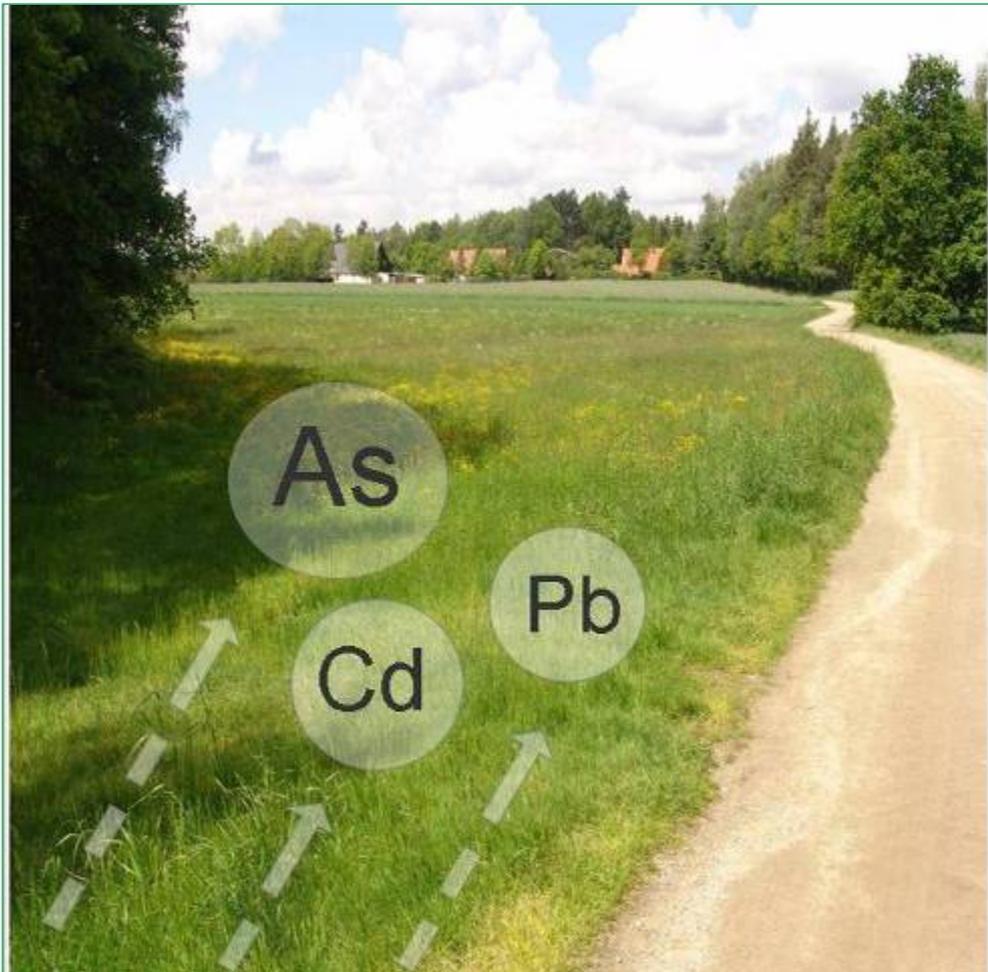




Das Lebensministerium



Nutzung von kontaminierten Böden

Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Heft 30/2008

Freistaat  Sachsen

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

**Biomasseanbau und -verwertung als Energieträger/Humusstoff von Flächen
mit unterschiedlichem Schwermetallbelastungsgrad und Grünlandgebieten**

Sophia Kiesevalter, Dr. Christian Röhrich

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Untersuchungen zur Reduzierung der Arsen- und Schwermetallaufnahme durch geeignete Bewirtschaftungsmaßnahmen	3
2.1	Untersuchungen zur Kalkdüngungswirkung auf Grünland	4
2.1.1	Versuchsanlage und Methodik	4
2.1.2	Ergebnisse	5
2.2	Untersuchungen zur Kalkdüngungswirkung auf Ackerland (Winterroggen)	14
2.2.1	Versuchsanlage und Methodik	14
2.2.2	Ergebnisse	15
2.3	Prüfung des Einflusses von Kalkdüngung und organischer Düngung auf den Schwermetalltransfer bei Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch	19
2.3.1	Versuchsanlage und Methodik	19
2.3.2	Ergebnisse	20
2.4	Fazit der Kalkdüngungsversuche	23
3	Einsatz von belasteten Aufwüchsen zur Biogasproduktion	24
3.1	Diskontinuierliche Gärtests (Batch-Versuche).....	24
3.1.1	Material und Methodik.....	24
3.1.2	Ergebnisse	25
3.2	Kontinuierliche Gärtests	30
3.2.1	Material und Methodik.....	30
3.2.2	Ergebnisse der kontinuierlichen Gärtests.....	33
3.3	Gärrückstände.....	37
3.4	Fazit der Biogasversuche.....	40
4	Untersuchungen zur energetischen Nutzung von belasteten Aufwüchsen in Kleinf Feuerungsanlagen	41
4.1	Versuchsdurchführung und Methodik.....	41
4.1.1	Anlagenbeschreibung und Methodik der Verbrennungsversuche	42
4.2	Ergebnisse der chemischen und physikalischen Untersuchungen zur Brennstoffqualität ..	51
4.3	Abbrand- und Emissionsverhalten in unterschiedlichen Kleinkesseln beim Einsatz verschiedener Brennstoffpelletchargen.....	59
4.3.1	Ergebnisse der Abbrandversuche mit dem Pelletkessel FERRO BIOMAT 23 L	59
4.3.2	Ergebnisse der Abbrandversuche mit dem Kessel BAXI MULTI HEAT 25 kW	63
4.3.3	Ergebnisse der Abbrandversuche mit dem Kessel REKA HKRST 30/3	67
4.3.4	Ergebnisse der Abbrandversuche mit dem Kessel Guntamatic PowerCorn 30.....	73
4.3.5	Ergebnisse der Abbrandversuche mit dem Kessel KSM (20 kW)	80
4.3.6	Ergebnisse der Abbrandversuche mit dem Kessel FERRO BIOMAT FBR 90	84
4.3.7	Stoffbilanzen und Stoffströme	90
4.4	Fazit der Untersuchungen zur Pelletierung und zum Abbrandverhalten von Biobrennstoffen	96

5	Anbau von schnellwachsenden Baumarten	97
5.1	Versuchsdurchführung und Methodik.....	97
5.1.1	Standortcharakteristik und Versuchsanlage	97
5.1.2	Methodik der Erfassung von Prüfmerkmalen, der pflanzensoziologischen Kartierung und faunistischen Aufnahmen	102
5.2	Ergebnisse	105
5.2.1	Anwuchsrate und Wildverbiss	105
5.2.2	Wachstumsindikatoren und Ertragsparameter	107
5.2.3	Nährstoff- und Schwermetallentzüge	111
5.2.4	Entwicklung der Begleitflora (pflanzensoziologische Kartierung)	114
5.2.5	Faunistische Untersuchungen.....	120
5.3	Ökonomische Bewertung des Anbaues von schnellwachsenden Baumarten	125
5.4	Fazit der Etablierung der Kurzumtriebsplantage Krummenhennersdorf.....	129
6	Zusammenfassung.....	131
7	Literatur.....	136
Anhang 1:	Methoden der Analytik	140
Anhang 2:	Artenlisten der Begleitflora der KUP Krummenhennersdorf (2005 – 2007)	141
Anhang 3:	Artenlisten der epigäischen Fauna auf der KUP Krummenhennersdorf (2006 - 2007)	145

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lageskizze der Versuchsflächen in der Region Freiberg	2
Abbildung 2:	Versuchsflächen der Kalkdüngungsversuche auf Grünland in Hilbersdorf	4
Abbildung 3:	Kalkdüngungsmengen und Entwicklung des pH-Wertes im Oberboden Grünland (0 - 10 cm) im Versuchszeitraum	7
Abbildung 4:	Entwicklung der KW- und AN-löslichen Arsengehalte im Oberboden Grünland (0 - 10 cm) von April 2005 bis November 2006	7
Abbildung 5:	Entwicklung der KW- und AN-löslichen Cadmiumgehalte im Oberboden Grünland (0 - 10 cm) von April 2005 bis November 2006	8
Abbildung 6:	Entwicklung der KW- und AN-löslichen Bleigehalte im Oberboden Grünland (0 - 10 cm) von April 2005 bis November 2006	8
Abbildung 7:	Abhängigkeit der AN-löslichen Bodengehalte an Arsen, Cadmium und Blei vom pH-Wert	9
Abbildung 8:	Abhängigkeit des Arsengehaltes in Grünlandaufwüchsen (1. und 2. Schnitt) von der Bodenbelastung	11
Abbildung 9:	Abhängigkeit des Cadmiumgehaltes in Grünlandaufwüchsen von der Bodenbelastung	12
Abbildung 10:	Abhängigkeit des Bleigehaltes in Grünlandaufwüchsen vom Gesamt-Bleigehalt und mobilen Anteil an Blei im Oberboden (0 - 10 cm)	13
Abbildung 11:	Arsen- und Schwermetallgehalte im Grünschnitt vor und nach der Feldarbeit	14
Abbildung 12:	Kalkdüngungsversuch mit Winterroggen	15
Abbildung 13:	Kalkdüngungsmengen und Entwicklung des pH-Wertes im Oberboden Ackerland (0 - 30 cm) im Zeitraum August 2005 bis November 2006	16
Abbildung 14:	Abhängigkeit des mobilen Anteils an Arsen, Cadmium und Blei (AN-Extrakt) im Boden Ackerland (0 - 30 cm) vom pH-Wert	18
Abbildung 15:	Mittlere Erträge (Mais) der Prüfvarianten im Gefäßversuch	20
Abbildung 16:	Mittlere Gehalte an Arsen in der Trockenmasse der Aufwüchse (Mais) und Arsen-Entzüge der Prüfvarianten	21
Abbildung 17:	Mittlere Gehalte an Cadmium in der Trockenmasse der Aufwüchse (Mais) und Cadmium-Entzüge der Prüfvarianten	21
Abbildung 18:	Mittlere Gehalte an Blei in der Trockenmasse der Aufwüchse (Mais) und Blei-Entzüge der Prüfvarianten	22
Abbildung 19:	Verlauf der absoluten Biogasproduktion verschiedener Monosubstrate	29
Abbildung 20:	Schematischer Versuchsaufbau (FERCHAU 2004) der Versuchsanlage der TU Bergakademie Freiberg	31
Abbildung 21:	Laborfermenteranlage mit Gasmessung und Thermostat im Labor der Fa. BTN Biotechnologie Nordhausen GmbH	32
Abbildung 22:	Gas-/Methangasproduktion und -ausbeute bei der Fermentation von Rindergülle mit belasteter Grünschnittsilage (50 : 50) über drei Raumbelastungen	36
Abbildung 23:	FERRO BIOMAT FB 23L	43
Abbildung 24:	Versuchsaufbau mit Kessel Baxi MULTI HEAD 25 kW	43

Abbildung 25: Brennraum des Kessels (Baxi MULTI HEAD 25 kW)	44
Abbildung 26: Versuchsaufbau mit Kessel Reka HKRST 30/3, Brennraum mit Stufenrost	45
Abbildung 27: Guntamatik PowerCorn 30 und Blick in den Brennraum	46
Abbildung 28: Versuchsaufbau mit KSM 275-18C, Blick in den Brennraum	47
Abbildung 29: Ferro BIOMAT FBR 90	48
Abbildung 30: Ascheschmelzverhalten von Heupellets mit und ohne Zumischung von Talkum im Vergleich zu Holzpellets	55
Abbildung 31: Ascheschmelzverhalten von Weizenstrohpellets mit und ohne Kalkzumischung im Vergleich zu Holzpellets	56
Abbildung 32: CO-, NO _x - und Staub-Emissionen beim Abbrand verschiedener Brennstoffpellets im Kessel FERRO BIOMAT 23L	60
Abbildung 33: Fein- und Grobanteile der Rostaschen aus der Verbrennung verschiedener Biomassepellets in einem Pelletkessel FERRO BIOMAT 23 L	62
Abbildung 34: Durchschnittliche Viertelstunden-Mittelwerte der Emissionen an CO, NO _x und Staub beim Abbrand verschiedener Brennstoffchargen im BAXI MULTIHEAT	64
Abbildung 35: Fein- und Grobanteile der Rostaschen aus der Verbrennung verschiedener Biomassepellets in einem Pelletkessel BAXI MULTI HEAT 25 kW	66
Abbildung 36: Durchschnittliche Viertelstunden-Mittelwerte der Emissionen an CO, NO _x und Staub beim Abbrand verschiedener Brennstoffchargen im REKA HKRST 30/3 (32 kW) ..	69
Abbildung 37: Fein- und Grobanteile der Rostaschen aus der Verbrennung verschiedener Biomassepellets in einem Biomassekessel REKA HKRST 30/3	72
Abbildung 38: Durchschnittliche Viertelstunden-Mittelwerte der Emissionen an CO, NO _x und Staub beim Abbrand verschiedener Brennstoffchargen im Guntamatic PowerCorn 30.....	74
Abbildung 39: Partikelfraktionen der Staubemissionen beim Abbrand verschiedener Brennstoffe im Guntamatic PowerCorn 30	76
Abbildung 40: Verbrennungsaschen der eingesetzten Brennstoffe im Guntamatic PowerCorn 30	77
Abbildung 41: Durchschnittliche Viertelstunden-Mittelwerte der Emissionen an CO, NO _x und Staub beim Abbrand verschiedener Brennstoffchargen im Kessel KSM 20 kW	81
Abbildung 42: Partikelfraktionen der Staubemissionen beim Abbrand verschiedener Brennstoffe im KSM-Kessel (20 kW)	82
Abbildung 43: Verbrennungsaschen der eingesetzten Brennstoffe im KSM-Kessel 20 kW	83
Abbildung 44: Durchschnittliche Viertelstunden-Mittelwerte der Emissionen an CO, NO _x und Staub beim Abbrand verschiedener Brennstoffchargen im FERRO-Kessel BIOMAT 90 kW mit Abgaswärmetauscher	86
Abbildung 45: Partikelfraktionen der Staubemissionen beim Abbrand verschiedener Brennstoffchargen im FERRO-Kessel BIOMAT 90 KW.....	87
Abbildung 46: Verbrennungsaschen der eingesetzten Brennstoffe im FERRO BIOMAT FBR 90.	89
Abbildung 47: Aschen im Brennraum des Kessels FERRO BIOMAT 90 kW nach den Verbrennungsversuchen mit verschiedenen Brennstoffen: (a) Roggenkorn, (b) Heupellets, (c) Miscanthuspellets	89

Abbildung 48: Zusammenhang zwischen dem Stickstoffgehalt im Brennstoff und den NO _x -Emissionen, Viertelstunden-Mittelwerte aus Abbrandversuchen mit den Heizkesseln Guntamatic Powercorn 30 kW, KSM 20 kW und Ferro 90 kW	91
Abbildung 49: Zusammenhang zwischen dem Schwefelgehalt im Brennstoff und den SO ₂ -Emissionen, Viertelstunden-Mittelwerte aus Abbrandversuchen mit den Heizkesseln Guntamatic Powercorn 30 kW, KSM 20 kW und Ferro 90 kW	92
Abbildung 50: Gegenüberstellung der beim Abbrand verschiedener Brennstoffe erfassten Staubemissionen und der Aschegehalte der Brennstoffe; Abbrandversuche 2006/2007; Kessel: Guntamatic Powercorn 30 kW, KSM 20 kW, Ferro Biomat 90 kW.....	93
Abbildung 51: Mittlere Stoffkonzentrationen im Filterstaub beim Abbrand halmgut- und holzartiger Brennstoffe, Mittelwerte der Versuche mit den Kesseln Guntamatic 30 kW, KSM 20 KW, Ferro 90 kW	94
Abbildung 52: Witterungsdaten 2005 am Standort Hilbersdorf.....	98
Abbildung 53: Witterungsdaten 2006 am Standort Hilbersdorf.....	99
Abbildung 54: Skizze des Doppelreihensystems.....	101
Abbildung 55: Flächenskizze der Anwuchsrate und des Wildverbisses am Ende des 1. Standjahres der KUP Krummenhennersdorf	106
Abbildung 56: Schäden durch Wühlmäuse/Schermäuse	107
Abbildung 57: Triebzahlen/ha und geschätzte Biomasseerträge der KUP Krummenhennersdorf nach dem 2. Standjahr	110
Abbildung 58: Entwicklung der Begleitflora im Anpflanzjahr im Weidenbestand	114
Abbildung 59: Entwicklung der Begleitflora im Anpflanzjahr im Pappelbestand	114
Abbildung 60: Vergleich der Artenzahlen der Webspinnen (Araneae) am Versuchsstandort Krummenhennersdorf in den Jahren 2006 und 2007	122
Abbildung 61: Vergleich der Artenzahlen der Laufkäfer (Carabidae) am Versuchsstandort Krummenhennersdorf in den Jahren 2006 und 2007	123
Abbildung 62: Schematischer Verlauf der Kosten und Leistungen sowie des summierten Ergebnisses über die gesamte Nutzungsdauer einer KUP.....	126
Abbildung 63: Durchschnittliches jährliches Ergebnis (Gewinn/Verlust) einer KUP mit Pappeln (Ertrag $10 t_{\text{atro}}/\text{ha} \cdot a$, 3-jähriger Umtrieb, ND 21 Jahre) bei einem Verkauf der Hackschnitzel ab Hof (inkl. Trocknung, Lagerung) und in Abhängigkeit vom Holzpreis	128
Abbildung 64: Durchschnittliches jährliches Ergebnis (Gewinn/Verlust) einer KUP mit Pappeln (Ertrag $10 t_{\text{atro}}/\text{ha} \cdot a$, 3-jähriger Umtrieb, ND 21 Jahre) bei einem Verkauf der Hackschnitzel ab Feld (ohne Trocknung, Lagerung) und in Abhängigkeit vom Holzpreis	128

