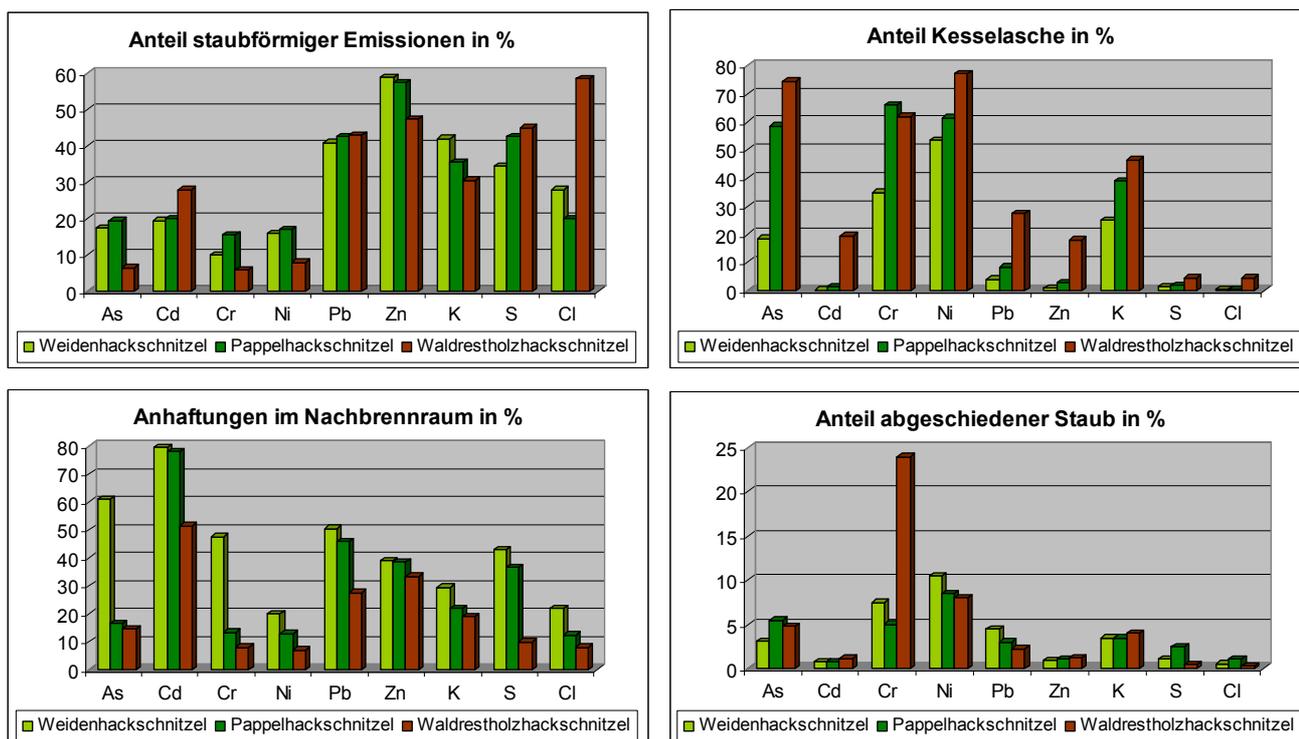
- staubförmige Emissionen (Rohgas bzw. Reingas nach Abscheider)
- Austrag als gasförmige Emission (bilanziert für die Stoffe Schwefel-SO<sub>2</sub> und Chlor-HCl)
- Kesselasche (Rostasche)
- Flugasche (Brennraumende bzw. Eingang Nachbrennraum)
- Anhaftungen im Nachbrennraum und Wärmeübertrager (kurz: Anhaftungen).

Die in der Bilanzierung erzielten Untersuchungsergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden (Abbildung 38):

Die Bilanzanteile der Flugasche spielen insgesamt eine untergeordnete Rolle. **Arsen** wird bei der Pappel und dem Waldrestholz hauptsächlich mit der Kesselasche ausgetragen (57 – 74 %). Für die Weide wurden abweichend dazu 30 % in den staubförmigen Emissionen und deren Anhaftungen ermittelt.

Das Element **Cadmium** wird bei allen Brennstoffen mit 40 – 87 % als Anhaftung im Kesselinneren im Output-Pfad gefunden. **Chrom** wird zum Großteil über die Kesselasche ausgetragen. Verschiebungen zugunsten der Flugasche sind möglich. Für **Nickel** wurde das einheitlichste Bild über alle Brennstoffe erzielt. Zu 57 – 81 % ist die Kesselasche der Hauptaustragungspfad. **Blei** wird vorrangig über staubförmige Emissionen sowie über Anhaftungen im Nachbrennraum und am Wärmeübertrager ausgetragen. Wiederfindungsraten von über 200 % bei der Weide lassen jedoch auf systematische Unsicherheiten schließen. **Zink** wird ebenfalls über Anhaftungen und staubförmige Emissionen ausgetragen, allerdings mit Wiederfindungsraten, die wesentlich näher am Idealwert von 100 % liegen.

Ein sehr gleichmäßiges Bilanzverhalten bei allen drei Brennstoffen wies **Kalium** auf. Zu jeweils  $\frac{1}{3}$  sind die staubförmigen Emissionen, die Kesselasche und die Anhaftungen im Kesselinneren die Hauptaustragungspfade. Neben Nickel zeigt Kalium die besten und stabilsten Wiederfindungsraten. Eine Bilanzierung für **Schwefel** und **Chlor** stellte sich schwierig dar. Die beiden Stoffe sind stark von der Verbrennungsdynamik abhängig. Ein großer Teil der beiden Elemente wird als gasförmige Emission ausgetragen.



**Abbildung 38: Komplettbilanz der drei eingesetzten Brennstoffe**

Das Waldrestholz ohne Schwermetallbelastung zeigt im Vergleich zu den Kurzumtriebshölzern Pappel und Weide ein vergleichbares Bilanzverhalten. Der Nachweis über die geringe Schwermetallbelastung konnte durch die Untersuchung der Staubinhaltsstoffe und des Brennstoffes selbst erbracht werden.

Die Hackschnitzel der Kurzumtriebshölzer erwiesen sich als einsatzfähiger Brennstoff mit den für Holz typisch guten Verbrennungseigenschaften. Es traten keine Verschlackungen auf. Auf Grund der Rohgasstaubgehalte sind Maßnahmen zur Minderung der Gesamtstaubfracht sowie der Staubinhaltsstoffe zwingend notwendig. Die Grenzwerte der novellierten BImSchV konnten nur durch einen filternden Abscheider (Taschenfilter) eingehalten werden. Durch den Abscheider erfolgt ebenso eine Auskopplung von Schadstoffen aus dem Stoffkreislauf. Die Bewertung der Kesselasche beider Kurzumtriebshölzer hinsichtlich einer Ablagerung auf Deponien der Klasse II (Hausmülldeponie) erfolgte positiv. Die Anhaftungen im Kesselinneren enthalten ebenfalls Schadstoffe und stellen mit einem Masseanteil von 20 % einen wesentlichen Anteil der Kesselasche dar.

Demnach müssen für die Kesselaschen und die Reinigungsabfälle Lösungen für die Entsorgung oder Verwertung der Stäube gefunden werden.

#### 4.1.4 Untersuchungen der Emissionscharakteristik und Stoffbilanzen bei der thermischen Verwertung von Kurzumtriebshölzern im LVG Köllitsch

Die Pappel- und Weidenhackschnitzel der Ernte 2010 aus Krummenhennersdorf wurden an das LVG Köllitsch geliefert. Dieses mit Schwermetallen belastete Material wurde mit den sonst bezogenen Hackschnitzeln aus Waldrestholz in einem Abbrandversuch getestet. Die Untersuchungen an der Praxisanlage, einer 280 kW-Rostfeuerung der Firma Mawera, führte das Institut für Luft- und Kältetechnik durch.

Für die Brennstoffe wurden jeweils mehrere Verbrennungsversuche an unterschiedlichen Versuchstagen durchgeführt:

- Weide            fünf Versuchstage
- Pappel           drei Versuchstage
- Waldrestholz   zwei Versuchstage

Mit einer Kesselleistung < 1.000 kW in Verbindung mit dem Brennstoff Holz fällt die Kleinfeuerungsanlage in den Geltungsbereich der 1. BImSchV 2010. Weil es sich um eine Altanlage handelt, gelten bis 2025 die Grenzwerte der alten BImSchV von 1997. Erst ab 2025 treten für den Kessel die Grenzwerte der 1. Stufe der neuen BImSchV in Kraft. Das Inbetriebnahmedatum einer Anlage ist entscheidend, ab wann die 1. Stufe der neuen 1. BImSchV gilt. An mindestens einem Messtag wurden die Grenzwerte für Gesamtstaub und CO bei allen Brennstoffen unterschritten. Tabelle 37 zeigt allerdings, dass die Mittelwerte aller Messungen für Gesamtstaub selbst nach der alten BImSchV die Grenzwerte um ca. 10 – 20 % überschritten. Die Grenzwerte für CO wurden nur für die 1. Stufe eingehalten. Bei Erstmessung der Anlage durch das Schornsteinfegerhandwerk wurden 120 mg/m<sup>3</sup> Staub im Abgas festgestellt. (Messprotokoll vom 17.04.2009). Dies bedeutet, dass die Anlage einen für Holzfeuerungsanlagen vergleichsweise hohen Staubgehalt im Abgas aufweist, der Grenzwert jedoch eingehalten wurde.