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)	5
Tabelle 2:	Gehalte an Schwermetallen im Oberboden der Grünlandflächen vor Versuchsbeginn (Entnahmetiefe 0-10 cm, April 2005) im KW-Extrakt.....	6
Tabelle 3:	Gehalte an Arsen, Cadmium und Blei im Oberboden (Entnahmetiefe 10 cm; KW- und AN-Extrakt) und in den Aufwüchsen (Grünschnitt) zu verschiedenen Schnittterminen.....	10
Tabelle 4:	pH-Wert, Humusgehalt und Gehalte an Arsen, Blei und Cadmium im Oberboden der Ackerfläche vor Versuchsbeginn (Entnahmetiefe 0 - 30 cm, April 2005).....	16
Tabelle 5:	Gehalte an Schwermetallen im Oberboden der Ackerfläche vor Versuchsbeginn (Entnahmetiefe 0-30 cm, April 2005) im KW-Extrakt	16
Tabelle 6:	pH-Werte und Gehalte an Arsen, Cadmium und Blei (Entnahmetiefe 30 cm, KW- und AN-Extrakt) im Oberboden Ackerland zu verschiedenen Probenahmeterminen	17
Tabelle 7:	Gehalte an Kontaminanten in Roggenganzpflanzen, -korn und -stroh	18
Tabelle 8:	Charakteristik des Bodengemisches	19
Tabelle 9:	Kennzeichnung der Versuchsvarianten	20
Tabelle 10:	Bestimmtheitsmaß und Funktion der linearen Regression	22
Tabelle 11:	Versuchsvarianten der diskontinuierlichen Gärversuche	25
Tabelle 12:	Gärchemische Inhaltsstoffe der Substrate (Batch-Gärtests)	27
Tabelle 13:	Gasbildung und Gasqualität der geprüften Substratvarianten (Batch-Gärtests).....	28
Tabelle 14:	Versuchsvarianten der Gärversuche	30
Tabelle 15:	Gärchemische Inhaltsstoffe der Substrate (kontinuierlichen Gärtests).....	34
Tabelle 16:	Gasertrag und -qualität bei der Vergärung von belasteter Grünschnittsilage (GL 0) mit Rindergülle (50 : 50 oTS).....	35
Tabelle 17:	Gasertrag und -qualität bei der kontinuierlichen Vergärung von belasteter Grünschnittsilage mit Rindergülle (30 : 70 oTS), Versuche 2006	37
Tabelle 18:	Qualität der Gärrückstände des kontinuierlichen Gärtests mit belasteter Grünschnittsilage und Rindergülle (50 : 50) im Versuchsjahr 2005.....	38
Tabelle 19:	Qualität der Gärrückstände der kontinuierlichen Gärtests mit verschiedenen arsen- und schwermetallbelasteten Substraten und Rindergülle (Verhältnis 30 : 70 oTS) bei Faulraumbelastungen von 2 und 3 kg _{TS} /m ³ _{FV} *d, Versuchsjahr 2006	39
Tabelle 20:	Brennstoffvarianten und Versuchsprogramm der Jahre 2005 und 2006	42
Tabelle 21:	Messprogramm zur Durchführung von Abbrandversuchen mit verschiedenen Brennstoffen	51
Tabelle 22:	Emissions- und verbrennungstechnisch relevante Inhaltsstoffe in den verschiedenen Brennstoffchargen	53

Tabelle 23:	Mittleres Kalium/Kalzium-Verhältnis und durchschnittliche Temperaturbereiche der Aschenschmelze	54
Tabelle 24:	Wassergehalt, Aschegehalt und Heizwert der Brennstoffchargen.....	57
Tabelle 25:	Rohdichte und Abrieb der Brennstoffchargen.....	58
Tabelle 26:	Kesselwirkungsgrad und Emissionen an SO ₂ , HCl und Ges.-C	61
Tabelle 27:	Inhaltsstoffgehalte der Verbrennungsaschen (FERRO BIOMAT 23 L).....	63
Tabelle 28:	Emissionen an SO ₂ , HCl und Ges.-C	65
Tabelle 29:	Inhaltsstoffgehalte der Verbrennungsaschen	67
Tabelle 30:	Kesselwirkungsgrad sowie Emissionen an SO ₂ , HCl und Ges.-C beim Abbrand verschiedener Brennstoffe im Kessel REKA HKRST 30/3	70
Tabelle 31:	Verschlackungsverhalten verschiedener halmgutartiger Brennstoffe beim Abbrand im Biomassekessel REKA HKRST 30/3	71
Tabelle 32:	Inhaltsstoffgehalte der Verbrennungsaschen	72
Tabelle 33:	Kesselwirkungsgrad sowie Emissionen an SO ₂ , HCl und ges.-C beim Abbrand verschiedener Brennstoffe im Kessel Guntamatic PowerCorn 30 (25 kW).....	76
Tabelle 34:	Inhaltsstoffgehalte der Verbrennungsaschen (Guntamatic PowerCorn 30).....	79
Tabelle 35:	Kesselleistung, -wirkungsgrad und Emissionen an SO ₂ und Ges.-C beim Abbrand der Versuchschargen im KSM-Kessel	82
Tabelle 36:	Inhaltsstoffgehalte der Verbrennungsaschen (KSM-Kessel)	84
Tabelle 37:	Kesselleistung, -wirkungsgrad und Emissionen an SO ₂ , HCl und Ges.-C beim Abbrand der Versuchschargen im FERRO BIOMAT FBR 90.....	87
Tabelle 38:	Inhaltsstoffgehalte der Verbrennungsaschen (Ferro-Kessel 90 kW)	90
Tabelle 39:	Durchschnittliche Stoffströme von Arsen, Blei und Cadmium bei der Verbrennung verschiedener Biobrennstoffe in verschiedenen Kleinfeuerungsanlagen	95
Tabelle 40:	Wiederfindungsraten von Arsen, Cadmium und Blei in den staubförmigen Emissionen und Aschen bei der Verbrennung verschiedener Brennstoffe.....	95
Tabelle 41:	pH-Wert, Humus- u. Nährstoffgehalte im Boden, 1. Standjahr, Krummenhennersdorf.....	99
Tabelle 42:	Arsen- und Schwermetallgehalte im Boden, 1. Standjahr, Krummenhennersdorf.....	99
Tabelle 43:	Pappel- und Weidensorten, Krummenhennersdorf.....	100
Tabelle 44:	Anbaufläche und Anzahl der gesteckten Steckhölzer pro Sorte/Klon, Krummenhennersdorf.....	101
Tabelle 45:	Anbau- und Pflegemaßnahmen im 1. und 2. Standjahr auf der KUP Krummenhennersdorf.....	102
Tabelle 46:	Anwuchsrate, Wildverbiss und Ausfallraten am Ende des 1. Standjahres, KUP Krummenhennersdorf.....	105
Tabelle 47:	Triebzahlen der verschiedenen Pappel- und Weidenklone im 2. Standjahr, Krummenhennersdorf.....	107
Tabelle 48:	Arithmetisches Mittel und Median der Anzahl der Triebe bei den Pappel- und Weidensorten im 1. und 2. Standjahr	108

Tabelle 49:	Durchschnittliche Wuchshöhe und mittlerer Wurzelhals- und Brusthöhen- durchmesser der Pappel- und Weidenklone der KUP Krummenhennersdorf.....	109
Tabelle 50:	Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g), Mittelhöhe (h_m) und geschätzter Biomasseertrag (BM)(SCHILDBACH 2007) der schnellwachsenden Baumarten im 2. Standjahr, Krummenhennersdorf	110
Tabelle 51:	Gehalte an Nährstoffen, Arsen und Schwermetallen in den Blättern verschiedener Pappel- und Weidensorten (August 2006), Krummenhennersdorf	112
Tabelle 52:	Gehalte an Nährstoffen, Arsen und Schwermetallen in den blattfreien Stämmen verschiedener Pappel- und Weidensorten (Nov. 2006), Krummenhennersdorf	112
Tabelle 53:	Entzüge an Nährstoffen, Arsen und Schwermetallen durch das Ernteprodukt (blattfreie Stämme, 2. Standjahr) verschiedener Pappel- und Weidensorten, Krummenhennersdorf.....	113
Tabelle 54:	Bestandsbildende Arten der Begleitflora auf der KUP Krummenhennersdorf	116
Tabelle 55:	Einteilung der Blütenpflanzen (Phanerogamen) in ökologische Gruppen.....	117
Tabelle 56:	Artenzusammensetzung nach ökologische Zeigerwerten	118
Tabelle 57:	Floristischer Vergleich der Erst- und Wiederholungsaufnahmen 2006/ 2007	118
Tabelle 58:	Nutz- und Schadinsekten sowie pilzliche Schaderreger auf der KUP Krummenhennersdorf (Ergebnisse der Beifänge aus den Bodenfallen und der Kescher- und Handfänge in Krummenhennersdorf 2007)	124
Tabelle 59:	Kostenpositionen bei der Bewirtschaftung einer KUP mit Pappeln bzw. Weiden bei einer Nutzungsdauer von 21 Jahren.....	127

Verzeichnis der Abkürzungen

AL	Ackerland
AN-Extrakt	Ammoniumnitrat-Extrakt
BEFU	Sächsisches Düngungsprogramm zur Bestandesführung
BHD	Brusthöhendurchmesser
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BM	Biomasse
DGZ	Durchschnittlicher Gesamtwuchs
DüMV	Düngemittelverordnung
FWL	Feuerungswärmeleistung
GL	Grünland
GW	Grenzwert
K	Kelvin
KUP	Kurzumtriebsplantage
KW-Extrakt	Königswasser-Extrakt
LF	Landwirtschaftliche Nutzfläche
LfL	Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
LfUG	Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
MW	Maßnahmewert (BBodSchV)
ND	Nutzungsdauer
Nm ³	Normkubikmeter (0°C, 1013 mbar)
PM	Particulate Matter (Feinstaub)
PW	Prüfwert (BBodSchV)
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz

1 Einleitung

Seit den 80er-Jahren ist die Schwermetallproblematik im Raum Freiberg insbesondere in Halsbrücke, Krummenhennersdorf und Hilbersdorf bekannt. Vor allem Arsen, Cadmium und Blei liegen in dieser Region geogen bzw. anthropogen bedingt im Boden vor (Metallverhüttung). Die landwirtschaftliche Produktion ist auf diesen Flächen unter der Maßgabe der Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte für Kontaminanten in Lebens- und Futtermitteln z. T. stark erschwert.

Im Amtsbereich des Landwirtschaftsamtes Freiberg-Zug beträgt der Anteil an arsen- und schwermetallbelasteten Flächen zirka 10.000 ha (von 54.785 ha LF-Gesamt 2004), davon befinden sich etwa 700 ha in der höchsten Belastungsklasse (BK4). Betroffen sind ca. 25 – 30 Betriebe (Haupterwerbsbetriebe, Nebenerwerbsbetriebe und juristische Personen) (SCHWÄBE 2007). Daraus ergibt sich die dringende Notwendigkeit, Anbau- und Nutzungsalternativen für diese Region zu entwickeln, um eine wirtschaftlich und ökologisch tragfähige Landwirtschaft zu erhalten.

Mit dem Verbundprojekt „Biomasseanbau und -verwertung als Energieträger/Humusstoff von Flächen mit unterschiedlichen Schwermetallbelastungsgrad und Grünlandgebieten“ wurde die Problematik aufgegriffen und verschiedene Lösungsansätze untersucht.

In Zusammenarbeit mit dem Staatlichen Amt für Landwirtschaft Freiberg-Zug und dem Verein zur Förderung von Biomasse und nachwachsenden Rohstoffen Freiberg e.V. erfolgte die Auswahl geeigneter belasteter Flächen in der Region für die Durchführung von Untersuchungen zum Anbau und zur energetischen Nutzung der Biomasse. Auf diesen Grünland- und Ackerflächen wurden zum einen Kalkdüngungsversuche angelegt, um die Schwermetallmobilität im Boden und den Transfer in die Pflanzen zu reduzieren, zum anderen erfolgten Untersuchungen zur energetischen Nutzung der belasteten Aufwüchse zur Biogasproduktion (Vergärung) und als Brennstoffe in Kleinfeue- rungsanlagen (Verbrennung).

Eine weitere Aufgabe beinhaltete den gezielten Anbau von Energiepflanzen (Dauerkulturen) auf diesen Flächen. Hier wurden auf Grund der erhöhten Nachfrage und den bereits in anderen Projekten erzielten Ergebnissen verschiedenen Pappel- und Weidenklone angepflanzt.

In Abbildung 1 sind die Versuchsstandorte in der Region Freiberg dargestellt.

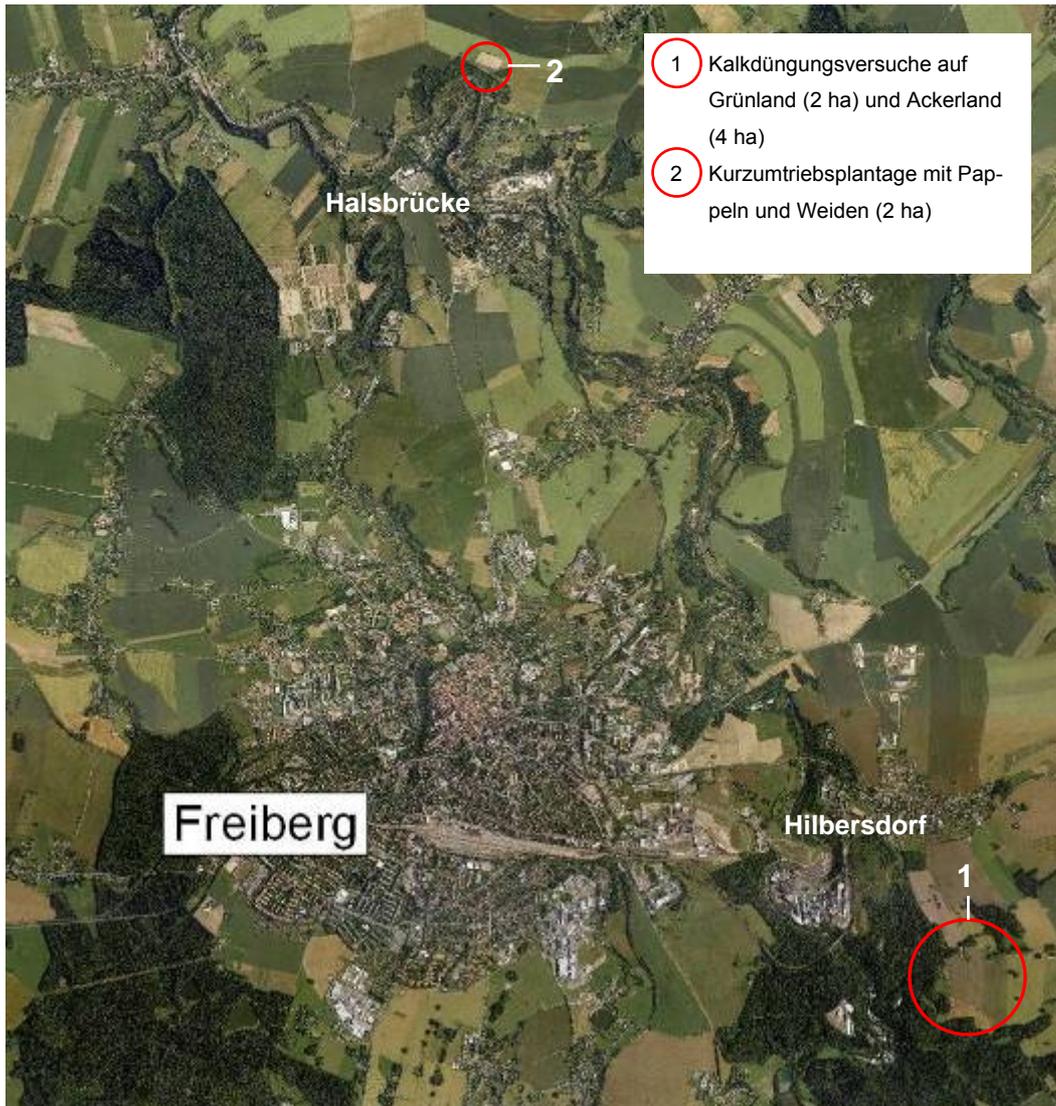


Abbildung 1: Lageskizze der Versuchsflächen in der Region Freiberg

(Karte: Landesvermessungsamt Sachsen 2005)

2 Untersuchungen zur Reduzierung der Arsen- und Schwermetallaufnahme durch geeignete Bewirtschaftungsmaßnahmen

Die Problematik der geogenen und anthropogenen Belastung der Böden mit Arsen- und Schwermetallen in den Erzbergbauregionen Sachsens sowie in den Flusssauen der dort ablaufenden Flüsse ist bekannt. Ebenso wurden verschiedene Anstrengungen unternommen, mit diesen zum Teil natürlichen Belastungen zu leben und eine produktive Landwirtschaft auf diesen Flächen zu erhalten. Die erzeugten Lebens- oder Futtermittel sollen keine Gesundheitsgefährdung für Mensch und Tier darstellen. Dem tragen auch die verschiedenen 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. Maßnahmen, die die Verschmutzung mit belasteten Bodenpartikeln und Staub minimieren. So kann durch eine gezielte Phosphordüngung zu Anfang der Vegetation die Arsenaufnahme durch die Pflanze zurückgedrängt 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 arsen- und schwermetallbelasteten Lebens- und Futtermittel wurde jedoch nicht systemisch über die Wurzeln der Pflanzen aufgenommen sondern haftet als Verschmutzung mit Bodenpartikeln oder Staub am Erntegut an. 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 - HRSG. - 2006, KLOSE 2003).

Im Rahmen von Datenerhebungen in Sachsen zur Praxisanwendung des Düngungsmodells „BE-FU“ 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. Im Amtsbereich Freiberg-Zug, wo ca. 18 % der landwirtschaftlichen Fläche mit Arsen und Schwermetallen

kontaminiert sind, lagen ca. 55 % der Flächen in der pH-Klasse B und nur 36 % der Böden waren optimal mit Kalk versorgt (ERNST, FÖRSTER, NEUBERT 2005).

Mit diesen Untersuchungen sollte daher auch die Notwendigkeit der Kalkung gerade in Regionen mit Schwermetallbelastungen den Landwirtschaftsbetrieben und Flächenbewirtschaftern nahe gebracht werden sowie der Nachweis zur Wirkung auf die Reduzierung des Transfers Boden-Pflanze erfolgen.

Nach Auswahl der für die Untersuchungen geeigneten kontaminierten Flächen mit dem Staatlichen Amt für Landwirtschaft Freiberg-Zug und Zustimmung des Landwirtschaftsbetriebes erfolgte im April 2005 die Anlage von Kalkdüngungsversuchen auf zwei einander nahe gelegenen Grünlandflächen sowie einer Ackerfläche in Hilbersdorf.

In der Gefäßstation der LfL in Leipzig wurde parallel dazu ein Versuch zur Prüfung des Einflusses der Kalkdüngung und organischen Düngung auf den Schwermetalltransfer bei Mais durchgeführt.

2.1 Untersuchungen zur Kalkdüngungswirkung auf Grünland

2.1.1 Versuchsanlage und Methodik

Auf den ausgewählten zwei Grünlandflächen in Hilbersdorf wurden folgende drei Prüfvarianten mit und ohne Kalkung angelegt:

- 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 zeigt die Lage und Kennzeichnung der Versuchsvarianten.

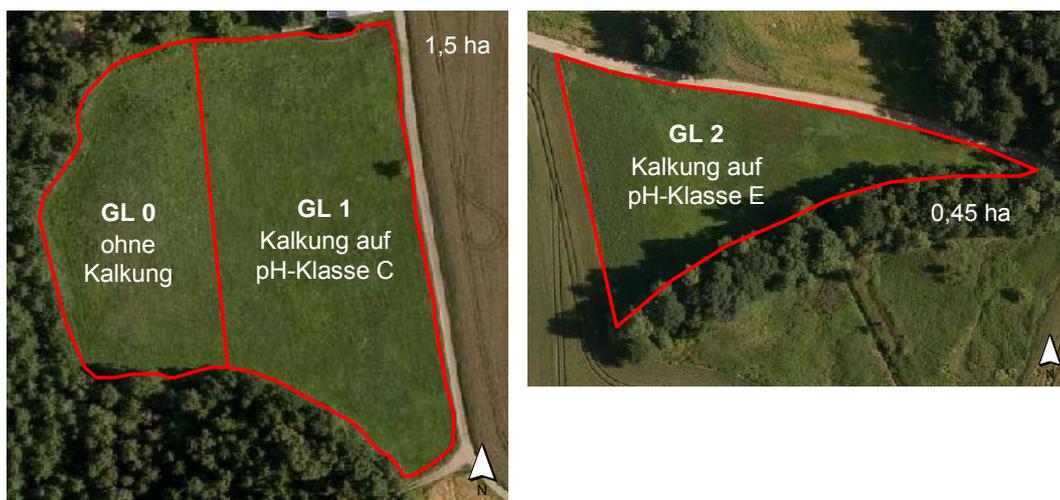


Abbildung 2: Versuchsflächen der Kalkdüngungsversuche auf Grünland in Hilbersdorf

Die pH-Werte im Oberboden der Grünlandflächen lagen 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. Die Ermittlung der erforderlichen Kalkdüngungsmengen wurde mit dem Sächsischen Düngungsprogramm „BEFU“ durchgeführt. Die Ausführung der Kalkung übernahmen private Unternehmen in der Region.

Jeweils im Frühjahr und Herbst sowie zu den jeweiligen Schnitzeitpunkten erfolgte die Entnahme von Bodenproben bzw. Pflanzenproben an markierten Flächenpunkten.

Bisher fand eine zwei- bis dreimalige Schnittnutzung pro Jahr als Tierfutter (Silage, Heu) statt. Der jeweils erste Schnitt des Jahres diente der Silagegewinnung und der zweite Schnitt zur Heubereitung. Im Versuchszeitraum wurde der größte Teil des Erntegutes für die weiteren Untersuchungen zur alternativen Verwertung verwendet.

Die chemischen Analysen des Bodens und der Aufwüchse erfolgte durch den Fachbereich Landwirtschaftliches Untersuchungswesen der LfL nach den in Anhang 1 aufgeführten Methoden.

2.1.2 Ergebnisse

In Tabelle 1 und 2 sind die pH-Werte, Humusgehalte und die Gehalte an Arsen und Schwermetallen im Oberboden (0 - 10 cm) der Versuchsvarianten zusammengestellt. 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 pflanzenaufnahmefähigen Anteil dar.

Die Ausgangsgehalte 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 %	As	Pb	Cd	As	Pb	Cd
			mg/kg im KW-Extrakt			mg/kg im AN-Extrakt		
GL0	4,7	7,8	168	649	4,7	0,13	2,06	0,54
GL1	4,7	6,4	252	1.573	4,8	0,14	9,42	0,77
GL2	4,9	11,3	4.621	5.239	8,3	0,87	6,90	0,83
Maßnahmewerte BBodSchV			50	1.200	20,0			

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

Variante	Cu mg/kg	Ni mg/kg	Hg mg/kg	Tl mg/kg	Zn 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	1.300 ¹⁾	1.900	2	15	--

¹⁾ bei Schafweide 200 mg/kg

Die Gehalte an Arsen überschreiten bei allen drei Varianten den Maßnahmewert der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV). Auf der Fläche GL 2 beträgt der Arsengehalt im Oberboden das 100-Fache des Maßnahmewertes. Ähnlich verhält es sich beim Bleigehalt, auch hier wird 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.

Die erste Kalkung wurde im April 2005 mit kohlen-sauren Kalkammonsalpeter durchgeführt. Mit dem Ziel einer stärkeren Anhebung des pH-Wertes erfolgten nach dem 2. Schnitt und im Frühjahr 2006 weitere Kalkgaben (Brantkalk). Die Kalkdüngungsgaben der Versuchsvarianten und die Entwicklung des pH-Wertes im Versuchszeitraum sind in Abbildung 3 dargestellt.

Bei der Kalkdüngungsvariante GL 1 konnte die angestrebte pH-Klasse C im Versuchszeitraum erreicht werden. Zur Erzielung der pH-Klasse E bei der Variante GL 2 sind jedoch noch weitere Kalkgaben erforderlich.

Kalkdüngungsgaben und Entwicklung der pH-Werte im Boden über den Versuchszeitraum

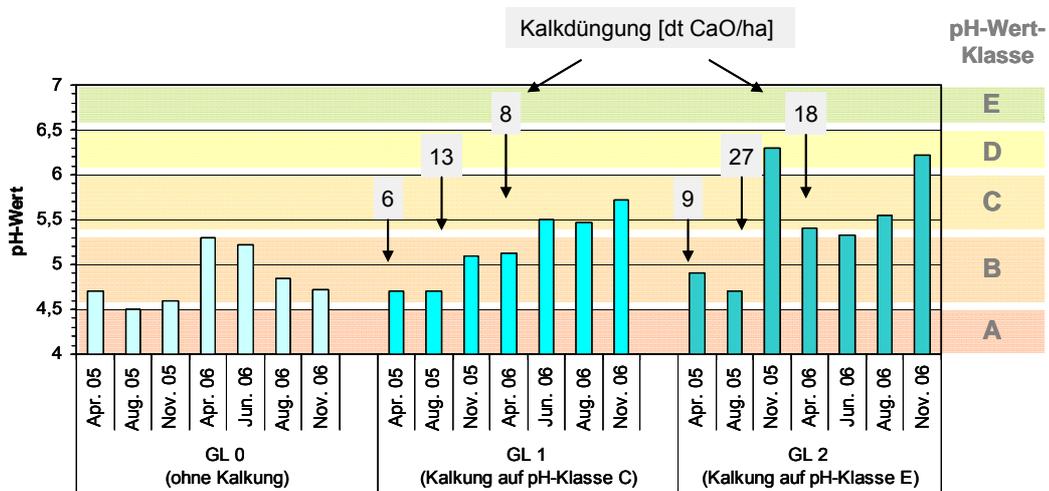


Abbildung 3: Kalkdüngungsmengen und Entwicklung des pH-Wertes im Oberboden Grünland (0 - 10 cm) im Versuchszeitraum

In den Abbildungen 4 – 6 sind die Gehalte 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 bei 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. Tendenziell sank auch hier bei den Varianten mit Kalkung der pflanzenverfügbare Anteil im Versuchszeitraum.

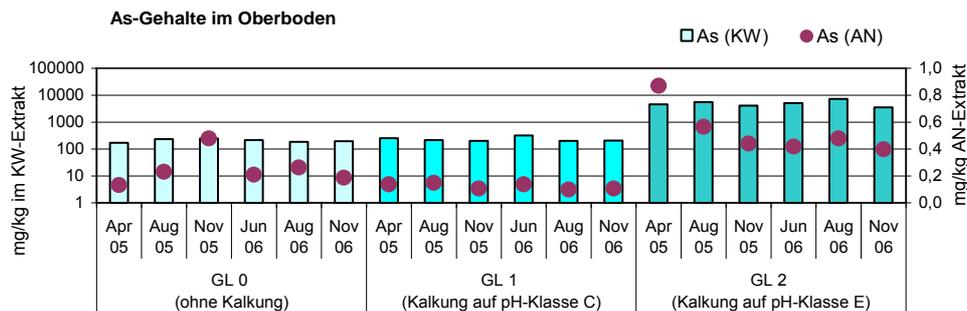


Abbildung 4: Entwicklung der KW- und AN-löslichen Arsengehalte im Oberboden Grünland (0 - 10 cm) von April 2005 bis November 2006

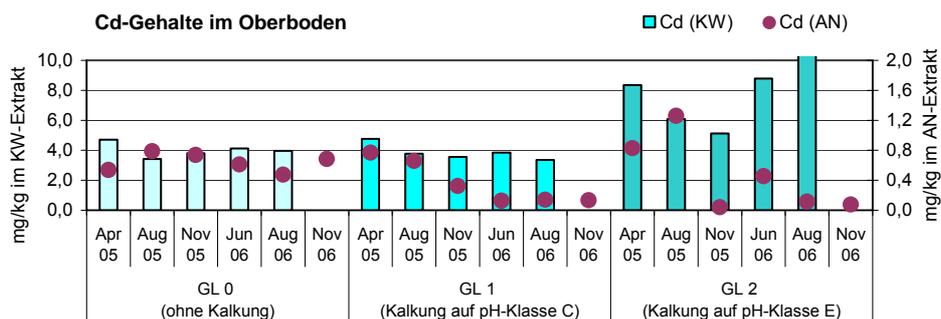


Abbildung 5: Entwicklung der KW- und AN-löslichen Cadmiumgehalte im Oberboden Grünland (0 - 10 cm) von April 2005 bis November 2006

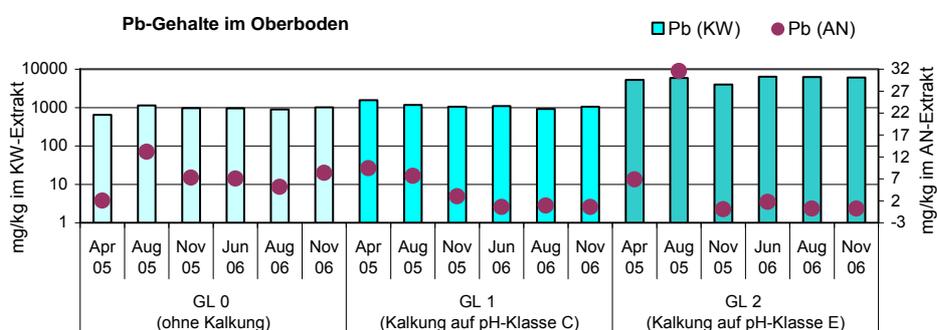


Abbildung 6: Entwicklung der KW- und AN-löslichen Bleigehalte im Oberboden Grünland (0 - 10 cm) von April 2005 bis November 2006

Es konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem pH-Wert und der Konzentration an pflanzenaufnehmbarem Cadmium und Blei im Oberboden nachgewiesen werden (Abbildung 7). Der pflanzenverfügbare Anteil an Cadmium und Blei nahm durch die Kalkdüngung und der daraus folgenden pH-Wert-Erhöhung im Oberboden ab. Bei den Arsengehalten konnte diese Abhängigkeit nicht beobachtet werden.

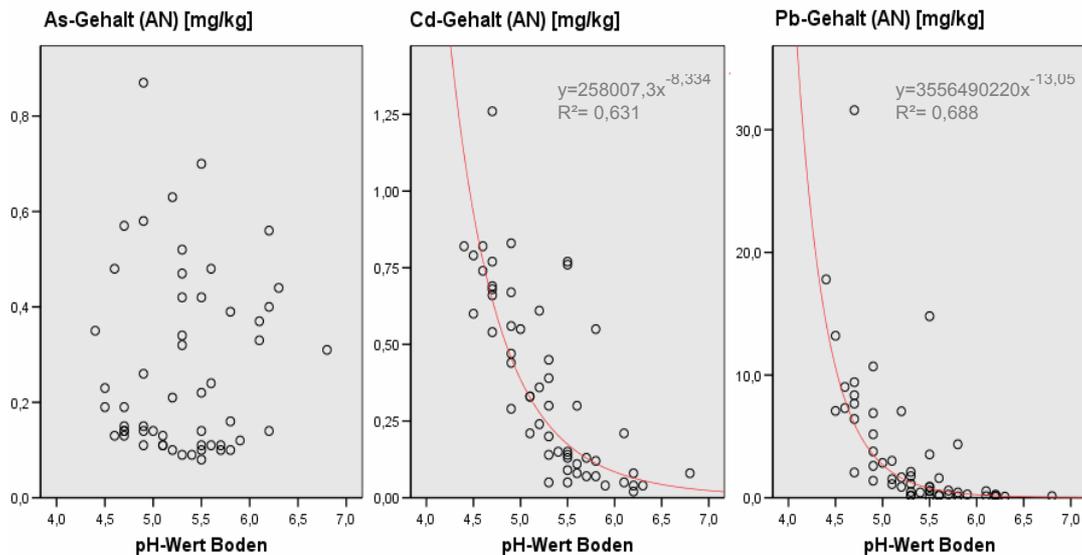


Abbildung 7: Abhängigkeit der AN-löslichen Bodengehalte an Arsen, Cadmium und Blei vom pH-Wert

In Tabelle 3 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 des 1. und 2. Versuchsjahres zusammengestellt.

Die Gesamtgehalte an Arsen, Cadmium und Blei lagen bei der Variante GL 2 zu allen Prüfterminen (April 2005 – Nov. 2006) 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) 220 mg As/kg, 4 mg Cd/kg und 1042 mg Pb/kg und bei der zweiten Versuchsfläche (GL 2) 4014 mg As/kg, 9 mg Cd/kg und 5670 mg Pb/kg erfasst. Damit lagen die Gehalte an Arsen und an Blei deutlich über dem Maßnahmewert der BbodSchV. Wie verschiedene Untersuchungsergebnisse belegen, kann jedoch nicht von der Bodenbelastung auf die Höhe der Belastung im Aufwuchs geschlossen werden (KLOSE 2003; KLOSE, RANK 2005).

Tabelle 3: 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			Cadmiumgehalt			Bleigehalt		
			Boden [mg/kg] KW-Extr.	AN-Extr.	Pflanze [mg/kg TM]	Boden [mg/kg] KW-Extr.	AN-Extr.	Pflanze [mg/kg TM]	Boden [mg/kg] KW-Extr.	AN-Extr.	Pflanze [mg/kg TM]
GL 0 ohne Kalkung	1. Schnitt, Apr. 05	4,7	168	0,1	0,3	4,7	0,5	2,3	649	2,1	2,9
	2. Schnitt, Aug. 05	4,5	232	0,2	1,0	3,4	0,8	0,9	1141	13,2	5,4
	1. Schnitt, Jun. 06	5,2	214	0,2	0,4	4,1	0,6	0,5	950	7,1	4,9
	2. Schnitt, Aug. 06	4,9	184	0,3	1,1	4,0	0,5	1,2	897	5,2	6,1
GL 1 Kalkung auf pH-Klasse C	1. Schnitt, Apr. 05	4,7	252	0,1	0,3	4,8	0,8	2,4	1573	9,4	5,9
	2. Schnitt, Aug. 05	4,7	215	0,2	1,0	3,8	0,7	1,2	1177	7,7	8,3
	1. Schnitt, Jun. 06	5,5	318	0,1	0,1	3,8	0,1	1,3	1093	0,6	3,6
	2. Schnitt, Aug. 06	5,5	202	0,1	0,8	3,4	0,1	1,1	924	0,9	4,2
GL 2 Kalkung auf pH-Klasse E	1. Schnitt, Apr. 05	4,9	4621	0,9	0,6	8,3	0,8	0,7	5239	6,9	3,7
	2. Schnitt, Aug. 05	4,7	5512	0,6	2,5	6,1	1,3	1,0	5936	31,6	10,1
	1. Schnitt, Jun. 06	5,3	5033	0,4	0,1	8,8	0,5	0,9	6420	1,8	4,0
	2. Schnitt, Aug. 06	5,6	7245	0,5	1,2	15,8	0,1	0,5	6320	0,2	3,7
Maßnahmewert BBodSchV			50			20			1200		
Futtermittel-Grenzwert					2			1			40

rot: Überschreitung des Maßnahme- oder Grenzwertes

Die sehr hohen **Arsengehalte** im Oberboden (0 - 10 cm), spiegeln sich nicht in entsprechenden Gehalten der Aufwüchse wider. Nur der 2. Aufwuchs der besonders belasteten Fläche GL 2 weist im Jahr 2005 einen mittleren Arsengehalt größer 2 mg/kg Trockenmasse auf und dürfte somit nicht als Futter verwendet werden.