Bei den Messungen mit KUP-Hölzern wurde der Heizkessel auch im Teillastbetrieb gefahren (mangelnde Wärmeabnahme), was sich bei Holzfeuerungsanlagen meist negativ auf die Staubemissionen auswirkt. Es wurden sowohl Staubmesswerte unterhalb des Grenzwertes von 150 mg/m<sup>3</sup> wie auch Messwerte oberhalb diese Grenzwertes festgestellt. Das heißt, dass der Staubgrenzwert unter Vollastbedingungen (Winter) und guter Kesseleinstellung eingehalten werden kann, aber das Emissionsniveau der Anlage bezüglich Staub im Grenzwertbereich liegt und der Einsatz der Abscheidetechnik (Demonstrationsanlage) durchaus sinnvoll erscheint.

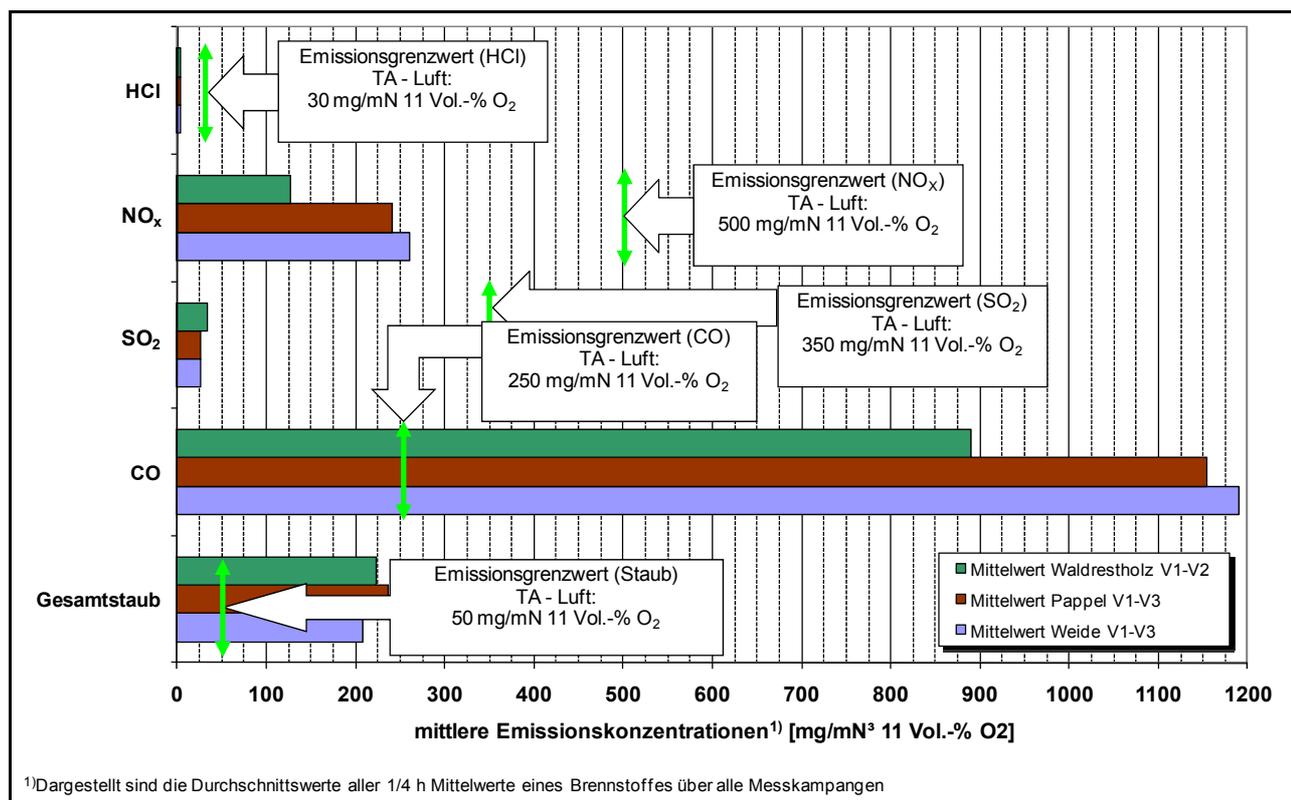
**Tabelle 37:        Ermittelte, mittlere Emissionskonzentrationen (ohne An- und Abfahrbetrieb) des Biomassekessels im LVG Köllitsch**

Versuchsbrennstoff	Gesamtstaub	CO (Kesselleistung > 150– 500 kW)
Weide	167	976
Pappel	189	923
Waldrestholz	179	712
Grenzwert 1. BImSchV 1997	150 [mg/m <sup>3</sup> i.N.tr. 13.-Vol.-% O <sub>2</sub> ]	1000 [mg/m <sup>3</sup> i.N.tr. 13.-Vol.-% O <sub>2</sub> ]
Grenzwert 1. BImSchV 2010, 1. Stufe	100 [mg/m <sup>3</sup> i.N.tr. 13.-Vol.-% O <sub>2</sub> ]	1000 [mg/m <sup>3</sup> i.N.tr. 13.-Vol.-% O <sub>2</sub> ]
Grenzwert 1. BImSchV 2010, 2. Stufe	20 [mg/m <sup>3</sup> i.N.tr. 13.-Vol.-% O <sub>2</sub> ]	400 [mg/m <sup>3</sup> i.N.tr. 13.-Vol.-% O <sub>2</sub> ]

Alle drei Brennstoffe zeigten ein ähnliches Verbrennungsverhalten bezüglich Gesamtstaub und Verbrennungsqualität. Die NO<sub>x</sub>-Belastung im Abgas des Waldrestholz ist ca. 40 % geringer als bei den Kurzumtriebshölzern. Die Ursache dafür liegt in dem höheren Rindenanteil der Kurzumtriebshölzer und dem Umstand, dass Kurzumtriebsplantagen meist auf nähr- und stickstoffreichem Ackerland angepflanzt werden und somit einen höheren N-Gehalt aufweisen als Waldrestholz von nährstoffarmen Böden. Die CO-Werte könnten durch eine Optimierung der Kesselparameter (z. B. Einstellung der O<sub>2</sub>-Zufuhr) noch deutlich reduziert werden.

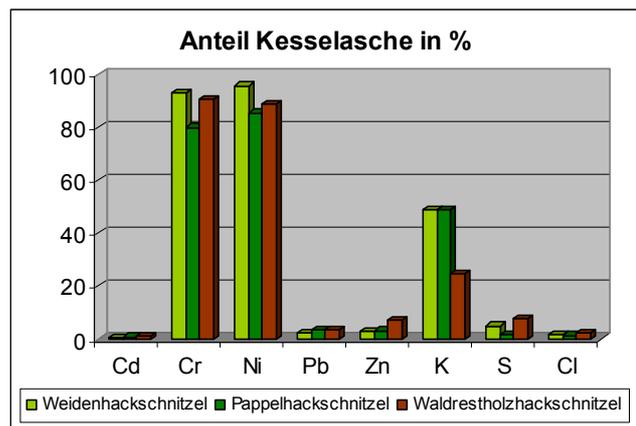
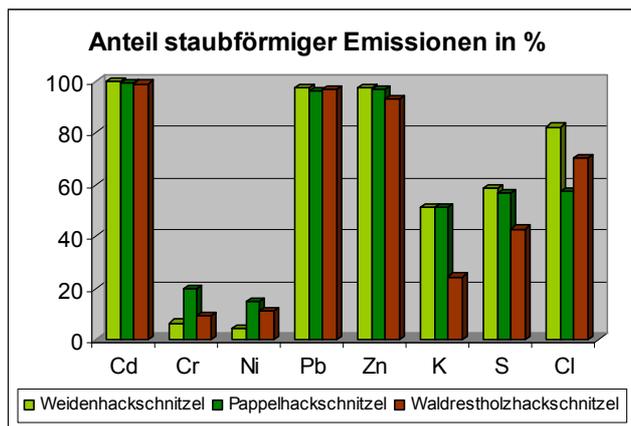
Mit der momentan installierten Technik eines nachgeschalteten Staubabscheiders wird die Einhaltung der Grenzwerte für die 1. und 2. Stufe der neuen BImSchV nicht möglich sein. Um die Feinstäube mit Partikelgrößen zwischen 0,2 und 0,3 µm aus dem Abgas herauszufiltern, ist der zusätzliche Einsatz von filternden oder elektrostatischen Abscheidern notwendig. Alle drei Brennstoffe erreichten Kesselwirkungsgrade von ca. 75 – 85 %.

Als Bewertungsmaßstab für weitere relevante Emissionsparameter wie NO<sub>x</sub>, HCl und SO<sub>2</sub> wurden die Grenzwerte der TA-Luft (bei Holz gültig ab einer Leistung von 1 MW) herangezogen. Diese Grenzwerte wurden bei allen Brennstoffen unterschritten (Abbildung 39).



**Abbildung 39: Messergebnisse gasförmige Komponenten, Gesamtstaub im Biomassekessel des LVG Köllitsch, Bezug TA-Luft**

Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen war die Erstellung von Stoffbilanzen der Elemente Arsen (As), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kalium (K), Nickel (Ni), Blei (Pb), Zink (Zn), Schwefel (S) und Chlor (Cl). Dazu wurden für jeden Brennstoff Proben der Rostasche und ausgewählte Filterpapiere der Gesamtstaubmessungen herangezogen. Die Aufstellung der Stoffbilanzen gestaltete sich in der Praxisanlage wesentlich schwieriger als unter Versuchsbedingungen am Kesselprüfstand des ILK. Die Wägung der großen Brennstoffmengen mittels Radlader und Bodenwaage sowie die Aufrechterhaltung des laufenden Kesselbetriebes führten zu entsprechend höheren Messunsicherheiten. Als Austragungspfade wurden die staubförmigen Emissionen, die Kesselasche (Rostasche) und die gasförmigen Emissionen (für SO<sub>2</sub> und HCl) betrachtet. Wie Abbildung 40 zeigt, tragen die staubförmigen Emissionen gegenüber der Kesselasche für die meisten Elemente eine weitaus größere Menge des Stoffes aus dem System aus.



**Abbildung 40: Schwermetall- und Stoffbilanzen der 3 eingesetzten Brennstoffe bezüglich des Anteils staubförmiger Emissionen und Anteile in der Kesselasche**

Die Art der Austragung ist abhängig vom Siede- bzw. Schmelzpunkt des Elementes. Cadmium ist mit einem Siedepunkt bei 765 °C wesentlich flüchtiger als Chrom und Nickel (Siedepunkt ca. bei 2.700 °C) und wird daher verstärkt über die gasförmige Phase sowie durch Anhaftungen an feinen Staubpartikeln ausgetragen.

Für Arsen konnte auf Grund der sehr geringen Gehalte in Staub und Asche keine Bilanzierung erfolgen. Die beiden Elemente Schwefel und Chlor emittieren zusätzlich zwischen ca. 20 bis 50 % als gasförmigen Anteil. Allgemein zeigte sich für den jeweiligen Inhaltsstoff über alle Brennstoffe ein einheitlicher Austragungsprozess. Die Werte korrelierten größtenteils mit den Ausgangsgehalten in den Brennstoffen und den Schmelz- und Siedetemperaturen. Um die Vollständigkeit der Bilanzen bewerten zu können, wurden die Wiederfindungsraten der Stoffe errechnet. Die Berechnungsergebnisse zeigen eine mittlere Sicherheit für die aufgestellten Bilanzen.

Die Messergebnisse der Emissionskonzentrationen wurden den allgemeinen Grenzwerten für Staubinhaltsstoffe der TA-Luft gegenübergestellt (Tabelle 38). Zwischen Kurzumtriebshölzern und Waldrestholz bestand kein signifikanter Unterschied in den Schwermetallemissionen. Die Grenzwerte der TA-Luft wurden sicher für die Summe von Pb und Ni sowie Cr als Einzelstoff eingehalten. Die Cadmiumgehalte überschritten den zulässigen Grenzwert bei allen Brennstoffen, vor allem aber bei der Weide. Die hohen Cadmiumgehalte bei Weide und Pappel korrelierten mit den hohen Gehalten im Brennstoff sowie dem Hauptaustragungsprozess staubförmige Emissionen. Beim Waldrestholz konnte diese Tendenz nicht nachgewiesen werden. Auch wenn das Regelwerk der TA-Luft beim eingesetzten Kessel nicht zur Geltung kommt, sollten beim Einsatz schwermetallbelasteter Brennstoffe Staubabscheidetechniken mit hohen Abscheidegraden zum Einsatz kommen.

**Tabelle 38: Bewertung Staubinhaltsstoffe nach TA-Luft [Versuchsmittelwerte]**

Emissionskonzentrationen	Weide	Pappel	Waldrestholz
As [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> 11 Vol.-O <sub>2</sub> ]	≤ 0,001*	≤ 0,001*	≤ 0,001*
Cd [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> 11 Vol.-O <sub>2</sub> ]	0,234	0,082	0,111
Summe As und Cd [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> 11 Vol.-O <sub>2</sub> ]	0,228	0,082	0,109
allg. Grenzwert As, Cd nach TA-Luft Nr. 5.2.7.1.1 (Klasse I krebserzeugend); Stoffe dürfen auch als Summe den Grenzwert nicht überschreiten [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> 11 Vol.-O <sub>2</sub> ]	0,05 mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>		
Pb [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> 11 Vol.-O <sub>2</sub> ]	0,150	0,098	0,105
Ni [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> 11 Vol.-O <sub>2</sub> ]	0,004	0,007	0,011
Summe Pb und Ni [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> 11 Vol.-O <sub>2</sub> ]	0,154	0,103	0,116
allg. Grenzwert Pb, Ni nach TA-Luft Nr. 5.2.2 (Klasse II anorganische, staubförmige Stoffe); Stoffe dürfen auch als Summe den Grenzwert nicht überschreiten [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> 11 Vol.-O <sub>2</sub> ]	0,5 mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>		
Cr [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> 11 Vol.-O <sub>2</sub> ]	0,006	0,082	0,006
allg. Grenzwert Cr nach TA-Luft Nr. 5.2.2 (Klasse III anorganische, staubförmige Stoffe) der Stoff darf in Summe mit anderen Elementen den Grenzwert nicht überschreiten [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> 11 Vol.-O <sub>2</sub> ]	1 mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>		

\*Massenkonzentrationen ≤ 0,001 – nicht nachweisbar

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Proben der Kesselaschen hinsichtlich ihrer Deponierung untersucht. Alle Aschen entsprachen der Deponieklasse II nach DepV (Hausmüll). Für den Brennstoff Weide wurden die zulässigen Konzentrationen im Eluat zwar überschritten, aber eine Verbringung (nach behördlicher Genehmigung) ist grundsätzlich möglich, weil es sich um einen Einzelwert mit einer Überschreitung im Bereich von 40 % handelt. Eine Rückführung der Aschen auf die Anbauflächen würde Vorteile bringen, weil die Asche als Düngung dienen würde und hinsichtlich der Schwermetalle der Stoffkreislauf wieder geschlossen wäre. Dieser Weg der Verwertung muss allerdings mit der gültigen Düngemittelverordnung vereinbar sein.

Abschließend kann gesagt werden, dass Hölzer aus Kurzumtriebsplantagen einen wesentlichen Teil zur Bereitstellung von Wärme beitragen könnten und emissionstechnische Vorteile gegenüber der Verbrennung von halmgutartigen Brennstoffen bringen. Eine Minimierung der Schadstoffemissionen könnte in Köllitsch durch eine optimale Parametrierung der Feuerungsanlage und einer Ausrüstung mit Staubabscheidetechnik erfolgen.

#### 4.1.5 Durchführung von Untersuchungen zur Vergasung verschiedener Brennstoffe in einer Praxis-Vergasungsanlage (BHKW) zur Strom- und Wärmeerzeugung im kleinen Leistungsbereich (10 kW)

Die Professur Kraftwerks- und Energietechnik der Hochschule Zittau/Görlitz (FH) führte gemeinsam mit der Professur für Technische Thermodynamik der TU Dresden einen Versuch zur Vergasung von Holz- und halmgutartigen Brennstoffen in einem Holzvergaser-Blockheizkraftwerk durch. Bei dem Holzvergaser-BHKW (Abbildung 41) handelt es sich um eine Praxisanlage in Reuth. Das BHKW läuft nach dem Schachtvergaser-Prinzip mit einer elektrischen Leistung von 10 kW.



Abbildung 41: BHKW (<10 kW); Reuth

In der Anlage sollte die Vergasung von sechs Brennstoffen getestet werden:

- Hackschnitzel von Waldrestholz (WHS), welche im üblichen Betrieb Verwendung finden
- belastete Pappelhackschnitzel (PHS) der KUP Krümmenhenndorf
- belastete Weidenhackschnitzel (WHS) der KUP Krümmenhenndorf
- ein Gemisch aus 50 % Waldrestholz hackschnitzeln und 50 % Stroh pellets (SP)

- ein Gemisch aus 80 % Strohpellets und 20 % Waldrestholz hackschnitzeln
- ein Gemisch aus 50 % Waldrestholz hackschnitzeln und 50 % Miscanthus pellets (MP).

Tabelle 39 zeigt die Inhaltsstoffanalyse der verwendeten Brennstoffe.