Der 2. Schnitt ist bei allen drei Varianten stets höher mit Arsen belastet als der 1. Schnitt (Abbildung 8). Ähnliches hat auch Klose (2003) in seinen Untersuchungen beobachtet. Bei den Varianten GL 1 und GL 2 mit Kalkdüngung lässt sich tendenziell eine Abnahme der Arsengehalte in den Aufwüchsen von 2005 zu 2006 erkennen. Es konnte jedoch kein signifikanter Zusammenhang zwischen den Arsengehalten (KW- und AN-Extrakt) im Oberboden, dem pH-Wert und der Aufnahme von Arsen durch den Aufwuchs ermittelt werden. Dies zeigt sich auch in den niedrigen Bestimmtheitsmaßen der Regressionsanalyse (Abbildung 8).

Ergebnisse von Untersuchungen nach Klose 2003 belegen, dass 40 bis 50 % des Arsengehaltes von Grünlandaufwüchsen von Verunreinigungen auf der Pflanzenoberfläche stammen und somit nicht über die Wurzeln der Pflanzen aufgenommen werden. Dies könnte auch erklären, warum sich eine Abhängigkeit der Grünschnittbelastung vom Bodengehalt nicht nachweisen ließ.

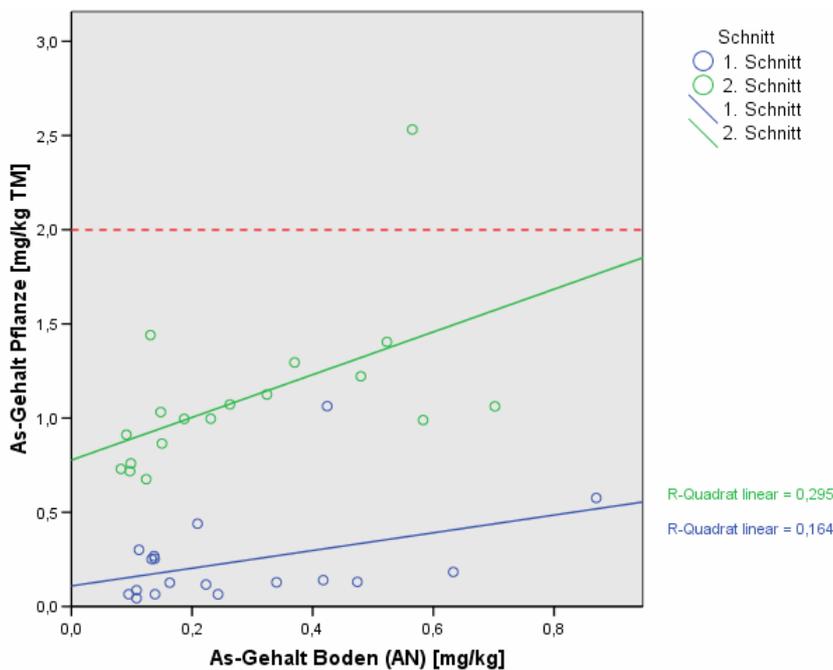


Abbildung 8: Abhängigkeit des Arsengehaltes in Grünlandaufwüchsen (1. und 2. Schnitt) von der Bodenbelastung

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 ca. 60 % der Pflanzenproben Überschreitungen des Futtermittelgrenzwertes festgestellt (Tabelle 3). Bei einem

Cadmiumgehalt von 3,4 mg/kg (KW-Extrakt) im Oberboden erfolgte bereits eine Überschreitung des Futtermittelgrenzwertes.

Ein signifikanter Zusammenhang zwischen den Cadmiumgehalten im Boden (KW- und AN-Extrakt) und der Belastung der Aufwüchse konnte jedoch nicht nachgewiesen werden, dies zeigt sich auch in den Punkt-/Streudiagrammen (Abbildung 9). Somit lässt sich auch der Cadmiumtransfer vom Boden in die Pflanze über diese Größen nicht ausreichend erklären.

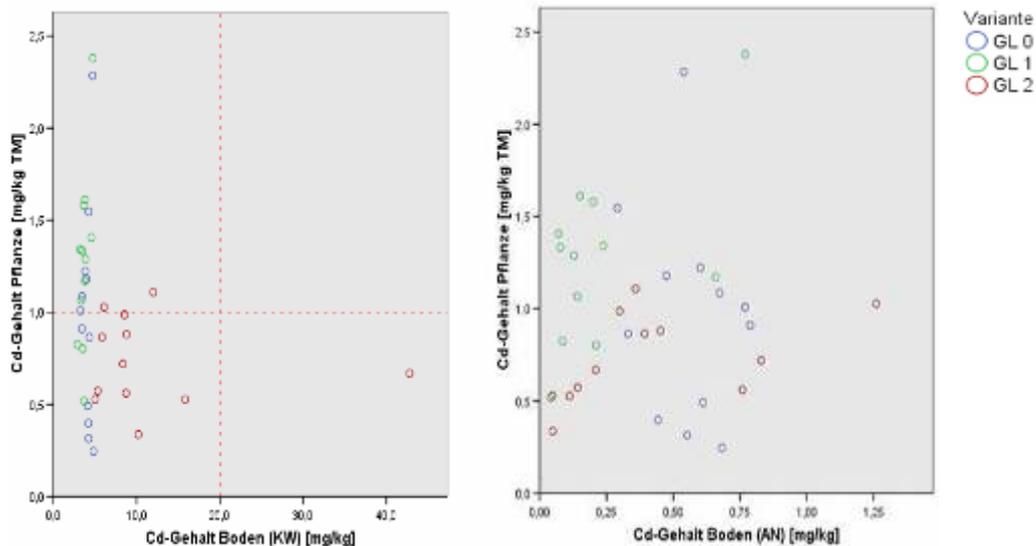


Abbildung 9: Abhängigkeit des Cadmiumgehaltes in Grünlandaufwüchsen von der Bodenbelastung

Die Ergebnisse des nur zweijährigen Versuchszeitraumes lassen tendenziell mit der Erhöhung des pH-Wertes eine Abnahme des mobilen Cadmiumanteils im Boden sowie der Cadmiumbelastung der Aufwüchse erkennen.

In Untersuchungen von Klose (2003) wurde ähnlich wie bei Arsen eine unterschiedlich hohe Cd-Belastung in den Aufwüchsen der zwei Schnitte festgestellt. Dies konnte bisher in den eigenen Untersuchungen nicht nachgewiesen 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 keine Gefahr der Kontamination des Grünlandaufwuchses aus.

Wie bei den Elementen Arsen und Cadmium konnte auch bei Blei keine Abhängigkeit des Belastungsgrades des Grünschnitts vom Gesamt-Bleigehalt im Boden statistisch nachgewiesen werden

(Abbildung 10). Mit der Regressionsanalyse wurde jedoch die Abhängigkeit der Grünschnittbelastung vom mobilen pflanzenverfügbaren Bodengehalt an Blei statistisch abgesichert (Abbildung 10).

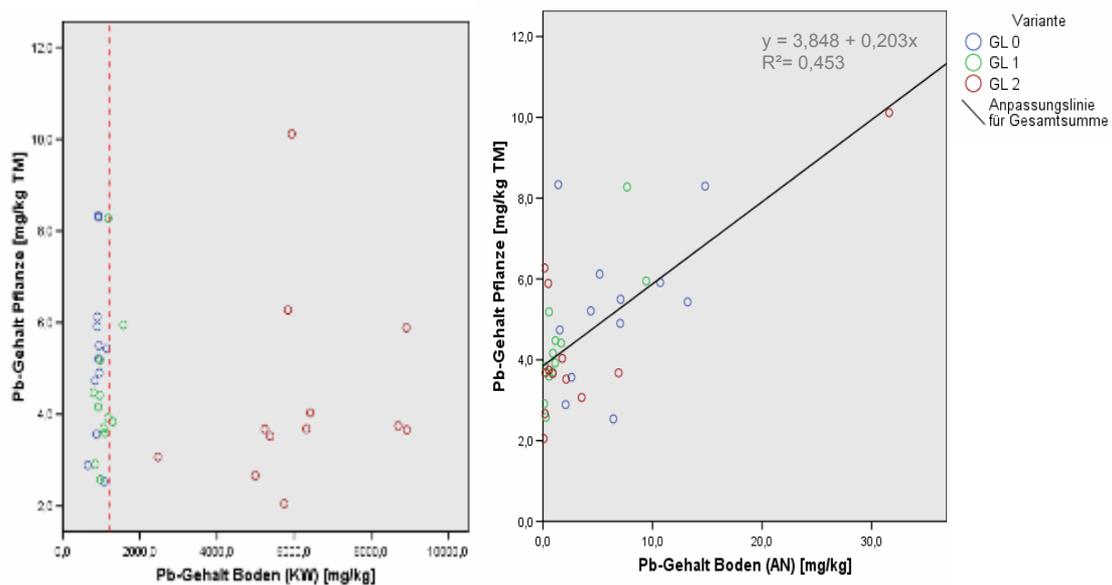


Abbildung 10: Abhängigkeit des Bleigehaltes in Grünschnitten vom Gesamtbleigehalt und mobilen Anteil an Blei im Oberboden (0 - 10 cm)

Auf Grund des geringen Datenmaterials aus den zwei Versuchsjahren und der noch nicht ausreichenden pH-Wert-Erhöhung der Versuchsflächen können keine präzisen Aussagen über den Transfer von Arsen, Cadmium und Blei aus dem Boden in die Pflanze getroffen werden. Die Ergebnisse der Regressionsanalysen zeigten, dass mit steigendem pH-Wert im Boden der pflanzenverfügbare Anteil an Cadmium und Blei im Boden abnimmt. Bei Blei konnte auch eine Abhängigkeit des Gehaltes im Aufwuchs von dem mobilen Anteil im Boden nachgewiesen werden. Danach ist davon auszugehen, dass der pH-Anstieg im Boden (absinkende AN-Gehalte im Boden) auch den Transfer von Blei in die Pflanze reduziert.

Nach den Ergebnissen von Klose (2003) stammen bei den Gehalten im Grünschnitt 30 - 40 % des Arsens, > 95 % des Cadmiums und 80 % des Bleies aus der systemischen Aufnahme durch die Wurzeln der Pflanzen. Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung bodenchemischer Maßnahmen (Kalkung).

In Abbildung 11 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.

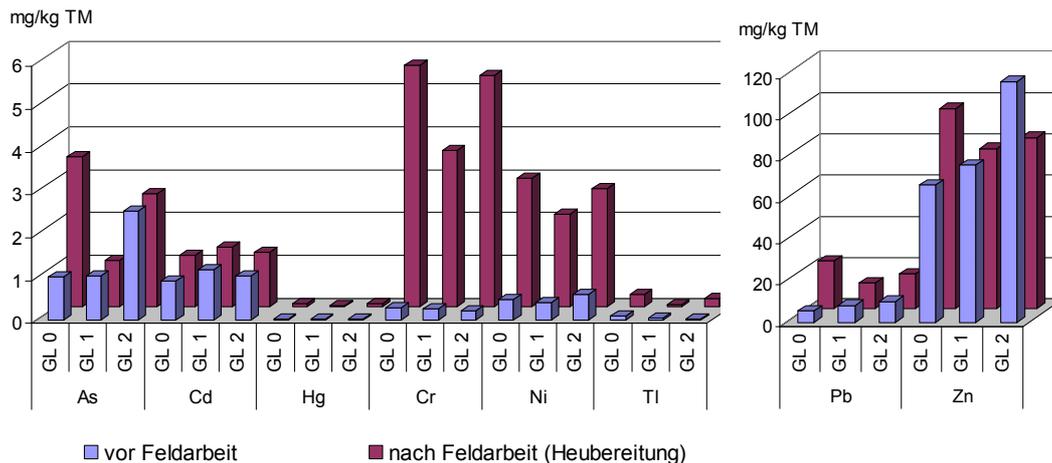


Abbildung 11: Arsen- und Schwermetallgehalte im Grünschnitt vor und nach der Feldarbeit

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 %
Thallium	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 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 (Winterroggen)

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 mit Winterroggen (Abbildung 12). Durch eine gezielte Anhebung des pH-Wertes (Kalkung) in der Ackerkrume soll 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

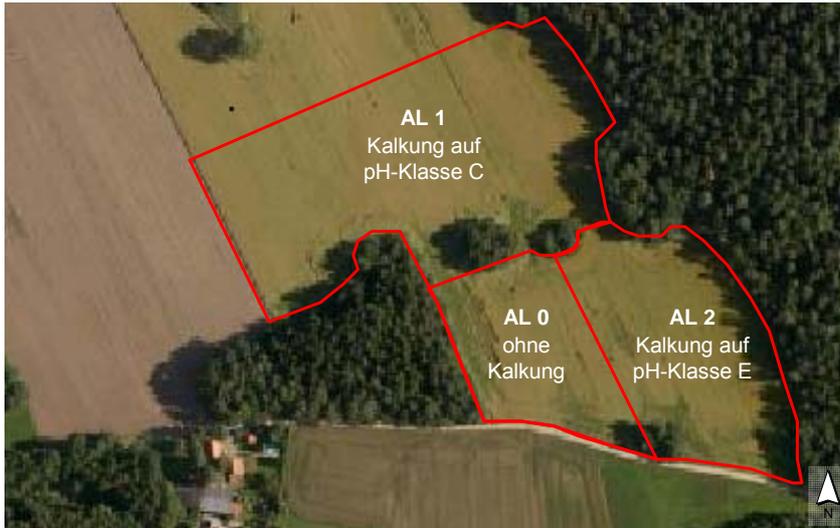


Abbildung 12: Kalkdüngungsversuch mit Winterroggen

Der mittlere pH-Wert im Oberboden (0 - 30 cm) der Ackerfläche lag mit 5,5 in der pH-Klasse B. Die erforderlichen Kalkdüngungsmengen wurden mittels „BEFU“ berechnet. Bei der Bodengruppe 4 (SL) und einem Humusgehalt von 4,2 wurde eine Aufwandmenge von 29 dt CaO/ha ausgewiesen. Auf dieser Grundlage wurden im Oktober 2005 auf der Fläche AL 1: 20 dt CaO/ha und auf der Fläche AL 2: 40 dt CaO/ha Branntkalk ausgebracht.

Jeweils im Frühjahr, zu den vorgesehenen Schnitt- bzw. Erntezeitpunkten und im Herbst sind Bodenproben entnommen worden. Zur Milchreife des Bestandes wurden je Variante von einer Fläche: 100 m Länge x 2,5 m Breite der Aufwuchs geschnitten und Ganzpflanzensilage hergestellt. Diese Silage diente für die Untersuchungen zum Einsatz belasteter Silage zur Biogaserzeugung. Auf der übrigen Fläche ist der Bestand zur Vollreife gedroschen worden. Das dort geerntete Roggenkorn und -stroh wurde für die Untersuchungen zur Verbrennung von belasteten Aufwüchsen in Kleinfeuerungsanlagen genutzt. Zu beiden Schnittterminen wurde auch Pflanzenproben (Aufnahme Nährstoffe, Arsen, Schwermetalle) entnommen.

Die Analyse erfolgte durch den Fachbereich Landwirtschaftliches Untersuchungswesen der LfL nach den in Anhang 1 aufgeführten Methoden.

2.2.2 Ergebnisse

Die Teilflächen der Ackerfläche weisen eine differenzierte Belastung mit Arsen, Cadmium und Blei auf (Tabelle 4 und 5). Der jeweilige Prüf- oder Maßnahmewert laut BBodSchV wird dabei überschritten.

Tabelle 4: pH-Wert, Humusgehalt und Gehalte an Arsen, Blei und Cadmium im Oberboden der Ackerfläche vor Versuchsbeginn (Entnahmetiefe 0 - 30 cm, April 2005)

Fläche	pH	Humus %	mg/kg im KW-Extrakt			mg/kg im AN-Extrakt		
			As	Pb	Cd	As	Pb	Cd
AL0	5,5	3,4	1543	2960	4,9	0,321	1,300	0,285
AL1	5,7	4,2	1382	3064	6,2	0,168	0,336	0,163
AL2	5,5	4,2	616	1678	5,0	0,966	0,309	0,042
Prüf-/ Maßnahmewerte BBodSchV			200 ¹⁾				0,1	0,1 ²⁾

¹⁾ Bei Böden mit zeitweise reduzierenden Verhältnissen gilt PW = 50 mg/kg.

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

Tabelle 5: Gehalte an Schwermetallen im Oberboden der Ackerfläche vor Versuchsbeginn (Entnahmetiefe 0-30 cm, April 2005) im KW-Extrakt

Fläche	Cu mg/kg	Ni mg/kg	Hg mg/kg	Tl mg/kg	Zn mg/kg
AL0	110	33,6	0,30	0,60	500
AL1	107	29,1	0,29	0,67	485
AL2	100	28,6	0,35	0,67	389
Prüfwerte BBodSchV			5	-- ¹⁾	

1) PW für Tl im AN-Extrakt = 0,1 mg/kg

Die bei den Versuchsvarianten angestrebten pH-Klassen C und E konnten im bisherigen kurzen Versuchszeitraum noch nicht erreicht werden. Es sind weitere Kalkgaben bei den Varianten AL 1 und AL 2 erforderlich (Abbildung 13).

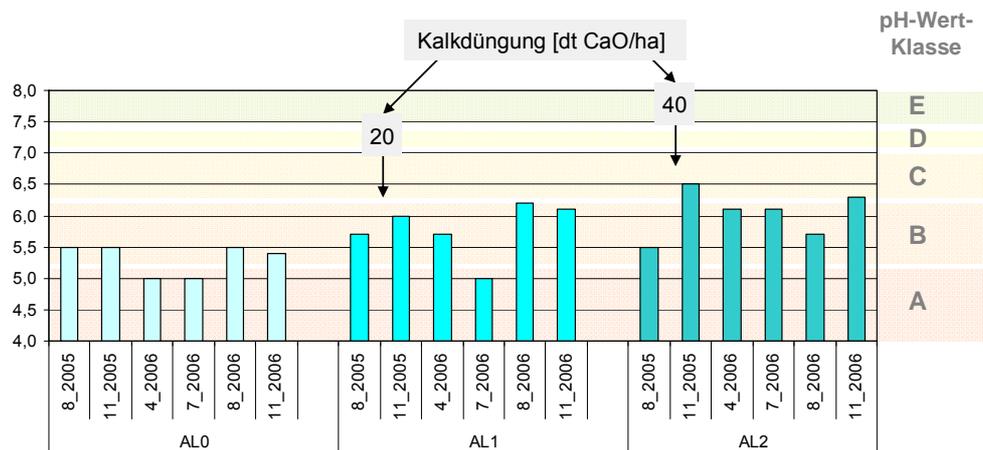


Abbildung 13: Kalkdüngungsmengen und Entwicklung des pH-Wertes im Oberboden Ackerland (0 - 30 cm) im Zeitraum August 2005 bis November 2006

Die Gehalte an Arsen, Cadmium und Blei im Oberboden (0 - 30 cm) der Varianten (AL 0, AL 1, AL 2) schwankten zwischen den Terminen stark. Es kann eine Tendenz zu sinkenden Gehalten an Arsen, Cadmium und Blei im Ammoniumnitrat-Extrakt vom August 2005 zum November 2006 in allen drei Kalkdüngungsvarianten festgestellt werden (Tabelle 6).

Tabelle 6: pH-Werte und Gehalte an Arsen, Cadmium und Blei (Entnahmetiefe 30 cm, KW- und AN-Extrakt) im Oberboden Ackerland zu verschiedenen Probenahmetermen

Variante	Termin	pH-Wert	As	Pb	Cd	As	Pb	Cd
			im KW-Extrakt [mg/kg]			im AN-Extrakt [mg/kg]		
AL 0 Ohne Kalkung	8_2005	5,5	1543	2960	4,9	-	-	-
	11_2005	5,5	1524	2809	5,0	0,32	1,30	0,29
	4_2006	5,0	1500	3600	5,3	-	-	-
	7_2006	5,0	823	3350	4,4	0,14	4,78	0,51
	8_2006	5,5	687	2060	4,7	0,19	0,98	0,26
	11_2006	5,4	1480	2860	4,7	0,16	0,86	0,23
AL 1 Kalkung auf pH- Klasse C	8_2005	5,7	1382	3064	6,2	-	-	-
	11_2005	6,0	579	1409	6,6	0,17	0,34	0,16
	4_2006	5,7	737	1820	5,0	-	-	-
	7_2006	5,0	481	1420	4,2	0,10	0,60	0,16
	8_2006	6,2	504	1540	4,7	0,11	0,09	0,08
	11_2006	6,1	818	1960	3,7	0,10	0,06	0,06
AL 2 Kalkung auf pH- Klasse E	8_2005	5,5	616	1678	5,0	-	-	-
	11_2005	6,5	3659	3039	7,3	0,97	0,31	0,04
	4_2006	6,1	713	1360	1,9	-	-	-
	7_2006	6,1	3520	4930	6,2	1,27	0,04	0,04
	8_2006	5,7	700	1260	4,6	0,11	0,85	0,24
	11_2006	6,3	992	1480	4,1	0,27	0,03	0,03

Durch die Kalkdüngung und der daraus folgenden pH-Wert-Erhöhung wurde der mobile Anteil an Cadmium und Blei im Boden reduziert. Dies belegten regressionsanalytische Untersuchungen (Abbildung 14). Für den Gehalt an pflanzenverfügbarem Arsen (AN) konnte kein Zusammenhang zum pH-Wert des Bodens nachgewiesen werden.

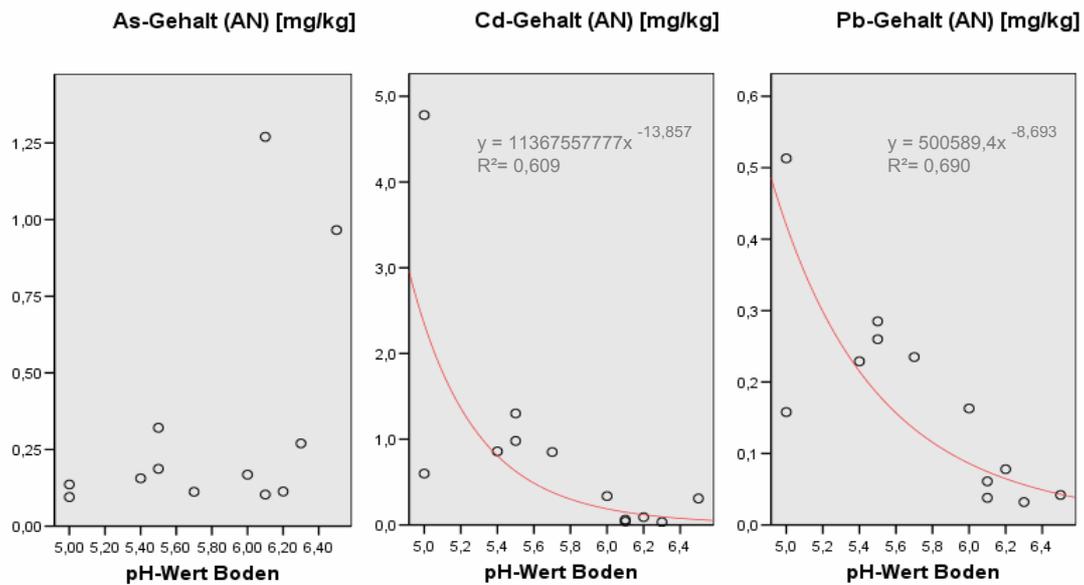


Abbildung 14: Abhängigkeit des mobilen Anteils an Arsen, Cadmium und Blei (AN-Extrakt) im Boden Ackerland (0 - 30 cm) vom pH-Wert

Die Gehalte an Cadmium und Blei im Roggenkorn überschreiten bei allen drei Kalkdüngungsvarianten die Lebensmittelgrenzwerte von 0,1 mg Cd/kg und 0,2 mg Pb/kg (Tabelle 7). Nach den gesetzlichen Grenzwerten für Futtermittel könnten die Chargen jedoch als Futtermittel eingesetzt werden. Grenzwertüberschreitungen des Cadmiumgehaltes nach dem Lebensmittelgesetz treten nach Klose (2003) bereits ab einem Bodengehalt von 1 mg Cd/kg ein. Bei Futtermitteln geht man bei einem Gehalt von ≥ 7 mg Cd/kg Boden davon aus, dass der Grenzwert überschritten werden kann. Die mittleren Cadmiumgehalte im Boden der drei Varianten lagen zum Erntetermin bei 4,6 mg/kg, somit kann eine Übereinstimmung mit den angegebenen kritischen Gehalten für eine Grenzwertüberschreitung nach Klose (2003) und dem Futtermittelgesetz festgestellt werden.

Tabelle 7: Gehalte an Kontaminanten in Roggenganzpflanzen, -korn und -stroh

Variante		Termin	As	Cd	Pb
mg/kg TM Pflanze					
AL 0	Ganzpflanzen	6_2006	1,0	1,1	3,2
	Korn	7_2006	0,3	0,3	0,3
	Stroh		1,4	0,5	1,8
AL 1	Ganzpflanzen	6_2006	1,1	0,6	3,0
	Korn	7_2006	0,3	0,3	0,2
	Stroh		1,4	0,4	1,4
AL 2	Ganzpflanzen	6_2006	9,7	1,4	14,3
	Korn	7_2006	0,4	0,6	0,2
	Stroh		12,0	1,7	16,6
GW Futter			2	1	10*
GW Lebensmittel				0,1	0,2

* GW Einzelfutter

Die Gehalte an Arsen, Cadmium und Blei in den Ganzpflanzensilagen überschritten teilweise auch die Futtermittelgrenzwerte. Nur bei der Ganzpflanzensilage der Variante AL 1 wurde keine Belastung über dem Grenzwert ermittelt. 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.

Die geringe Datengrundlage und kurze Versuchsdauer lassen eine detaillierte Aussage zum Arsen- und Schwermetalltransfer und zur Wirkung der Kalkdüngungsmaßnahmen zum jetzigen Zeitpunkt nicht zu.

2.3 Prüfung des Einflusses von Kalkdüngung und organischer Düngung auf den Schwermetalltransfer bei Mais im Mitscherlich-Gefäßversuch

Parallel zu den Untersuchungen zur Kalkdüngungswirkung auf den Praxisschlägen in Hilbersdorf erfolgte die Durchführung eines Versuchs zur Kalkdüngungswirkung kombiniert mit organischer Düngung in der Gefäßstation der LfL. Gefäßversuche haben den Vorteil, dass unter kontinuierlichen Bedingungen (Wasserversorgung, Lufttemperatur, definiertes Bodensubstrat) der Einfluss von Kalkgaben und einer organischen Düngung auf das Verhalten der Kontaminanten im System Boden-Pflanze untersucht werden kann.

2.3.1 Versuchsanlage und Methodik

Die Anlage der Gefäßversuche erfolgte im Mai 2006 in Mitscherlich-Gefäßen der Größe 1 (6,5 kg Inhalt/Gefäß) mit einem Bodengemisch (1:1) der Standorte Niederbobritzsch und Oberschöna. Das Bodengemisch wies einen niedrigen pH-Wert sowie die gewünschte Belastung an Arsen, Cadmium und Blei auf. In Tabelle 8 sind die Gehaltszahlen des Bodengemisches zusammengestellt.

Tabelle 8: Charakteristik des Bodengemisches

pH	Humus %	P K Mg			As	Pb	Cd	Cr	Ni	Zn
		mg/100g Boden								
4,9	3,0	4,4	9,2	8,9	832	1440	4,2	38,1	25,5	267

Der Versuch beinhaltete zwei Prüffaktoren, zum einen die Kalkdüngung und zum anderen die organische Düngung:

Prüffaktoren: Faktor A: Kalkdüngung als CaCO₃

- 1 0
- 2 4 g Ca/Gefäß
- 3 8 g Ca/Gefäß

Faktor B: organische Düngung

- 1 ohne organische Düngung
- 2 Stallmistdüngung (90 g/Gefäß) entspricht 30 t/ha
- 3 Kompostdüngung (90 g/Gefäß) entspricht 30 t/ha

Neben den aufgeführten Düngungsmaßnahmen erfolgte eine Nährstoffgrundversorgung der Gefäße mit 1,5 g Stickstoff, 0,4 g Phosphor, 2,0 g Kalium und 0,4 Magnesium pro Gefäß.

Auf der Grundlage der ermittelten maximalen Wasserkapazität des Bodens wurde eine optimale Wasserversorgung der Gefäße mit voll entionisiertem Wasser durchgeführt. In Tabelle 9 sind die Versuchsvarianten zusammengestellt. Der Versuch wurde mit vierfacher Wiederholung durchgeführt, d.h. pro Variante wurden vier Gefäße angesetzt.

Tabelle 9: Kennzeichnung der Versuchsvarianten

Variante	Kalkdüngung	Organische Düngung bzw. Blähton
1.1	ohne	ohne
1.2	ohne	90 g Stallmistdüngung/Gefäß
1.3	ohne	90 g Kompostdüngung/Gefäß
2.1	4 g Ca/Gefäß	ohne
2.2	4 g Ca/Gefäß	90 g Stallmistdüngung/Gefäß
2.3	4 g Ca/Gefäß	90 g Kompostdüngung/Gefäß
3.1	8 g Ca/Gefäß	ohne
3.2	8 g Ca/Gefäß	90 g Stallmistdüngung/Gefäß
3.3	8 g Ca/Gefäß	90 g Kompostdüngung/Gefäß

2.3.2 Ergebnisse

Die Ernte der Mais-Ganzpflanzen erfolgte im Juli 2006. Bei der Erfassung der Trockenmasseerträge pro Gefäß konnten signifikante Unterschiede zwischen den Varianten nachgewiesen werden (Abbildung 15).

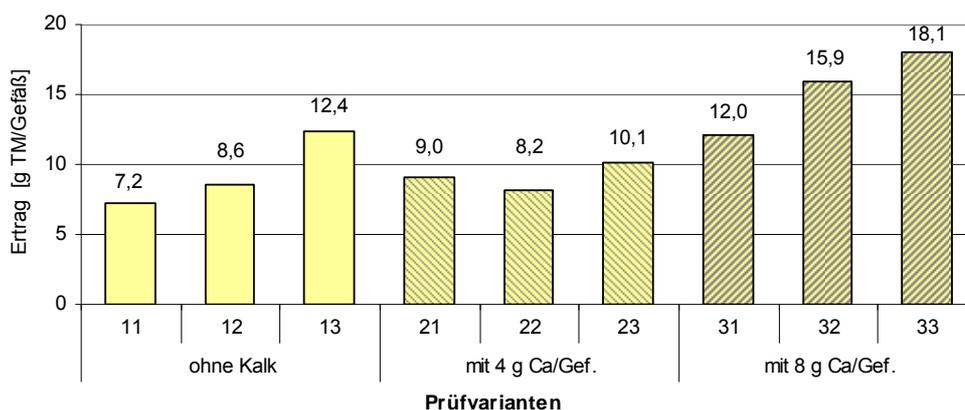


Abbildung 15: Mittlere Erträge (Mais) der Prüfvarianten im Gefäßversuch

Bei den Prüfvarianten erzielten die Varianten mit der höchsten Kalkdüngungsmenge (8g Ca/Gefäß) bzw. mit der organischen Kompostdüngung die höchsten Erträge

Die Belastung der Maispflanzen mit Arsen, Cadmium und Blei sank mit steigender Kalkdüngung. Bei den Entzügen der drei Elemente konnten jedoch nur bei Blei signifikante Unterschiede zwischen den Kalkdüngungsvarianten festgestellt werden. Der Blei-Entzug sank deutlich mit steigender Kalkdüngung. Somit trugen die steigenden Erträge zur Reduzierung der Arsen- und Schwermetallkonzentrationen in den Pflanzen bei.

Unterschiede bei der Arsen- und Schwermetallaufnahme durch die Pflanzen auf Grund der organischen Düngung mit Stallmist oder Kompost konnten statistisch nicht nachgewiesen werden (Abbildung 16 - 18).

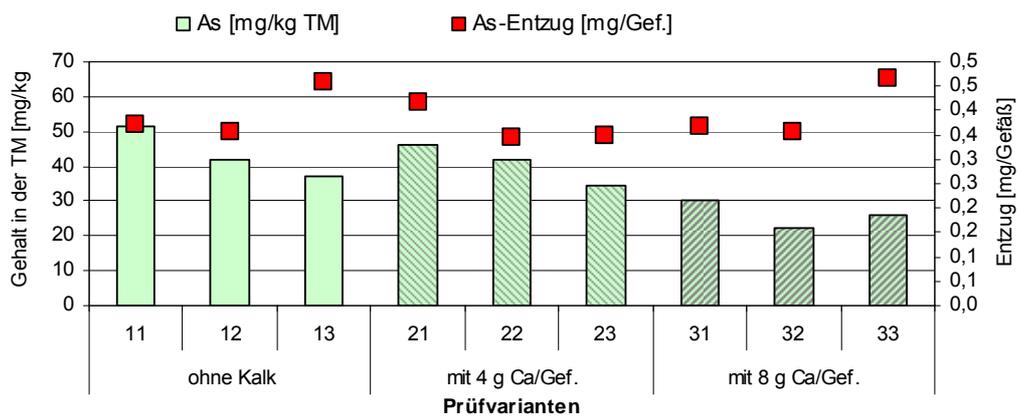


Abbildung 16: Mittlere Gehalte an Arsen in der Trockenmasse der Aufwüchse (Mais) und Arsen-Entzüge der Prüfvarianten

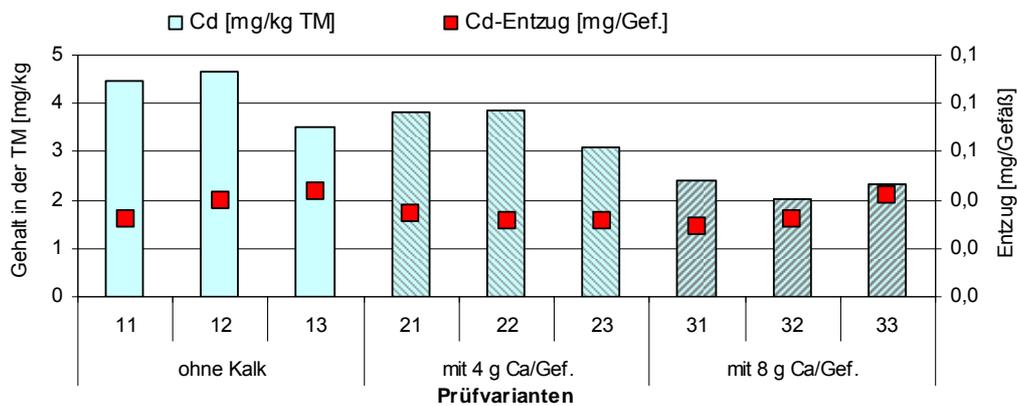


Abbildung 17: Mittlere Gehalte an Cadmium in der Trockenmasse der Aufwüchse (Mais) und Cadmium-Entzüge der Prüfvarianten

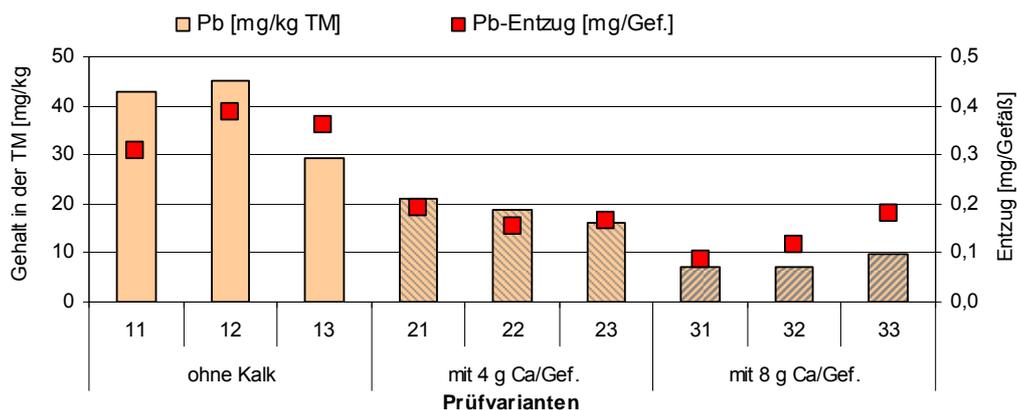


Abbildung 18: Mittlere Gehalte an Blei in der Trockenmasse der Aufwüchse (Mais) und Blei-Entzüge der Prüfvarianten

Mit Hilfe der linearen Regressionsanalyse konnten signifikante Zusammenhänge zwischen den Gehalten an Arsen, Cadmium und Blei in den Maispflanzen (mg/kg TS) und dem pH-Wert sowie Humusgehalt des Bodens nachgewiesen werden. Danach sank die Belastung in den Pflanzen mit steigendem pH-Wert und steigenden Humusgehalten bzw. organischer Substanz (Tabelle 10). Die Abhängigkeit der Belastung vom Humusgehalt/organischer Substanz ist geringer als die vom pH-Wert, dies zeigt sich in dem niedrigeren Bestimmtheitsmaß.