**Tabelle 39: Inhaltsstoffe der verwendeten Brennstoffe im wasserfreien Zustand des Praxisversuchs im BHKW (10 kW), Reuth**

Inhaltsstoffe	Waldhackschnitzel	Weidenhackschnitzel	Pappelhackschnitzel	Strohpellets	Miscanthus pellets
Asche [%]	0,63	1,43	1,67	6,64	3,22
Flüchtige Bestandteile [%]	82,5	80,6	79,7	75,5	78,0
C [%]	50,6	49,4	49,5	45,9	47,9
H [%]	6,1	6,0	6,0	5,8	5,9
N [%]	0,31	0,59	0,73	0,68	0,65
S [%]	0,01	0,04	0,04	0,10	0,08
Cl [%]	n.b	0,12	0,15	n.b	0,24
Heizwert [MJ/kg]	18,95	18,34	18,44	17,07	17,80
Leistung BHKW [kW <sub>el</sub> ]	11,5	11,3	n.b	10,6	n.b

Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurde das Anlagenverhalten protokolliert, der Massenin- und -output wurde bestimmt sowie die Gaszusammensetzung. Stichprobenartig wurden Proben der Brennstoffe, der Bettaschen sowie der Abgase genommen und auf Schwermetalle untersucht.

Im Gegensatz zu dem vom Betreiber eingesetzten gehackten Waldrestholz konnte mit den Vergleichsbrennstoffen kein automatisierter Betrieb eingestellt werden. Die Pappel- und Weidenhackschnitzel waren zu fein gehäckselt. Auch die Stroh- und Miscanthus pellets bildeten eine zu dichte Brennstoffpackung im Vergaser, sodass die Gasdurchströmung und die Luftzufuhr nicht gewährleistet werden konnten. Nur durch regelmäßiges Rütteln am Rost und manuelle Beseitigung von Brückenbildungen konnte der Betrieb aufrechterhalten werden. Durch diese Hemmnisse wurde die benötigte Reaktionstemperatur nicht erreicht, was wiederum zu einer verringerten Kohlenstoffumsetzung der Biomasse führte. Das Produktgas bestand aus einem höheren Anteil langkettiger Kohlenwasserstoff-Konzentrationen, wodurch die Teerbelastung stieg.

Von den getesteten Brennstoffen verlief nur der Versuch mit der Massemischung 50 % Holz hackschnitzel und 50 % Stroh pellets problemlos. Bei allen anderen Varianten (außer den üblichen Waldhackschnitzeln) konnte kein erfolgreicher Versuchsverlauf verzeichnet werden. Um diesen zu erreichen, müssen bei dem untersuchten Vergaser gröbere Brennstoffe eingesetzt werden. Das heißt, die Hackschnitzel dürfen nicht zu klein gehäckselt werden. Auch bei Pellets ist eine gröbere Variante zu wählen. Mit den Produktgasen konnten elektrische Leistungen zwischen 10,6 und 11,5 kW<sub>el</sub> erreicht werden. Tabelle 40 zeigt die Zusammensetzung der Produktgase. Es besteht nur ein marginaler Unterschied in der Produktgaszusammensetzung der verschiedenen Versuchsbrennstoffe.

**Tabelle 40: Zusammensetzung der Produktgase**

Variante	Produktgasvolumenstrom [m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]	Produktgaszusammensetzung [Vol %]				Bemerkungen zum Anlagenbetrieb
		CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	
Waldhackschnitzel	32-35	18-20	16-18	2	10-12	normal
Weidenhackschnitzel	28-30	15-18	15-17	4-8	12-14	ungleichmäßig
Stroh pellets/ Waldhackschnitzel (50:50)	32-33	17-18	16-17	2	12	normal
Miscanthus pellets/ Waldhackschnitzel (50:50)	25-30	16-19	16-17	2-3	10-12	stärkere Schwankungen
Pappelhackschnitzel	28-30	15-18	15-17	2-4	12-14	ungleichmäßig

Die Abgasuntersuchung bezüglich der Schwermetalle ergaben aufgrund der mangelhaften Vergasung der Brennstoffe keine eindeutigen Ergebnisse. Der Verbleib der Schwermetalle konnte nicht vollends geklärt werden. Im Abgas war lediglich die Konzentration von Cadmium so hoch, dass sie nachgewiesen werden konnte. Alle anderen Schadstoffanteile lagen unterhalb der Nachweisgrenze. Damit sollten sich die im Brennstoff vorhandenen Schwermetalle im Reststoff und Kondensat wiederfinden lassen.

## 4.2 Testung der Brennstoffe zur Herstellung von BtL-Kraftstoffen

Unter BtL-Kraftstoffen (Biomass to Liquid) versteht man einen synthetisch hergestellten Kraftstoff aus Kohlenwasserstoffen, der aus verschiedensten Biomassen gewonnen werden kann. Die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) definiert BtL wie folgt:

„Biomass-to-Liquid“ bezeichnet eine Prozesskette, die Biomasse über die thermochemische Vergasung in Synthesegas (Gemisch aus CO und H<sub>2</sub>) und anschließende Synthese in flüssige Kohlenwasserstoffe umwandelt. Die so erzeugten biogenen Kohlenwasserstoffe können mit bekannten Prozessen der Erdölraffination zu marktfähigen Kraftstoffen wie Diesel nach EN 590 oder Benzin nach EN 228 aufgearbeitet werden. Dieser Treibstoff kann problemlos in herkömmlichen Dieselmotoren Verwendung finden. Durch seine Reinheit verbessert er die Verbrennung und reduziert die Abgasemission.

### 4.2.1 BtL-Kraftstoff aus Holzhackschnitzeln

Im Jahr 2008 sollte in Freiberg/Sachsen die Beta-Anlage mit einer Jahresproduktion von 18 Mio. Litern BtL-Kraftstoff als erste kommerzielle Anlage ihren Betrieb aufnehmen. In der Anlage kommt ein patentiertes Carbo-V-Verfahren zum Einsatz. In einem dreistufigen Prozess wird dabei ein hochreines, teerfreies und methanarmes Synthesegas erzeugt. Die Hauptbestandteile des Synthesegases sind CO und H<sub>2</sub>. Mit mehreren Schritten der Gasreinigung wird das Gas auf die Synthese zum Kraftstoff vorbereitet. Die Umwandlung zum Kraftstoff erfolgt mittels Fischer-Tropsch-Synthese. In einem Katalysator reagieren die Bestandteile des Synthesegases (CO und H<sub>2</sub>) zu flüssigen Kohlenwasserstoffen, dem BtL-Kraftstoff. Der Kraftstoff ist aromaten- und schwefelfrei und hat durch die hohe Cetanzahl ein verbessertes Zünd- und Brennverhalten, was wiederum die Abgasemission verringert.

Im 1. Quartal 2008 wurden die geernteten Holzhackschnitzel der Kurzumtriebsplantage Krummenhennersdorf nach Freiberg geliefert. Mit diesen Holzhackschnitzeln sollte ein Testversuch in der Betaanlage zur Herstellung von BtL-Kraftstoff stattfinden. Ziel war es, Informationen zur Versuchsdurchführung, zu Stoffströmen und Energiebilanzen zu erlangen sowie Aussagen zur Gas-, Kraftstoff- und Reststoffqualität unter Betrachtung der Schwermetallproblematik zu treffen. Aufgrund technischer Probleme kam es zu einer großen Verzögerung der Versuchsdurchführung. Ergebnisse lagen bis zum Projektabschluss im März 2011 nicht vor.

### 4.2.2 Vergasung von Miscanthuspellets in der Zirkulierenden Wirbelschicht

Der Versuch wurde vom Clausthaler Umwelttechnik-Institut durchgeführt. Ziel war es, die Vergasungsfähigkeit von Miscanthuspellets als Vorstufe der Fischer-Tropsch-Synthese für die Herstellung von BtL-Kraftstoffen zu testen.

Bei der Vergasungsanlage handelt es sich um eine zirkulierende Wirbelschicht mit einer Leistung von 0,4 MW<sub>therm</sub> und Betriebstemperaturen im Bereich von 700 bis 950 °C (Abbildung 42). Der Anlagenbetrieb konnte ohne Störungen realisiert werden. Die Gasreinigung wurde durchgeführt mittels einer Quenche zur Abkühlung des Synthesegases, eines H<sub>2</sub>O-Wäschers zur Abscheidung saurer Komponenten, eines RME-Wäschers zur Abtrennung der Teere und eines Filters mit Aktivkoks zur Feinstreinigung vor Schwefelverbindungen.

Das erzeugte Synthesegas hatte einen Heizwert von 9,94 – 10,52 MJ/Nm<sup>3</sup>. Die Teergehalte von 13 g/Nm<sup>3</sup> lagen unterhalb der Werte für Holzpellets. Die erzielten H<sub>2</sub>/CO-Verhältnisse lagen mit 1,13 – 1,54 in einem üblichen Bereich für vergleichbare Biomassen. Für das gewünschte H<sub>2</sub>/CO Verhältnis von 2/1 bei der Fischer-Tropsch-Synthese waren die Werte jedoch noch zu gering. Durch einen weiteren Arbeitsschritt, in dem das Synthesegas durch mehrere Katalysatoren geleitet wird, könnte das gewünschte H<sub>2</sub>/CO Verhältnis erreicht werden. Der Versuch hat gezeigt, dass sich die Herstellung von Synthesegas mit Miscanthuspellets problemlos realisieren lässt.