Bei den Entzügen an Kontaminanten konnte nur bei Blei ein signifikanter Zusammenhang mit dem pH-Wert und dem Humusgehalt festgestellt werden.

Tabelle 10: Bestimmtheitsmaß und Funktion der linearen Regression

Element	pH-Wert	Humusgehalt/org. Substanz	pH-Wert und Humusgehalt/org. Substanz
Abhängigkeit des Gehaltes [mg/kg TM]			
As	R ² = 0,66 y = 98,9 -11,4*pH	R ² = 0,64 y = 152,8 -37,9*Humus	R ² = 0,84 y = 151,1 -7,5*pH -24,0*Humus
Cd	R ² = 0,82 y = 10,2 -1,3*pH	R ² = 0,35 y = 11,8 -2,8*Humus	R ² = 0,83 y = 11,6 -1,2*pH -0,6*Humus
Pb	R ² = 0,87 y = 129,6 -19,8*pH	R ² = 0,22 y = 124,7 -33,6*Humus	R ² = 0,88 y = 120,1 -20,5*pH -20,5*Humus
Abhängigkeit des Entzuges [mg/Gefäß]			
As	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant
Cd	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant
Pb	R ² = 0,49 y = 1,0 -0,1*pH	nicht signifikant	R ² = 0,56 y = 0,5 -0,2*pH -0,2*Humus

2.4 Fazit der Kalkdüngungsversuche

Die im Jahr 2005 angelegten Kalkdüngungsversuche auf arsen- und schwermetallbelastetem Grünland und Ackerland in Hilbersdorf sowie im Mitscherlich-Gefäßversuch zeigen erste, vielversprechende Ergebnisse und sollten daher wie geplant weitergeführt werden.

Die angestrebten Ziel-pH-Werte (pH-Klassen C und E) der verschiedenen Kalkdüngungsstufen wurden zum größten Teil auf den Flächen noch nicht erreicht, so dass die volle Wirkung der Kalkdüngung auf den Arsen- und Schwermetalltransfer noch nicht zum Tragen kam.

In den ein- bis zweijährigen Kalkdüngungsversuchen 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 signifikant abnimmt. Bei Arsen konnte dieser Effekt auch tendenziell beobachtet werden.

Die Ergebnisse des Mitscherlich-Gefäßversuches mit Mais bestätigten die positive Wirkung der Kalkdüngung zur Reduzierung des Arsen-, Cadmium- und Bleitransfers Boden-Pflanze. Die Belastung der Maispflanzen sank mit steigenden pH-Wert.

Obwohl die in den Versuchen genutzten Grünlandflächen extrem mit Arsen- und Blei belastet sind, konnten Überschreitungen der Futtermittelgrenzwerte kaum festgestellt werden. Die Belastung der Flächen mit Cadmium lag unter dem Maßnahmewert der Bodenschutzverordnung. Im Grünschnitt wurden jedoch zum Teil problematische Cadmiumgehalte festgestellt.

Auch auf dem Ackerland (Versuchsfrucht Winterroggen) wurden ähnliche Effekte einer stärkeren Belastung der Aufwüchse mit Cadmium aber auch Blei beobachtet. Eine Verwendung des Kornes als Lebensmittel ist auf Grund der strengen gesetzlichen Grenzwerte (Lebensmittelverordnung) nicht möglich.

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 wird die Nutzung von kontaminierten Flächen zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion zukünftig noch mehr eingeschränkt.

Der kurze Versuchszeitraum und die geringe Datengrundlage lassen eine detaillierte Aussage zum Arsen- und Schwermetalltransfer zum jetzigen Zeitpunkt nicht zu. Die Versuche sind weiter zu spezifizieren und die noch erforderlichen Kalkmengen zur Erreichung der Ziel-pH-Werte auszubringen.

Eine besondere Bedeutung muss zudem der Kalkdüngungsberatung der Dienstleistungs- und Landwirtschaftsbetriebe zukommen, da die BEFU-Auswertung in der Region Freiberg generell zu

niedrige Boden-pH-Werte nachwies. Zudem wurden in der Praxis große Defizite bei der Berechnung der erforderlichen Kalkmengen in Abhängigkeit vom Kalkdüngertyp beobachtet. Hier sollte die Erarbeitung eines Merkblattes zur Kalkdüngungsbedarfsermittlung sowie zur Berechnung der erforderlichen Kalkmenge an Hand der Schlagkartei erfolgen.

3 Einsatz von belasteten Aufwüchsen zur Biogasproduktion

Die Biogasproduktion stellt eine Möglichkeit dar, belastete Aufwüchse außerhalb des Lebensmittel- und Futtermittelrechts zu nutzen. Grundsätzlich gibt es hinsichtlich des Belastungsgrades keine gesetzliche Einschränkung für den Einsatz dieser Biomassen in Biogasanlagen. Jedoch muss beachtet werden, dass der Umgang mit Gärrückständen rechtlich geregelt ist. Nach Düngemittelverordnung (DüMV) gelten Grenzwerte für den Gehalt an Arsen und Schwermetallen in Gärrückständen, wenn diese nicht auf eigenen Flächen ausgebracht, sondern in Verkehr gebracht werden. Somit wäre es möglich, belastete Aufwüchse in der eigenen Biogasanlage zur Energieerzeugung einzusetzen. Die Gärrückstände sind auf den jeweiligen Flächen wieder auszubringen.

In den zweijährigen Untersuchungen erfolgte die Prüfung des Einsatzes von unterschiedlich arsen- und schwermetallbelasteten Aufwüchsen zur Biogasproduktion im labortechnischen Maßstab. Bei der eingesetzten Grassilage, der Ganzpflanzensilage und dem Roggenschrot handelte es sich um die Aufwüchse der Kalkdüngungsversuche der kontaminierten Flächen in Hilbersdorf (siehe Abschnitt 2). Es wurde geprüft, in welchem Maße sich unterschiedlich mit Arsen und Schwermetallen belastetes Substrat vergären lässt und mit welcher Belastung bei den Gärrückständen zu rechnen ist.

Die Vergärung erfolgte als Monosubstrat in diskontinuierlichen Gärtests (Batch) und als Kosubstrat zu Rindergülle in kontinuierlichen Gärtests.

3.1 Diskontinuierliche Gärtests (Batch-Versuche)

3.1.1 Material und Methodik

In den Jahren 2005 und 2006 wurden durch das Institut für Energetik und Umwelt gGmbH in Leipzig Batch-Gärtests mit Grassilage der drei Kalkdüngungsvarianten, Roggenganzpflanzensilage und Roggenschrot durchgeführt.

Nach dem Anwelken des gehäckselten Erntegutes auf dem Feld erfolgte die Silierung in Siliergläsern und -fässern. Nach 90 Tagen Silierdauer wurden die Silagen entnommen und bis zum Versuchsbeginn eingefroren.

Bei den Silagen konnten keine qualitativen Unterschiede in Anhängigkeit von der Höhe der Kalkdüngung festgestellt werden. Es wurde ausschließlich unverdorbene Silage in den Versuchen verwendet.

In Tabelle 11 sind die in den zwei Versuchsjahren geprüften Varianten zusammengestellt.

Die Analyse der Substrate auf ihre gärchemische Zusammensetzung und den Gehalten an Arsen und Schwermetallen übernahm der Fachbereich Landwirtschaftliches Untersuchungswesen der LfL.

Tabelle 11: Versuchsvarianten der diskontinuierlichen Gärversuche

Jahr	Substrat	Variante	Substratherkunft: Belastungsgrad der Fläche/ Kalkdüngung	
2005	Grünschnittsilage	GS 0	mittlerer Belastung	ohne Kalkdüngung
		GS 1		mittlere Kalkdüngung
		GS 2	hohe Belastung	erhöhte Kalkdüngung
2006	Grünschnittsilage	GS 0	mittlerer Belastung	ohne Kalkdüngung
		GS 1		mittlere Kalkdüngung
		GS 2	hohe Belastung	erhöhte Kalkdüngung
	Roggen- Ganzpflanzen- silage	RoGPS 0	mittlere Belastung	ohne Kalkdüngung
		RoGPS 1		mittlere Kalkdüngung
		RoGPS 2		erhöhte Kalkdüngung
	Roggenschrot	RoS 0	mittlere Belastung	ohne Kalkdüngung
		RoS 1		mittlere Kalkdüngung
		RoS 2		erhöhte Kalkdüngung

Die Batch-Versuche erfolgten nach VDI 4630 Nr. 5a. Dabei wurden Probeansätze von je 5 bis 20 g Substrat (je nach TS-Gehalt) mit je 250 ml Impfschlamm in drei Parallelproben angesetzt sowie jeweils zwei Parallelproben mit Impfschlamm (Nullversuch) und der Referenz (1g mikrokristalline Zellulose und Impfschlamm). Im Versuchsjahr 2006 kamen zwei unterschiedliche Impfschlämme zum Einsatz, einer aus einer Kläranlage und der andere aus einer ausschließlich mit Rindergülle geführten Biogasanlage. Die Vergärung der Substrate erfolgte als Monosubstrat.

Die Versuche erstreckten sich über einen Zeitraum von bis zu 40 Tagen. Als Abbruchkriterium galt, dass die tägliche Biogasrate nur noch 1 % des bis zu diesem Zeitpunkt angefallenen Biogasgesamt volumens beträgt.

3.1.2 Ergebnisse

Die in den Gärtests geprüften Substrate wurden vor den Versuchen hinsichtlich wichtiger gärchemischer Inhaltsstoffe sowie den Gehalten an Arsen und Schwermetallen untersucht (Tabelle 12). Bei den verwendeten Substraten handelte es sich ausschließlich um Aufwüchse von kontaminierten Flächen. Die Arsen- und Cadmiumgehalte der Silagen lagen bei fast allen Varianten über dem zulässigen Grenzwert der Futtermittelverordnung. Besonders hohe Belastungen wiesen die Grünschnittsilage GS 2 und die Roggenganzpflanzensilage RoGPS 2 auf. Es handelte sich hierbei um Aufwüchse des Kalkdüngungsversuchs mit besonders hoher Flächenbelastung.

Batch-Gärtests laufen unter optimalen Reaktionsbedingungen ab. Die so ermittelten Biogas-Methan-Erträge sind deshalb nicht auf die Praxisverhältnisse einer Biogasanlage übertragbar. Sie ermöglichen aber eine vergleichende Wertung zwischen verschiedenen Varianten.

Tabelle 12: Gärchemische Inhaltsstoffe der Substrate (Batch-Gärtests)

Probe	pH-Wert	NH ₄	RA	RP	Rfa	Rfe	NfE	As	Cd	Pb	Cu	Cr	Ni	Zn
Silage 2005														
GS 0	5,1	3,0	7,1	14,2	26,1	2,1	50,6	2,8	2,4	13,6	7,1	0,71	0,79	113,0
GS 1	4,9	4,1	7,0	15,9	27,2	2,5	47,5	1,7	2,2	11,8	7,2	0,39	0,68	95,2
GS 2	4,7	3,0	7,9	14,9	27,3	2,4	47,5	8,7	1,7	27,2	7,3	0,43	0,71	127,0
Silage/Substrate 2006														
GS 0	4,9	1,8	9,9	13,7	34,7	2,7	39,0	2,7	1,7	11,1	11,6	0,5	0,7	80,4
GS 1	4,9	1,9	9,4	14,6	32,0	2,7	41,4	2,1	1,5	11,7	11,0	0,7	0,7	70,5
GS 2	4,6	2,9	13,0	18,0	29,0	3,1	36,8	26,1	2,0	51,0	15,1	1,0	0,9	102,4
RoGPS 0	4,3	1,2	8,1	11,8	34,8	2,0	43,3	2,1	1,6	7,3	7,9	2,7	3,2	81,1
RoGPS 1	4,4	1,2	8,5	11,7	34,6	2,0	43,3	3,4	0,9	7,1	9,3	4,0	6,1	57,2
RoGPS 2	4,2	1,3	8,4	12,1	34,1	2,1	43,2	12,1	1,9	14,8	8,3	0,5	0,9	79,1
RoS 0	-	-	1,8	11,9	n.b	n.b	-	1,1	0,4	2,5	2,1	n.b	0,1	49,1
RoS 1	-	-	2,0	11,1	n.b	n.b	-	2,3	0,3	5,1	1,8	n.b	0,1	43,1
RoS 2	-	-	1,8	12,3	n.b	n.b	-	0,6	0,4	1,4	2,2	n.b	<0,01	44,5

Im Ergebnis der Batch-Versuche betragen die Gasbildungsraten bei den Grünschnittsilagen 419 ml/g oTS, bei den Roggen-Ganzpflanzensilagen 423 ml/g oTS und bei Roggenschrot 624 ml/g oTS (Tabelle 13). Die ermittelten Gaserträge der im Versuch genutzten Grünschnitt- und Ganzpflanzensilagen liegen im Vergleich zu Literaturangaben im unteren Bereich. Nach LINKE & SCHELLE (2001) kann mit Grassilage ein Biogasertrag zwischen 0,45 - 0,7 m³/kg oTS erzielt werden. Einschlägiges Datenmaterial der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg. 2004) weist für Grassilage einen Biogasertrag von 550 – 620 m³/t oTS und 550 – 680 m³/t oTS für Roggen-GPS aus.

Tabelle 13: Gasbildung und Gasqualität der geprüften Substratvarianten (Batch-Gärtests)

Substrat	TS %	oTS % von TS	Gasbildung ¹⁾ (ml/g oTS)	CH ₄ %	CO ₂ %	H ₂ S ppm
Gärtests 2005						
GS 0	55,1	92,1	473,3	57	43	95
GS 1	80,8	92,8	437,0	56	44	99
GS 2	34,0	90,9	347,0	52	48	128
<i>Ø Grünschnittsilage</i>	<i>56,6</i>	<i>91,9</i>	<i>419,1</i>	<i>55</i>	<i>45</i>	<i>107</i>
Gärtests 2006						
GS 0	43,7	90,4	413,5	57	43	224
GS 1	41,7	92,4	411,1	58	42	178
GS 2	36,3	88,5	431,1	56	44	188
<i>Ø Grünschnittsilage</i>	<i>40,6</i>	<i>90,4</i>	<i>418,6</i>	<i>57</i>	<i>43</i>	<i>197</i>
RoGPS 0	28,6	92,6	423,6	56	44	166
RoGPS 1	30,8	93,1	426,2	58	42	153
RoGPS 2	28,0	93,2	419,6	58	42	142
<i>Ø Roggen-GPS</i>	<i>29,1</i>	<i>93,0</i>	<i>423,1</i>	<i>57</i>	<i>43</i>	<i>154</i>
RoS 0	82,9	87,8	601,6	58	42	220
RoS 1	82,7	85,7	670,0	58	42	275
RoS 2	84,7	83,9	601,5	57	43	269
<i>Ø Roggenschrot</i>	<i>83,4</i>	<i>85,8</i>	<i>624,4</i>	<i>58</i>	<i>42</i>	<i>255</i>

¹⁾ Mittelwerte aus drei Parallelproben

Bei den Batch-Gärtests konnte keine Beeinträchtigung der Gasbildung und Gasqualität durch die Arsen- und Schwermetallbelastung der Substrate beobachtet werden. Die Gasbildung verlief praktisch ohne lag-Phase (Verzögerungsphase) (Abbildung 19). Bei der Roggen-Ganzpflanzensilage zeigt sich eine relativ gleichmäßig verlaufende Gasbildung über die gesamte Versuchszeit, während bei der Grünschnittsilage und vor allem dem Roggenschrot der Großteil der Gasbildung in den ersten 10 Tagen erfolgt. Danach entwickelte sich stetig weniger Gas.

Die Biogaszusammensetzung (55 – 58 % Methan, 42 – 45 % Kohlendioxid) liegt im üblichen Bereich.

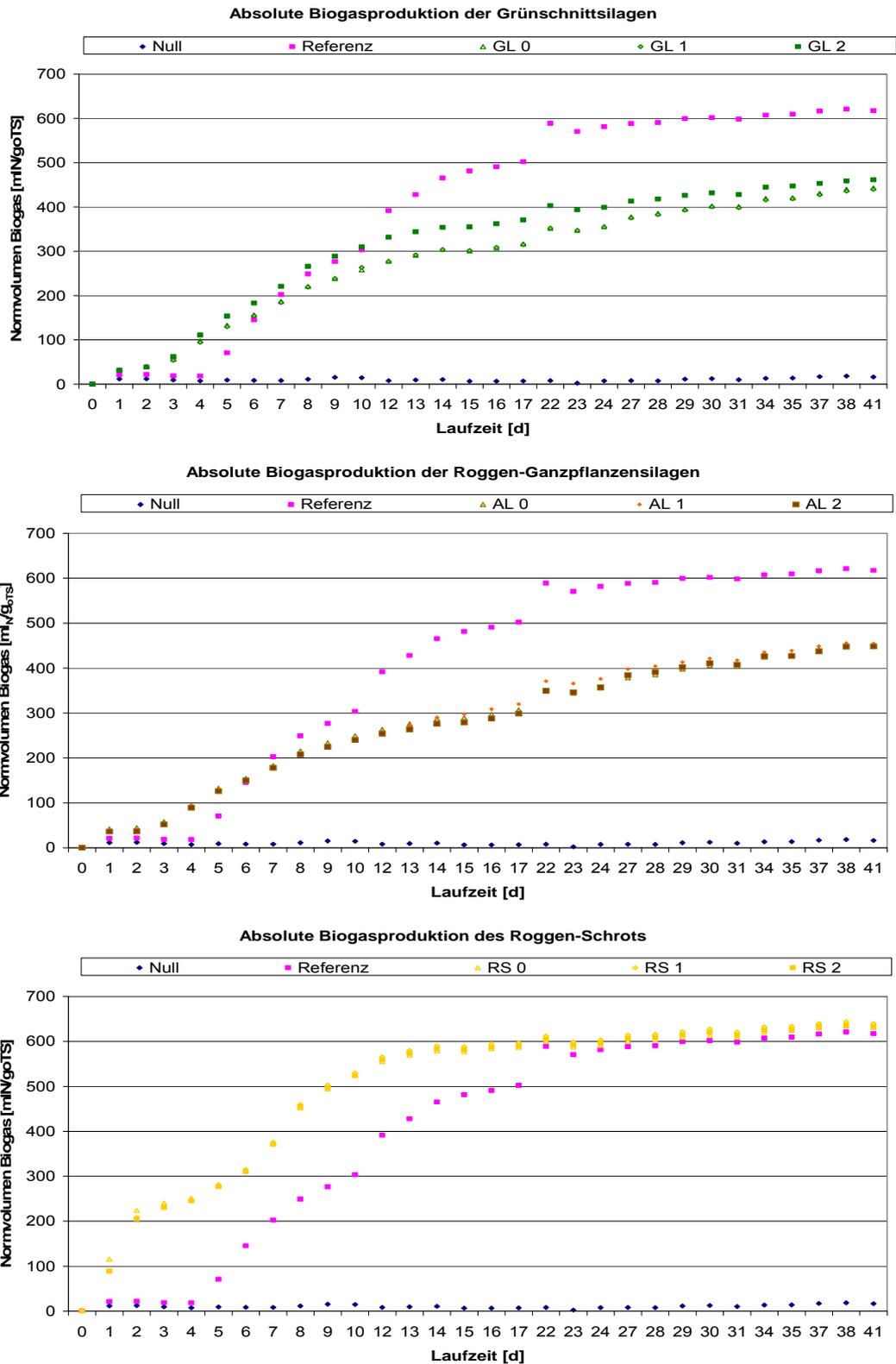


Abbildung 19: Verlauf der absoluten Biogasproduktion verschiedener Monosubstrate

Wie viel Biogas bzw. Methan sich aus den eingesetzten Substraten gewinnen lässt, wird durch die Anteile an Proteinen, Fetten und Kohlenhydraten (Rohfaser, N-freie Extraktstoffe) bestimmt. Die Roggen-Ganzpflanzensilagen (RoGPS 0, 1, 2) wiesen geringere Rohprotein- und Rohfettgehalte auf als die Grünschnittsilage. Dies ist im Allgemeinen nicht typisch für Ganzpflanzensilagen.

Die Analyse der Gärrückstände hinsichtlich der Schwermetallbelastung ist bei Batchversuchen mit geringer Substratdosierung (5 -20 g) nicht sinnvoll, da zu wenig Gärrückstand anfällt und der Anteil an Impfmateriel relativ hoch ist. Die Bilanzierung der Schwermetalle in den Gärrückständen erfolgt deshalb in größeren Versuchseinheiten (kontinuierliche Gärtests).

3.2 Kontinuierliche Gärtests

3.2.1 Material und Methodik

Im Jahr 2005 erfolgte ein erster kontinuierlicher Gärtest mit arsen- und schwermetallbelasteter Grassilage als Kosubstrat mit Steigerung der Faulraumbelastung (2, 3 und 4 kg TS/m³ FV*d) in der TU Bergakademie Freiberg.

Im zweiten Versuchsjahr wurden neben den Grassilagen der verschiedenen Kalkdüngungs- und Belastungsstufen auch die Roggenganzpflanzensilagen und das Roggenschrot geprüft. Hier wurden die angelieferten unterschiedlichen Substrate mit Rindergülle im Gemisch auf wichtige Parameter der Biogaserzeugung im Zusammenhang mit unterschiedlichen Raumbelastungen untersucht. Die Durchführung dieser Gärtests erfolgte durch die Fa. BTN Biotechnologie Nordhausen GmbH.

Nach dem Anwelken des gehäckselten Erntegutes auf dem Feld erfolgte die Silierung in 30-Liter-Fässern. Nach 90 Tagen Silierdauer wurden die Silagen entnommen und bis zum Versuchsbeginn eingefroren.

In Tabelle 14 sind die in den zwei Versuchsjahren geprüften Varianten zusammengestellt. Die Analyse der Substrate auf ihre gärchemische Zusammensetzung und den Gehalten an Arsen und Schwermetallen erfolgte im Fachbereich Landwirtschaftliches Untersuchungswesen der LfL.

Tabelle 14: Versuchsvarianten der Gärversuche

Jahr	Variante	Substratbeschreibung	Gärtest	
			Batch-Monovergärung	Kontinuierlich als Kosubstrat
2005	GS 0	Grünschnittsilage: ohne Kalkdüngung	X	RG* 50:50
2006	GS 0	Grünschnittsilage: ohne Kalkdüngung	X	70(RG):30
	GS 2	erhöhte Kalkdüngung	X	70(RG):30
	RoGPS 0	Roggen-Ganzpflanzensilage	ohne Kalkdüngung	70(RG):30
	RoGPS 2		erhöhte Kalkdüngung	70(RG):30
	RoS 0	Roggenschrot:	ohne Kalkdüngung	70(RG):30
	RoS 2		erhöhte Kalkdüngung	70(RG):30

*RG: Rindergülle

Versuchsaufbau und -ablauf des kontinuierlichen Gärtests in der TU Bergakademie Freiberg:

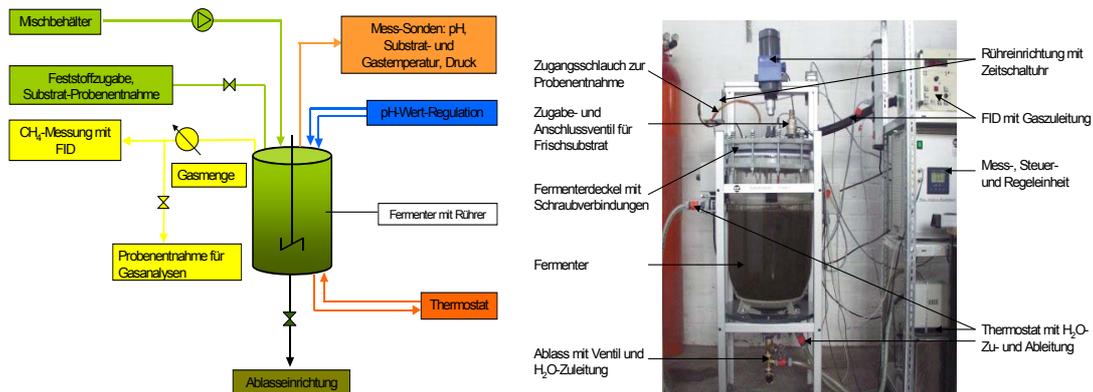


Abbildung 20: Schematischer Versuchsaufbau (FERCHAU 2004) der Versuchsanlage der TU Bergakademie Freiberg

Das Fermentervolumen betrug 23 Liter. Der Fermenter besteht aus zwei ineinander gesetzten Glaszylindern, die in einem Aluminiumgestell gelagert sind. Im Zwischenraum der Glaszylinder zirkuliert Wasser zur Temperierung des Fermenterinhalt. Die Durchmischung des Gärsubstrates wurde mittels eines am Behälterboden angeordneten Ankerrührers realisiert (Abbildung 20).

Die Beschickung mit Frischsubstrat erfolgte manuell im 24-Stunden-Takt über einen Trichter, der am Fermenterdeckel an der Zugabeöffnung befestigt ist. Um den Füllstand konstant zu halten, ist die gleiche Menge, die zugegeben werden soll, vorher aus dem Behälter über die am Boden befindliche Ablassanlage (Ventil und Schlauch) abzulassen. Über Sensoren werden die wesentlichen Prozessparameter der Anlage (pH-Wert und Temperatur des Gärsubstrates, Gasdruck) überwacht. Diese Messwerte werden viertelstündlich durch einen Datenlogger erfasst und kontrolliert.

Die entstehende Biogasmenge wurde täglich nach dem Befüllen am Milligasähler abgelesen. Zusätzlich erfolgte regelmäßig die Entnahme von Proben zur Bestimmung des H_2S -Gehaltes und der flüchtigen Fettsäuren. Die Proben für die flüchtigen Fettsäuren stammten aus dem abgelassenen ausgefaulten Substrat und wurden im Labor analysiert. Der H_2S -Gehalt wurde über die Durchleitung des Gasstromes durch eine Cadmiumacetatlösung bestimmt. Weiterhin ist der oTS-Gehalt des Frischsubstrates und des ausgefaulten Substrates (Ablauf-oTS) bestimmt worden. Den TS- und oTS-Gehalt ermittelte man gemäß DIN En 12879 bzw. DIN EN 12880.

Für die Versuchsdurchführung wurden folgende Versuchs- bzw. Prozessparameter festgelegt:

- einstufige Prozessführung und mesophiler Temperaturbereich $34\text{ °C} - 36\text{ °C}$
- tägliche Beschickung mit einem Zeitfenster von $\pm 2\text{ h}$
- pH-Wertbereich von mind. 6,5 bis max. 8,0
- Raumbelastung 2, 3 und 4 $\text{kg oTS/m}^3\text{d}$ unter Berücksichtigung der Prozessstabilität
- Versuchsdauer 90 Tage, 30 d je Raumbelastung

- Messung und Probenentnahme für die einzelnen Analysen wie folgt:
 - pH-Wert, Temperatur und Methangehalt täglich
 - TS/oTS und Fettsäuren wöchentlich
 - Schwefelwasserstoff aller zwei Wochen
 - regelmäßige Durchführung einer FOS/TAC-Bestimmung

Versuchsaufbau und -ablauf des kontinuierlichen Gärtests bei BTN Biotechnologie Nordhausen:

Für die kontinuierlichen Fermentationsuntersuchungen wurden doppelwandige Laborfermenter mit einem Arbeitsvolumen von 8 Litern eingesetzt (Abbildung 21). Die Temperierung der Reaktoren auf $37\text{ °C} \pm 1\text{ K}$ erfolgte über thermostatbeheizte Wassermäntel. Zur Durchmischung der Reaktionsmasse dienten Rührwerke, die in einem Intervall von 15 min pro Stunde mit einer Drehzahl von 50 min^{-1} arbeiteten. Die Reaktionsführung war als Rührkessel („ideale Durchmischung“) ausgeführt, mit einer einmaligen täglichen Substratzugabe. Die täglich erzeugte Biogasmenge wurde in einem Gasspeicherbeutel aufgefangen und das Volumen über einen Trommelgaszähler Typ TG 05 der Fa. Ritter gemessen. Die Bestimmung der Gasqualität auf die Parameter Methan und Schwefelwasserstoff erfolgte wöchentlich mit dem Deponiegasmonitor SSM 6000 der Fa. Schmack. Zur Auswertung nach der VDI 4630 wurde die täglichen Gasproduktion auf den Normzustand (NI = Normliter) umgerechnet.



Abbildung 21: Laborfermentieranlage mit Gasmessung und Thermostat im Labor der Fa. BTN Biotechnologie Nordhausen GmbH

Die Analytik der angelieferten Substrate sowie der Ablaufproben aus den Fermentern beinhaltet nachfolgende Parameter:

- Trockensubstanz TS nach DIN EN 12880
- organische Trockensubstanz oTS nach DIN EN 12879
- Karbonsäuren FS nach DIN 38414- S 19
- pH-Wert nach DIN 38414- S 5

- Ammonium- Stickstoff NH₄-N nach DIN 38406- E 5
- Kjeldahl-Stickstoff N_k nach DIN EN 25663

Die kontinuierlichen Versuche wurden als Langzeitversuche von mindestens 90 Tagen durchgeführt, um praxisnah den Einfluss der Raumbelastung auf die Biogasausbeute zu untersuchen. Das Anfahren des Reaktors erfolgte mit anaerob behandelter Rindergülle (Biogasanlage Hofgut Hünstein, Nohra) als Inokulum.

Die kontinuierlichen Gärversuche wurden jeweils mit einer langsamen Erhöhung der Faulraumbelastung (2, 3 und 4 kg oTS/m³FV*d) sowie als Kovergärung mit Rindergülle geführt. Nach einer Adaptionsphase begann man mit der Raumbelastung (BR) von 2 g oTS/l*d. Nach dem Ablauf von jeweils 30 Tagen Verweilzeit änderte sich die Raumbelastung und mit ihr die organische Trockensubstanz aufgrund der neuen Zugabemengen der eingesetzten Substrate. Die Mix-oTS berechnete sich aus den oTS-Werten der Rindergüllen und der Kosubstrate.

3.2.2 Ergebnisse der kontinuierlichen Gärtests

Die Gehalte wichtiger gärchemischer Inhaltsstoffe sowie an Arsen und Schwermetallen der in den kontinuierlichen Gärtest verwendeten Silagen und Rindergüllen sind in Tabelle 15 zusammengestellt. Der Vergleich mit gut vergärbare Maissilage (3 % Rohasche, 8 % Rohfaser, 50 % NfE) macht deutlich, dass die Gras- und Roggenganzpflanzensilagen durch vergleichsweise hohe Gehalte an Rohasche, die nicht an der gärchemischen Umsetzung beteiligt ist, charakterisiert sind. Ebenso ist der Anteil schwer vergärbare Rohfaser relativ hoch, leichtumsetzbare Kohlenhydrate (NfE) liegen in mittlerer Konzentration vor.

Hinsichtlich des Arsen- und Schwermetallbelastungsgrades (Cd, Pb) sind die Pflanzenproben durch eine relativ hohe bis sehr hohe Konzentration charakterisiert. Die Gehalte an den untersuchten Mikronährstoffen liegen im pflanzentypischen Bereich (FÖRSTER et al. 2008)

Tabelle 15: Gärchemische Inhaltsstoffe der Substrate (kontinuierlichen Gärtests)

Probe	pH-Wert	NH ₄	RA	RP	Rfa	Rfe	NfE	As	Cd	Pb	Cu	Cr	Ni	Zn
					% i.TS									
Silage 2005														
GS 0	5,1	3,0	7,1	14,2	26,1	2,1	50,6	2,8	2,4	13,6	7,1	0,71	0,79	113,0
RG*	7,4	0,014	-	-	-	-	-	1,4	0,8	<0,01	446,0	1,27	3,45	521,0
Silage/Substrate 2006														
GS 0	4,9	1,8	9,9	13,7	34,7	2,7	39,0	2,7	1,7	11,1	11,6	0,5	0,7	80,4
GS 2	4,6	2,9	13,0	18,0	29,0	3,1	36,8	26,1	2,0	51,0	15,1	1,0	0,9	102,4
RoGPS 0	4,3	1,2	8,1	11,8	34,8	2,0	43,3	2,1	1,6	7,3	7,9	2,7	3,2	81,1
RoGPS 2	4,2	1,3	8,4	12,1	34,1	2,1	43,2	12,1	1,9	14,8	8,3	0,5	0,9	79,1
RoS 0		-	1,8	11,9	n.b	n.b	-	1,1	0,4	2,5	2,1	n.b	0,1	49,1
RoS 2		-	1,8	12,3	n.b	n.b.	-	0,6	0,4	1,4	2,2	n.b	<0,01	44,5
RG*	7,2	0,012	-	-	-	-	-	0,07	0,2	<0,01	980	1,6	15,8	181,0

* RG = Rindergülle

leere Zellen = Ergebnisse liegen noch nicht vor

Die eingesetzten Rindergüllen wiesen hohe Belastungen an Kupfer, Zink und Nickel auf. Diese Belastungen sind um ein Vielfaches höher als die der eingesetzten Silage und des Roggenschrots von den kontaminierten Flächen.

Aus den Ergebnissen des Gärtests mit belasteter Grassilage als Kosubstrat zu Rindergülle (50 : 50) geht hervor, dass bei der mittleren Faulraumbelastung (3 kg TS/m³FV*d) die höchste Gasausbeute erzielt wird (Tabelle 16). Eine stärkere Substratkonzentration führt zu einem Rückgang des Biogasertrages je Kilogramm organische Trockensubstanz. Gleiches gilt für die Methanausbeute.

Tabelle 16: Gasertrag und -qualität bei der Vergärung von belasteter Grünschnittsilage (GL 0) mit Rindergülle (50 : 50 oTS)

Parameter	Raumbelastung [kgTS/m ³ FV*d]		
	2	3	4
Kovergärung Grünschnittsilage GL 0/Rindergülle (50 : 50)			
Methangausbeute [m ³ /kg _{oTS}]	0,317	0,325	0,272
Methangasproduktion [m ³ /m ³ FV*d]	0,634	0,975	1,088
pH-Wert	7,06	7,30	7,09
Essigsäuregehalt [mg/l]	1902	1500	1060
Propionsäuregehalt [mg/l]	455	515	548
Schwefelgehalt [ppm]	436 - 681	782 - 1222	605 - 983
FOS/TAC-Verhältnis	0,321	0,232	0,283
Gasausbeute [m ³ /kg _{oTS}]	0,589	0,609	0,501
Methangehalt [Vol.-%]	53,82	53,37	54,29
Monosubstrat Grünschnittsilage (berechnet)			
Gasausbeute [m ³ /kg _{oTS}]	0,381	0,440	0,374
Methangehalt [Vol.-%]	54,71	52,93	53,25

Der Biogasertrag der Kovergärung von belasteter Grünschnittsilage mit Rindergülle (50 : 50) betrug im Mittel der drei Faulraumbelastungen 566 m³/t oTS. Die berechnete Gasausbeute der Monovergärung der Grünschnittsilage lag mit durchschnittlich 398 m³/t oTS unter den ermittelten hohen Gaserträgen der Kovergärung mit Rindergülle.