**Abbildung 42: Zirkulierende Wirbelschicht des CUTEC-Institutes**

## 4.3 Fazit Verwertungsversuche

Alle holz- und halmgutartigen Brennstoffe, die in der dreijährigen Projektlaufzeit in verschiedenen Verwertungsversuchen Verwendung fanden, sind als Brennstoffe einsetzbar. Je nach Anlagengröße müssen die jeweiligen Regelwerke Beachtung finden. Die Grenzwerte der novellierten 1. BImSchV und die Grenzwerte der TA-Luft wurden zum Teil erheblich überschritten (siehe Kapitel 4.1.1 bis 4.1.4). Um alle Brennstoffe verwenden zu können, vor allem mit dem Hintergrund der Schwermetallproblematik, kann in Zukunft auf den Einsatz geeigneter Gasabscheidetechnik nicht mehr verzichtet werden. Auf dem Gebiet der Abscheidetechnik (elektrostatische bzw. filternde Abscheider) besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

Die Eluatversuche der Aschen haben gezeigt, dass die Kesselaschen der Kurzumtriebshölzer in die Deponieklasse II (Hausmüll) einzuordnen sind. Es besteht also keine Notwendigkeit, diese gesondert zu verbringen. Hinsichtlich der Entsorgung der wesentlich höher belasteten Kesselreinigungsrückstände besteht noch Klärungsbedarf.

Die Verwertung der Hackschnitzel und Pellets in einer kleinen Praxis-Vergaseranlage (10 kW) gestaltete sich schwierig. Das Hauptproblem war die durch zu kleine Pellets/Hackschnitzel entstehende, zu dichte Brennstoffpackung im Vergaser, die die Ausbildung einer ausreichend heißen Reaktionszone verhinderte. Prinzipiell war die Vergasung der Brennstoffe möglich. Für einen ungestörten Anlagenbetrieb ist es jedoch notwendig, dass die jeweiligen Brennstoffmengen auf den Vergaser abgestimmt werden. Wichtig ist das Vorhandensein einer ausreichend großen Reaktionszone, damit überhaupt eine Vergasung stattfinden kann.

Die Vergasung von Miscanthuspellets in einer zirkulierenden Wirbelschicht des Clausthaler Umwelttechnikinstitutes konnte problemlos durchgeführt werden. Das gebildete Synthesegas könnte nach weiterer Reinigung bei der Fischer-Tropsch-Synthese eingesetzt werden und zur Herstellung von BtL-Kraftstoff dienen.

Die vollständigen Berichte über die Verwertungsversuche sind zusammen mit dem Abschlussbericht des Gesamtvorhabens im Internet des LfULG verfügbar. Bis zum Projektabschluss lagen leider noch keine Ergebnisse über den Vergasungsversuch zur BtL-Herstellung aus der Anlage in Freiberg/Sachsen vor.

# 5 Literatur

- AL HUSSEIN, I. A. (2006): Faunistische Begleituntersuchungen im Rahmen des Verbundprojektes „Biomasseaufbau und –verwertung als Energieträger/Humusstoff von Flächen mit unterschiedlichem Schwermetallbelastungsgard und Grünlandgebieten“ auf der Versuchsfläche Krummenhennersdorf bei Freiberg (Freistaat Sachsen). Endbericht 2006, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- AL HUSSEIN, I. A. (2007): Faunistische Begleituntersuchungen im Rahmen des Verbundprojektes „Biomasseaufbau und –verwertung als Energieträger/Humusstoff von Flächen mit unterschiedlichem Schwermetallbelastungsgard und Grünlandgebieten“ auf der Versuchsfläche Krummenhennersdorf bei Freiberg (Freistaat Sachsen). Endbericht 2007, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- AL HUSSEIN, I. A. (2008): Faunistische Begleituntersuchungen im Rahmen des Verbundprojektes „Biomasseaufbau und –verwertung als Energieträger/Humusstoff von Flächen mit unterschiedlichem Schwermetallbelastungsgard und Grünlandgebieten“ auf der Versuchsfläche Krummenhennersdorf bei Freiberg (Freistaat Sachsen). Endbericht 2008, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- AL HUSSEIN, I. A. (2009): Faunistische Begleituntersuchungen im Rahmen des Verbundprojektes „Anbau von Energiepflanzen für die nachhaltige, ressourcenschonende und klimaverträgliche Rohstoffabsicherung zur Erzeugung von Strom/Wärme und synthetischen Biokraftstoffen der zweiten Generation“. Endbericht 2009, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- ARNDT, E. & K. RICHTER (1995): Rote Liste Laufkäfer – Stand 1995. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Radebeul.
- BIRNBAUM, T. & M. BERGER (2010): Untersuchungen der Emissionscharakteristik und Stoffbilanzen bei der thermischen Verwertung von Kurzumtriebshölzern im LVG Köllitsch, Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden, ILK-B-33-10-1557
- BIRNBAUM, T. & M. BERGER (2010): Untersuchungen zur thermischen Nutzung von Biomassen aus der Landschaftspflege, Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden, ILK-B-33-10-1570
- BIRNBAUM, T. (2008): Untersuchungen zur Staubabscheidung bei der thermischen Verwertung von Grünland-Biomassen, Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden, ILK-B-33-07-1427
- BIRNBAUM, T. (2010): Stoffbilanzen bei der thermischen Nutzung von Hölzern aus Kurzumtriebsplantagen, Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden, ILK-B-33-09-1517
- BÖHNERT, W., P. GUTTE, & P. A. SCHMIDT (2001): Verzeichnis und Rote Liste der Pflanzengesellschaften des Freistaates Sachsen. - Materialien zu Naturschutz und Landschaftspflege. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.). Dresden, 302 S.
- BRAUN-BLANQUET, J. (1964): Pflanzensoziologie. Wien. (3. Aufl.), 865 S.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2002): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV, BGBl, Teil I, S.1950
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft vom 24. Juli 2002. GMBI, Heft 25 – 29, S. 511 – 605
- BUNGART, R. (1999): Erzeugung von Biomasse zur energetischen Nutzung durch den Anbau schnellwachsender Baumarten auf Kippsubstraten des Lausitzer Braunkohlereviere. Cottbuser Schriften, Bd. 7
- CLAUSTHALER UMWELTTECHNIK-INSTITUT GMBH (2009): Vergasung von Miscanthuspellets in der Zirkulierenden Wirbelschicht. Versuchsbericht im Rahmen des Verbundprojektes „Anbau von Energiepflanzen für die nachhaltige, ressourcenschonende und klimaverträgliche Rohstoffabsicherung zur Erzeugung von Strom/Wärme und synthetischen Biokraftstoffen der zweiten Generation“. Endbericht 2009, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.

- DIERSCHKE, H. (1994): Pflanzensoziologie. Grundlagen und Methoden. - 683 S., 343 Abb. und 55 Tab., Stuttgart.
- ECKHARD, F. (2010): Power Point Präsentation zur Wirtschaftlichkeit von Kurzumtriebsplantagen; LfULG 11.03.2010
- ELLENBERG, H., H. E. WEBER, R. DÜLL, V. WIRTH, W. WERNER u. D. PAULIßEN (1992): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. - Scripta Geobotanica 18. Göttingen. (2. Aufl.), 258 S.
- ELSÄßER & NUßBAUM (1993): Maßnahmen zur Verminderung der Verschmutzung des Futters mit Boden bei der Aufnahme von Grünland- und Ackerfutter - Vorschlag der Länder-Arbeitsgruppe Dioxin-Belastungen der Nahrungsmittel der AMK (Anlage zum Abschluß-Bericht vom 18.02.1994)
- ERNST, H., FÖRSTER, F., NEUBERT, K.-H. (2005): Statusbericht zur Anwendung von BEFU im Freistaat Sachsen 1997 – 2004. Interner Bericht für die Sächsischen Staatlichen Ämter für Landwirtschaft und das Sächsische Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
- FREUDE, H., HARDE, K. W. & G.A. LOHSE (1976): Die Käfer Mitteleuropas, Bd. 2, Goecke & Evers Verl.; Krefeld, 302 S.
- GRIMM, U. (1985): Die Gnaphosidae Mitteleuropas (Arachnida, Araneae). Abh. Naturw. Verein, Hamburg, NF 26: 318 S.
- HARTMANN et al. (2007): Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungsanlagen. Berichte aus dem TFZ 13, Straubing
- HEIMER, S. & W. NENTWIG (1991): Spinnen Mitteleuropas. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, 543 S.
- HIEBSCH, H. & D. TOLKE (1996): Rote Liste der Weberknechte und Webspinnen, Materialien zu Naturschutz und Landschaftspflege 1996. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Radebeul
- HOCHSCHULE ZITTAU/GÖRLITZ (2009): Durchführung von Untersuchungen zur Vergasung verschiedener Brennstoffe in einer Praxix-Vergasungsanlage (BHKW) zur Strom- und Wärmeerzeugung im kleinen Leistungsbereich (10 kW). Bericht im Rahmen des Verbundprojektes „Anbau von Energiepflanzen für die nachhaltige, ressourcenschonende und klimaverträgliche Rohstoffabsicherung zur Erzeugung von Strom/Wärme und synthetischen Biokraftstoffen der zweiten Generation“. Schlussbericht 2009, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- HOLZENERGIEZENTRUM WITTGENSTEIN (2010): Klassifizierung Holzhackschnitzel nach Ö-Norm, Internetrecherche 4.11.2010 ([www.holzenergie-wittgenstein.de](http://www.holzenergie-wittgenstein.de))
- INSTITUT FÜR LUFT- UND KÄLTETECHNIK gGMBH (2008): Untersuchungen zur Staubabscheidung bei der thermischen Verwertung von Grünland-Biomassen. Fachbericht im Rahmen des Verbundprojektes „Biomasseaufbau und –verwertung als Energieträger/Humusstoff von Flächen mit unterschiedlichem Schwermetallbelastungsgard und Grünlandgebieten“ auf der Versuchsfläche Krummenhennersdorf bei Freiberg (Freistaat Sachsen), Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- INSTITUT FÜR LUFT- UND KÄLTETECHNIK gGMBH (2010): Stoffbilanzen bei der thermischen Nutzung von Hölzern aus Kurzumtriebsplantagen. Fachbericht im Rahmen des Verbundprojektes „Anbau von Energiepflanzen für die nachhaltige, ressourcenschonende und klimaverträgliche Rohstoffabsicherung zur Erzeugung von Strom/Wärme und synthetischen Biokraftstoffen der zweiten Generation“, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- INSTITUT FÜR LUFT- UND KÄLTETECHNIK gGMBH (2010): Untersuchungen zur thermischen Nutzung von Biomassen aus der Landschaftspflege. Fachbericht im Rahmen des Verbundprojektes „Anbau von Energiepflanzen für die nachhaltige, ressourcenschonende und klimaverträgliche Rohstoffabsicherung zur Erzeugung von Strom/Wärme und synthetischen Biokraftstoffen der zweiten Generation“, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- INSTITUT FÜR LUFT- UND KÄLTETECHNIK gGMBH (2010): Untersuchungen der Emissionscharakteristik und Stoffbilanzen bei der thermischen Verwertung von Kurzumtriebshölzern im LVG Köllitsch. Fachbericht im Rahmen des Verbundprojektes „Anbau von Energiepflanzen für die nachhaltige, ressourcenschonende und klimaverträgliche Rohstoffabsicherung zur Erzeugung von Strom/Wärme und synthetischen Biokraftstoffen der zweiten Generation“, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- KIESEWALTER, S., RÖHRICHT, CHR. (2006): Herstellung und Nutzung von Brennstoffpellets aus landwirtschaftlicher Biomasse. In: 15. Symposium Bioenergie - Festbrennstoffe, Flüssigkraftstoffe, Biogas 23./24. November 2006 Kloster Banz, Bad Staffelstein
- KIESEWALTER, S., RIEHL, G., RÖHRICHT, CHR. (2005): Nutzungsalternativen für spät geschnittene Grünlandaufwüchse in sächsischen Vorgebirgslagen. In: Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau, Bd. 7

- KLAUSNITZER, B. (2004): Die Käfer Mitteleuropas. Bd. 2, 2. Auflage, Spektrum Akad. Verlag
- KLOSE, R., G. RANK (2006): Landwirtschaftliche und gärtnerische Nutzung auf schadstoffbelasteten Flächen im Freistaat Sachsen, Pilotprojekt Auenböden Vereinigte Mulde. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 2, Dresden
- KLOSE, R. (2003): Hinweise und Empfehlungen zum Umgang mit arsen- und schwermetallbelasteten landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden. Broschüre der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden
- KLOSE, R. (1998): Untersuchungen zum Arsen- Transfer und Empfehlungen für die landwirtschaftliche Nutzung eines Gebietes in Sachsen mit hoher Arsenbelastung. VDLUFA-Schriftenreihe (46), Kongreßband 1997, S. 501 – 504
- KLOSE, R. UND GOLZE, W. (1996): Der Transfer von Blei, Cadmium, Arsen und Quecksilber in einem Überschwemmungsgebiet der Elbe. Mitt. Dt. Bodenkundl. Ges. (80), S. 73 – 76
- KOLLOCH, H.-P. (1990): Ökonomische Untersuchungen zur Ernte von Stroh und Schwachholz als Energieträger in Großfeuerungsanlagen (1 MW bis 10 MW). Diss. TU München, Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau
- KTBL (Hrsg. 2006;2009): Energiepflanzen- Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt
- LOHSE, G. A. & W.H. LUCHT (1989): Die Käfer Mitteleuropas. 1. Suppl., Bd. 12, Goecke & Evers Verl.; Krefeld
- MÜLLER, I. (2010): Analysen und Trends - Nachhaltiger Umgang mit schadstoffbelasteten Böden. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (unveröffentlicht)
- MUNZERT, M., FRAHM, J. (HRSG. 2006): Die Landwirtschaft - 1. Pflanzliche Erzeugung. BLV Buchverlag GmbH Co.KG, München
- PLANUNGSBÜRO FÜR ÖKOLOGIE, NATURSCHUTZ, LANDSCHAFTSPFLEGE UND UMWELTWERBUNG DR. BÖHNERT & DR. REICHHOFF (2006): Pflanzensoziologische Kartierung einer 2 ha großen Versuchsfläche mit schnellwachsenden Baumarten in Krummenhennersdorf (bei Freiberg). Endbericht im Rahmen des Verbundprojektes „Biomasseaufbau und –verwertung als Energieträger/Humusstoff von Flächen mit unterschiedlichem Schwermetallbelastungsgard und Grünlandgebieten“ auf der Versuchsfläche Krummenhennersdorf bei Freiberg (Freistaat Sachsen), Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- PLANUNGSBÜRO FÜR ÖKOLOGIE, NATURSCHUTZ, LANDSCHAFTSPFLEGE UND UMWELTWERBUNG DR. BÖHNERT & DR. REICHHOFF (2007): Pflanzensoziologische Kartierung einer 2 ha großen Versuchsfläche mit schnellwachsenden Baumarten in Krummenhennersdorf (bei Freiberg) – Wiederholungskartierung 2007 –. Endbericht im Rahmen des Verbundprojektes „Biomasseaufbau und –verwertung als Energieträger/Humusstoff von Flächen mit unterschiedlichem Schwermetallbelastungsgard und Grünlandgebieten“ auf der Versuchsfläche Krummenhennersdorf bei Freiberg (Freistaat Sachsen), Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- PLANUNGSBÜRO FÜR ÖKOLOGIE, NATURSCHUTZ, LANDSCHAFTSPFLEGE UND UMWELTWERBUNG DR. BÖHNERT & DR. REICHHOFF (2008): Pflanzensoziologische Kartierung einer 2 ha großen Versuchsfläche mit schnellwachsenden Baumarten in Krummenhennersdorf (bei Freiberg) – Wiederholungskartierung 2008 –. Endbericht im Rahmen des Verbundprojektes „Biomasseaufbau und –verwertung als Energieträger/Humusstoff von Flächen mit unterschiedlichem Schwermetallbelastungsgard und Grünlandgebieten“ auf der Versuchsfläche Krummenhennersdorf bei Freiberg (Freistaat Sachsen), Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- PLANUNGSBÜRO FÜR ÖKOLOGIE, NATURSCHUTZ, LANDSCHAFTSPFLEGE UND UMWELTWERBUNG DR. BÖHNERT & DR. REICHHOFF (2009): Pflanzensoziologische Kartierung einer 2 ha großen Versuchsfläche mit schnellwachsenden Baumarten in Krummenhennersdorf (bei Freiberg) – Wiederholungskartierung 2009 –. Endbericht im Rahmen des Verbundprojektes „Anbau von Energiepflanzen für die nachhaltige, ressourcenschonende und klimaverträgliche Rohstoffabsicherung zur Erzeugung von Strom/Wärme und synthetischen Biokraftstoffen der zweiten Generation“, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- PLATEN, R., BLICK, T., SACHER, P. & A. MALTEN (1996): Rote Liste der Webspinnen Deutschlands (Arachnida: Araneae). Arachnol. Mitt. 11; S. 5 – 31
- PLATEN, R., MORITZ, M., BROEN, B. V., BOTHMANN, I., BRUHN, K. & U. SIMON (1991): Liste der Webspinnen- und Weberknechtarten (Arach.: Araneida, Opiliona) des Berliner Raumes und ihre Auswertung für Naturschutzzwecke (Rote Liste). In: AUHAGEN,

- A.; PLATEN, R. & H. SUKOPP (Hrsg.): Rote Listen der gefährdeten Pflanzen und Tiere in Berlin. Landschaftsentwicklung und Umweltforschung S 6; S. 169 – 205
- PLATNICK, N. I. (1993): Advances in spider taxonomy 1988-1991. Entomol. Soc. & am. Mus. Nat. Hist., New York, 846 S.
- ROBERTS, J. M. (1985): The Spiders of Great Britain and Ireland. Vol. 1, Atypidae to Theridiosomatidae. Harley Books, Martins, Great Horkesley, Colchester, 229 S.
- RÖHLE, H., HARTMANN, K.-U.; STEINKE, C.; SCHRÖDER, J. (2006): Aufstellung von Biomassefunktionen für Kurzumtriebsbestände. AFJZ 177 (10), S. 178 – 187
- RÖHRICHT, C., GROß-OPHOFF, A., KIESEWALTER, S. (2002): Acker- und pflanzenbauliche Untersuchungen zum Anbau ein- und mehrjähriger Energiepflanzen im Freistaat Sachsen. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 4, Dresden
- RÖHRICHT, CHR., KIESEWALTER, S. (2007): Biomasseanbau und -verwertung als Energieträger von Flächen mit unterschiedlichem Schwermetallbelastungsgrad. In: 13. Internationale Fachtagung Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Freiberg, 6. und 7. September 2007
- RÖHRICHT, CHR., KIESEWALTER, S. (2008): Biomasseanbau und -verwertung als Energieträger/ Humusstoff von Flächen mit unterschiedlichem Schwermetallbelastungsgrad und Grünlandgebieten. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 30, Dresden
- RÖHRICHT, CHR., RUSCHER, K. (2004): Anbauempfehlungen für Schnellwachsende Baumarten. Fachmaterial der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft. <http://www.landwirtschaft.sachsen.de/LfL>
- SCHULZ, D. (1999): Rote Liste Farn- und Samenpflanzen. - Materialien zu Naturschutz und Landschaftspflege. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.), Dresden, 35 S.
- SØRENSEN T. A. (1948): A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species, and its application to analysis of the vegetation on Danish commons. - Biol. Skr. Dansk Vidensk Selsk. 5(4): 1-34.
- TRAUTNER, J.; MÜLLER-MOTZFELD, G. & M. BRÄUNICKE (1997): Rote Liste der Sandlaufkäfer und Laufkäfer Deutschlands (Coleoptera: Cicindelidae et Carabidae), 2. Fassung, Stand Dezember 1996. Naturschutz u. Landschaftsplanung 29; S. 261 – 273
- VDLUF - VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (2000): Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden
- VERORDNUNG (EG) Nr. 466/2001 der Kommission vom 8. März 2001 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln, ABl. Nr. L 77/1
- VODEGEL, S. & C. GROVE (2009): Vergasung von Miscanthuspellets in der Zirkulierenden Wirbelschicht, Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld
- WIEHLE, H. (1956): Spinnentiere oder Arachnoidea (Araneae). 28. Familie Linyphiidae - Baldachinspinnen. In: DAHL, F. (Hrsg.): Die Tierwelt Deutschlands, Bd. 44; G. Fischer Verlag Jena, 337 S.
- WIEHLE, H. (1960): Spinnentiere oder Arachnoidea (Araneae). XI: Micryphantidae - Zwergspinnen. In: DAHL, F. (Hrsg.): Die Tierwelt Deutschlands, Band 47; G. Fischer Verlag Jena, 620 S.
- ZSCHUNKE, T., SCHÜßLER, I., SALOMO, B. (2009): Durchführung von Untersuchungen zur Vergasung verschiedener Brennstoffe in einer Praxis-Vergasungsanlage (BHKW) zur Strom- und Wärmezeugung im kleinen Leistungsbereich (10 kW), Hochschule Zittau/ Görlitz

# 6 Anhang

## 6.1 Methoden der Analytik

### Analysemethoden der Bodenproben

Prüfmerkmal:	Methode/Vorschrift
<b>N<sub>min</sub></b>	MB 1 VDLUFA A 6.1.3.2
<b>pH-Wert</b>	MB 1 VDLUFA A 5.1.1
<b>P</b>	MB 1 VDLUFA A 6.2.1.2
<b>K</b>	MB 1 VDLUFA A 6.2.1.2
<b>Mg</b>	MB 1 VDLUFA A 6.2.4.1
<b>org. Substanz</b>	DIN ISO 10 694
<b>B</b>	MB 1 VDLUFA A 7.1.1
<b>As (AN)</b>	DIN 19730
<b>As (KW)</b>	DIN 38414S7, DIN EN ISO
<b>Cd (AN)</b>	DIN19730
<b>Cd (KW)</b>	DIN 38414S7, DIN EN ISO
<b>Pb (AN)</b>	DIN19730
<b>Pb (KW)</b>	DIN 38414S7, DIN 38406
<b>Cu</b>	MB 1 VDLUFA A 7.3.1
<b>Cr</b>	EN ISO 11885 E22
<b>Hg</b>	DIN EN 1483 E12
<b>Ni</b>	EN ISO 11885 E22
<b>Zn</b>	EN ISO 11885 E22
<b>Tl</b>	DIN 38406

### Analysemethoden der Pflanzenproben

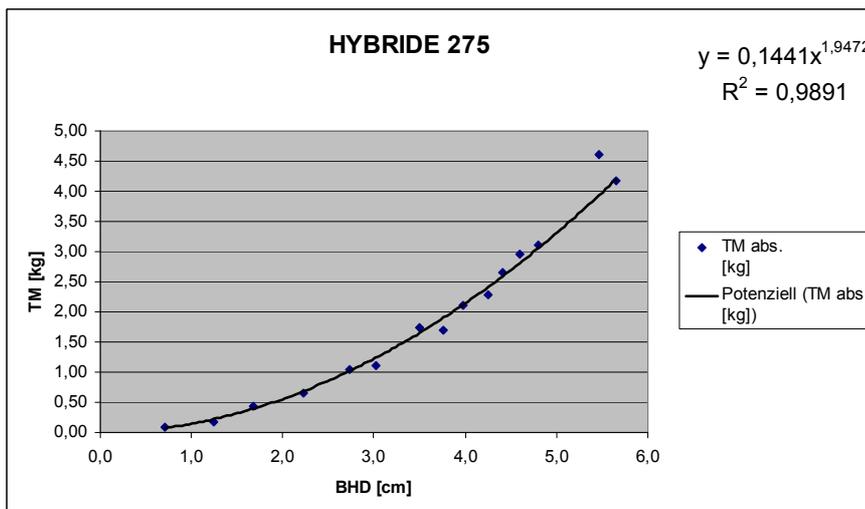
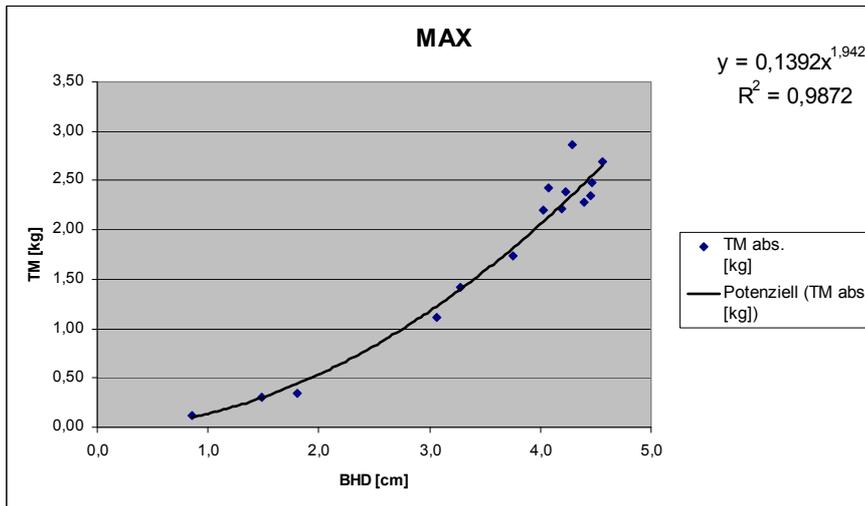
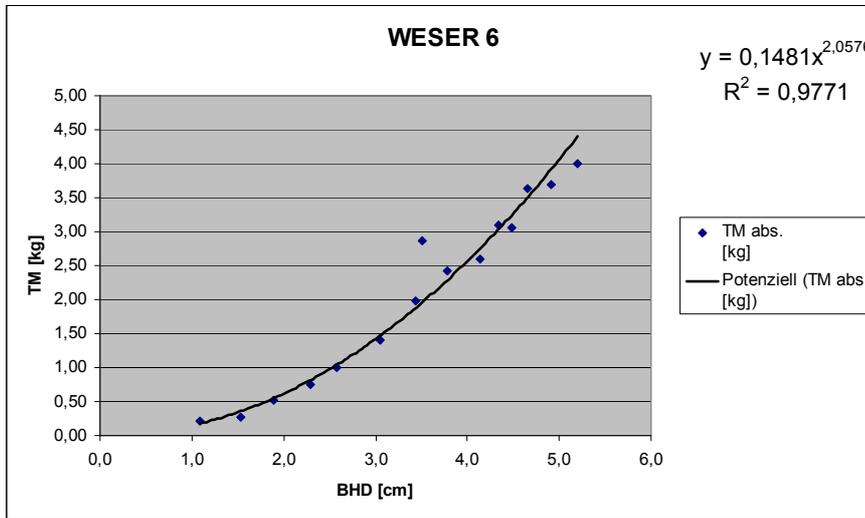
Prüfmerkmal:	Methode/Vorschrift
<b>TS</b>	MB 3 VDLUFA 3.1
<b>N</b>	PAW 02 317
<b>P, K</b>	PAW 02 315
<b>C</b>	DIN ISO 10 694
<b>Mg, Ca, S</b>	PAW 02 315
<b>Cl, Cu, Mn</b>	PAW 02 315
<b>B</b>	EG-Methode 8.2.3
<b>Cd</b>	MB 3 VDLUFA 17.2.2, DIN EN ISO 11885 (E22)
<b>Pb</b>	MB 3 VDLUFA 17.2.2, DIN EN ISO 11885 (E22)
<b>Hg</b>	DIN EN 1483-12
<b>Cr</b>	EN-ISO 11 969
<b>As</b>	EN-ISO 11 969
<b>Ni</b>	DIN EN ISO 11885 (E22)
<b>Zn</b>	DIN EN ISO 11885 (E22)
<b>Rohdichte</b>	DIN 52182
<b>EOX</b>	DIN 38414
<b>Rohasche</b>	DIN 51719,
<b>Hu (wf)</b>	DIN 51 900

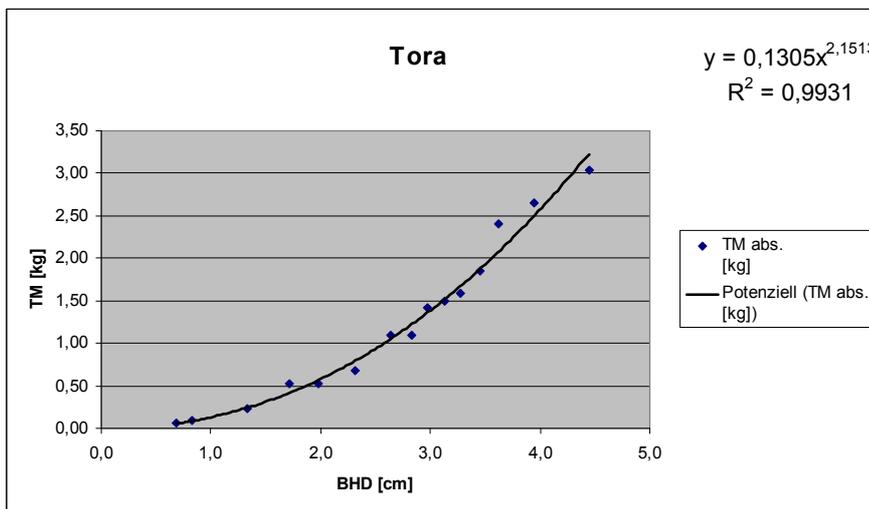
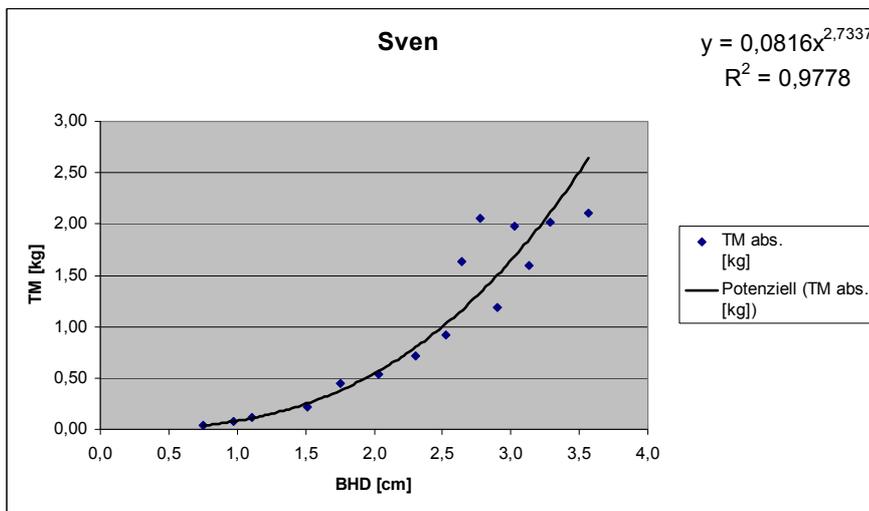
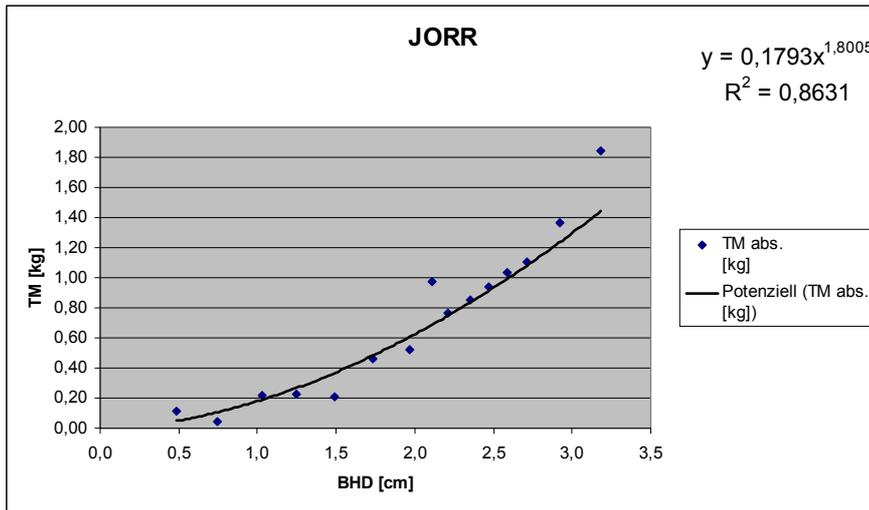
## 6.2 Biomassefunktionen

Biomassefunktionen nach RÖHLE 2006, auf Grundlage von Bestimmung der Einzeltriebgewichte im Januar 2008

Formel:  $y = a_0x^{a_1}$  ( $y$  = Ertrag TM/Trieb in kg;  $a_0; a_1$  = Regressionskoeffizienten;  $x$  = BHD in cm)

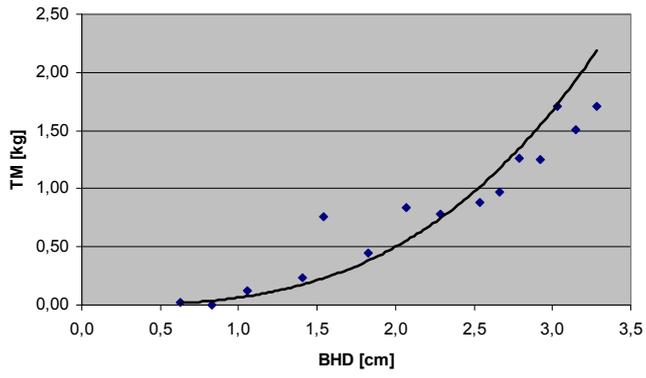
Mit Hilfe der Triebzahl/Baum und der Anzahl der Bäume/ha kann die Biomasse/ha berechnet werden.





### TORDIS

$$y = 0,0634x^{2,9793}$$
$$R^2 = 0,829$$



**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: + 49 351 2612-0  
Telefax: + 49 351 2612-1099  
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de  
www.smul.sachsen.de/lfulg

**Autor:**

Anke Dietzsch  
Abteilung Pflanzliche Erzeugung/Referat Pflanzenbau, Nachwachsende Rohstoffe  
Telefon: + 49 341 9174-143  
Telefax: + 49 341 9174-111  
E-Mail: anke.dietzsch2@smul.sachsen.de

**Redaktion:**

Michael Grunert  
Abteilung Pflanzliche Erzeugung/Referat Pflanzenbau, Nachwachsende Rohstoffe  
Telefon: + 49 341 9174-147  
Telefax: + 49 341 9174-111  
E-Mail: michael.grunert@smul.sachsen.de

**Fotos:**

Abb. 1; 2; 10 Landesvermessungsamt Sachsen, 2005  
Abb. 18; 21-25; 30; 32 LfULG (Kiesewalter, S.; Grunert, M.; Dietzsch, A.)  
Abb. 19 Internetseite [www.claas.de](http://www.claas.de)  
Abb. 20 Power Point Präsentation New Holland, Agri Technika, 2009

**Redaktionsschluss:**

31.05.2011

**ISSN:**

1867-2868

**Hinweis:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <http://www.smul.sachsen.de/lfulg/6447.htm> heruntergeladen werden.

**Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.