Die erzielten Gaserträge erschienen auch im Vergleich zu den Gaserträgen der Batchversuche (419 m³/t oTS) etwas hoch. Erfahrungsgemäß werden in Batchgärtests höhere Gaserträge erzielt als in kontinuierlichen Gärtests, da die Substrate hier voll ausgegoren werden.

Die Biogasproduktion lief über den Versuchszeitraum von ca. drei Monaten stabil. Der pH-Wert lag im Versuchszeitraum mit 6,8 bis 7,7 im optimalen Bereich. Der anfangs etwas erhöhte Essigsäuregehalt nahm mit Steigerung der Raumbelastung ab. Der Propionsäuregehalt sowie das FOS/TAC-Verhältnis waren über den gesamten Versuchszeitraum ebenfalls relativ konstant. Der Schwefelgehalt lag bei der Vergärung des Substrates zwischen 436 und 1222 ppm und somit im vertretbaren Bereich.

In Abbildung 22 sind die Biogasproduktion und -ausbeute über den gesamten Versuchszeitraum mit den drei Faulraumbelastungen dargestellt. Die mittleren Werte für die Methangasausbeute unterliegen keinen großen Schwankungen. Mit der Raumbelastung $4 \text{ kg}_{\text{TS}}/\text{m}^3_{\text{FV}}\cdot\text{d}$ geht die Gas- und Methangasproduktion etwas zurück. Daraus ist zu schließen, dass die größere Substratmenge innerhalb von 24 h nicht mehr ausreichend abgebaut werden konnte.

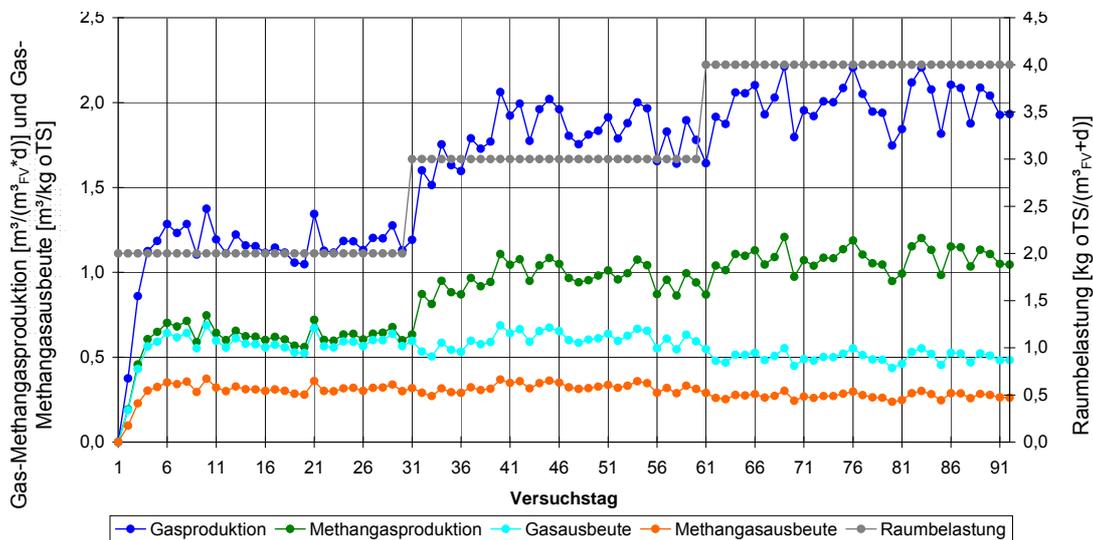


Abbildung 22: Gas-/Methangasproduktion und -ausbeute bei der Fermentation von Rindergülle mit belasteter Grünschnittsilage (50 : 50) über drei Raumbelastungen

Die Methangehalte lagen mit 53 bis 55 % im typischen Bereich von unbelasteter Grünschnittsilage. In Tabelle 17 sind die Ergebnisse der Gärversuche 2006 mit unterschiedlichen Substraten zusammengestellt. Die Untersuchungen erfolgten als Kovergärung im Verhältnis 30 % Kosubstrat und 70 % Rindergülle.

Die höchste Biogasausbeute wurde bei allen getesteten Substraten bei einer Faulraumbelastung von $3 \text{ kg TS}/\text{m}^3 \text{ FV}\cdot\text{d}$ erzielt. Hier lagen die Gaserträge der Grünschnitt- und Roggenanzpflanzensilagen bei ca. $330 - 360 \text{ m}^3/\text{t oTS}$ und den Roggenschroten bei ca. $460 - 480 \text{ m}^3/\text{t oTS}$. Der Einsatz von Roggenschrot brachte von den drei Substrattypen den höchsten Gasertrag. Mit Erhöhung der Raumbelastung auf $4 \text{ kg TS}/\text{m}^3 \text{ FV}\cdot\text{d}$ nahmen die Gaserträge ab bzw. bei der Grünschnittsilage GL 2 konnte keine Veränderung festgestellt werden. Der Methangehalt lag im Mittel der einzelnen Varianten zirka zwischen 50 % und 55 %.

Tendenziell wurden bei den mit Arsen- und Schwermetallen höher belasteten Substraten etwas niedrigere Gasausbeuten ermittelt als bei den weniger belasteten Substraten. Ein negativer Einfluss der Arsen- und Schwermetallbelastung der Gärsubstrate auf den Biogasertrag konnte jedoch statistisch nicht nachgewiesen werden.

Tabelle 17: Gasertrag und -qualität bei der kontinuierlichen Vergärung von belasteter Grünschnittsilage mit Rindergülle (30 : 70 oTS), Versuche 2006

Substrat	TS [%]	oTS [%]	Raum- belastung [kgTS/m ³ *d]	Gasausbeute [m ³ /kg _{oTS}]	Methangehalt [Vol.-%]	H ₂ S [ppm]
GL 0	48,7	43,0	2	0,36	52,0	878
			3	0,36	50,9	1057
			4	0,31	53,9	728
GL 2	52,5	48,9	2	0,29	51,2	938
			3	0,33	52,1	1447
			4	0,33	51,7	984
RoGPS 0	31,6	29,3	2	0,29	54,9	658
			3	0,33	53,4	1031
			4	0,31	54,2	925
RoGPS 2	30,4	28,7	2	0,36	52,5	1053
			3	0,36	52,2	1411
			4	0,33	52,2	1098
RoS 0	87,7	77,1	2	0,44	50,5	900
			3	0,48	50,8	1145
			4	0,46	50,0	1473
RoS 2	84,3	76,7	2	0,45	51,2	866
			3	0,46	50,7	1046
			4	0,42	50,0	1229

3.3 Gärrückstände

Die Gärrückstände von Biogasanlagen stellen auf Grund ihrer mineralischen und organischen Zusammensetzung ein wertvolles Düngemittel dar. Bezüglich der Gehalte an Arsen und bestimmten Schwermetallen sind die Grenzwerte der Düngemittelverordnung (DüMV) zu beachten (Tabelle 18 und 19).

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass die mit Grenzwerten versehenen Verbindungen der zu vergärenden Substrate mit steigender Faulraumbelastung im Fermenter auch in den Gärrückständen in zunehmender Konzentration vorzufinden sind. Die Gärrückstände des Versuchsjahres 2005 aus der Vergärung von Rindergülle mit belasteter Grünschnittsilage (50 : 50 oTS) wiesen hohe Gehalte an Cadmium und Kupfer auf und dürften nach Düngemittelverordnung nicht als Dünger in Verkehr gebracht werden (Tabelle 18). Sie können jedoch als Wirtschaftsdünger auf betriebseigenen Flächen ausgebracht werden.

Vergleicht man diese Gehalte in den Gärprodukten mit denen der Ausgangssubstrate (Tabelle 15), wird deutlich, dass der größte Teil an Kupfer aus der eingesetzten Rindergülle stammt. Lediglich der hohe Cadmiumgehalt im Gärrückstand ist auf die Belastung der Grünschnittsilage zurückzuführen.

Tabelle 18: Qualität der Gärrückstände des kontinuierlichen Gärtests mit belasteter Grünschnittsilage und Rindergülle (50 : 50) im Versuchsjahr 2005

Element	Raumbelastungen [kg _{TS} /m ³ _{FV} *d]			Grenzwert DüMV
	2	3	4	
TS [%]	3,3	6,9	7,4	
C [% i. TS]	42,7	42,8	42,2	
N [% i. OS]	0,2	0,4	0,24	
NH ₄ [% i. OS]	0,1	0,2	0,1	
N [% i. TS]	7,2	5,2	3,0	
P [% i. TS]	1,0	1,1	1,2	
K [% i. TS]	5,3	4,8	4,7	
Mg [% i. TS]	0,7	0,8	0,9	
Ca [% i. TS]	1,5	1,8	2,1	
S [% i. TS]	0,5	0,5	0,6	
As [mg/kg TS]	3,0	3,5	4,5	40
Cd [mg/kg TS]	2,2	2,6	3,1	1,5
Pb [mg/kg TS]	14,5	15,6	26,3	150
Cr [mg/kg TS]	4,6	3,9	4,7	
Cu [mg/kg TS]	404	528	771	70
Hg [mg/kg TS]	0,04	0,05	0,05	1
Ni [mg/kg TS]	4,7	6,6	9,5	80
Zn [mg/kg TS]	504	529	660	1000
TI [mg/kg TS]	0,06	0,08	0,11	1

Tabelle 19: Qualität der Gärrückstände der kontinuierlichen Gärtests mit verschiedenen arsen- und schwermetallbelasteten Substraten und Rindergülle (Verhältnis 30 : 70 oTS) bei Faulraumbelastungen von 2 und 3 kg_{TS}/m³_{FV}*d, Versuchsjahr 2006

Substrat	Gärrückstände aus Vergärung von											
	Grünschnittsilage				Roggenganzpflanzensilage				Roggenschrot			
	GL 0		GL 2		RoGPS 0		RoGPS 2		RoS 0		RoS 2	
Raumbelastg.	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
TS [%]	5,8	6,1	6,4	6,4	6,3	6,1	6,2	5,9	6,8	6,1	6,3	5,9
pH-Wert	7,9	7,5	7,9	7,4	7,9	7,7	7,6	8,0	7,9	7,3	8,0	7,4
GV [%]	76,3	79,7	77,6	80,7	77,5	79,5	77,8	78,6	77,3	77,3	76,6	79,0
N [% i. OS]	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4
NH ₄ [% i. OS]	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2
P [% i. TS]	1,2	1,0	1,1	1,0	1,4	1,2	1,1	1,3	1,2	1,0	1,1	1,0
K [% i. TS]	6,0	4,5	5,6	4,2	5,4	4,5	4,5	4,5	5,6	4,2	5,8	4,2
Mg [% i. TS]	0,8	0,7	0,7	0,7	0,9	0,8	0,7	0,8	0,9	0,8	0,8	0,7
S [% i. TS]	0,7	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6
As [% i. TS]	0,8	0,4	6,9	7,2	0,8	0,6	2,6	2,0	1,2	1,6	1,5	1,0
Cd [mg/kg TS]	1,1	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,4	1,0	1,0	1,0	0,1
Pb [mg/kg TS]	0,3	0,0	5,8	6,8	<0,01	0,0	1,6	1,6	3,7	5,3	7,5	4,2
Cr [mg/kg TS]	32,1	27,2	45,0	29,1	29,0	23,9	8,5	30,4	9,1	7,0	21,1	12,2
Cu [mg/kg TS]	149	149	157	141	190	164	220	163	197	168	162	156
Hg [mg/kg TS]	0,05	0,06	0,09	0,08	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,08	0,06	0,06
Ni [mg/kg TS]	22,4	18,8	36,3	20,9	19,3	17,2	8,9	20,1	9,3	7,3	14,1	9,8
Zn [mg/kg TS]	286	266	272	245	270	269	3	272	267	288	286	277
TI [mg/kg TS]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Bei den Gärrückständen der Versuche 2006 konnte Ähnliches beobachtet werden. Auch hier wurden bei allen Gärrückständen Grenzwertüberschreitungen nach DüMV bei den Kupfergehalten ermittelt. Jedoch lagen die Cadmiumgehalte dieser Rückstände unterhalb des zulässigen Grenzwertes, was auf den niedrigeren Anteil an Kosubstrat (70 % Rindergülle : 30 % Kosubstrat) zurückzuführen ist. Demzufolge sollte die Zumischung von belastetem Kosubstrat nicht mehr als 30 % oTS zur Gülle betragen, wenn man den Gärrückstand in Verkehr bringen möchte.

Bedenklich an den Ergebnissen ist, dass die Belastung der Rückstände mit Kupfer um ein Vielfaches höher ist als der zulässige Grenzwert. Diese Belastung ist auf die genutzten Rindergüllen zurückzuführen. Das Kupfer stammt mit hoher Wahrscheinlichkeit aus den eingesetzten Klauenbädern, welche z.B. aus Kupfersulfat bestehen. Eine separate Sammlung und Entsorgung der Klauenbäder ist unbedingt zu empfehlen.

3.4 Fazit der Biogasversuche

Bei der Vergärung von belasteter Grünschnittsilage, Roggen-Ganzpflanzensilage und belastetem Roggenschrot im diskontinuierlichen bzw. kontinuierlichen Gärtest konnte keine Beeinträchtigung der Gasbildung und Gasqualität durch die Belastung der Ausgangssubstrate mit Arsen und Schwermetallen festgestellt werden. Biogasertrag wie Methangehalt lagen im normalen Bereich.

Die Gärrückstände wiesen bei einem Verhältnis Rindergülle zu belasteter Grünschnittsilage von 50 : 50 oTS hohe Gehalte an Cadmium auf und dürften nach Düngemittelverordnung nicht in Verkehr gebracht werden. Allerdings waren alle Gärrückstände, auch die aus der Vergärung mit einem geringeren Anteil an belastetem Kosubstrat, hoch mit Kupfer befrachtet, welches aus der eingesetzten Rindergülle stammte.

Grundsätzlich bietet die Verwertung belasteter Aufwüchse zur Biogasproduktion eine Möglichkeit; kontaminierte Flächen außerhalb der Lebens- und Futtermittelproduktion sinnvoll zu nutzen. Bei einer Zuführung von 30 % des geprüften belasteten Kosubstrats in Verbindung mit einer niedrigen bis mittleren Faulraumbelastung ist eine Belastung der Gärrückstände nicht zu befürchten.

Bei der Ausbringung der Gärrückstände im eigenen Betrieb bzw. auf den belasteten Flächen dürften aber auch belastete Rückstände als Wirtschaftsdünger ausgebracht werden. Nährstoffe sowie Arsen und Schwermetalle würden dann im Kreislauf bleiben. Die Nutzung der kontaminierten Flächen zur Biogasproduktion wäre daher denkbar.

Empfehlenswert sind weitere Untersuchungen zur praktischen Umsetzung in der Region wie z.B. Anlagenauslegung im Bezug auf die vorhandenen Potenziale am Standort und möglicher Anbau von Energiepflanzen, Anlagentyp (Nass- oder Trockenfermentation) sowie wirtschaftliche Betrachtungen.

4 Untersuchungen zur energetischen Nutzung von belasteten Aufwüchsen in Kleinfeuerungsanlagen

Mit den Untersuchungen zur Verbrennung der belasteten Aufwüchse der Kalkdüngungsversuche in Kleinfeuerungsanlagen sollte eine weitere Verwertungsmöglichkeit für Aufwüchse von kontaminierten landwirtschaftlichen Flächen aufgezeigt werden.

Bei Getreidestroh, Heu oder Getreidekorn handelt es sich um Brennstoffe mit spezifischen, teilweise sehr problematischen Brennstoffeigenschaften. Die Brennstoffe weisen ein höheres Emissionspotenzial an Staub, NO_x und Chlor im Vergleich zu Holz auf und neigen auf Grund ihres niedrigen Ascheerweichungspunktes zur Verschlackung. Grundsätzlich erfordern diese Brennstoffe eine spezielle, an das Verbrennungs- und Emissionsverhalten angepasste Verbrennungstechnik.

Die halmgutartigen Brennstoffe wurden für die Nutzung in verschiedenen Kleinfeuerungsanlagen pelletiert. Hier kamen auch verschiedene Zuschlagstoffe (Kalke, Rapspresskuchen, Holzspäne) zum Einsatz mit dem Ziel, das Verbrennungsverhalten zu verbessern.

4.1 Versuchsdurchführung und Methodik

Die Pelletierung der Versuchsvarianten führte die Landwirtschaftliche Dienstleistungs- und Trocknungs GmbH in Grimma in einer Praxispelletieranlage durch. Es handelte sich dabei um eine Kollergang-Flachmatrizenpresse TL 200, ein tschechisches Fabrikat, mit starrem Kollergang und angetriebener Matrize. Der Durchsatz der Presse betrug ca. 1,0 bis 1,2 t/h.

Seit 2005 werden dort neben herkömmlichen Futtermittelpellets auch Brennstoffpellets in Dienstleistung hergestellt. Im Jahr 2006 konnten ca. 500 t Strohpellets (zumeist aus Weizenstroh) für die energetische Nutzung produziert und vermarktet werden.

Für die Herstellung der Brennstoffpellets wurden die Aufwüchse der Kalkdüngungsversuche auf belastetem Grünland und Ackerland in Hilbersdorf genutzt. Neben der Pelletierung von belastetem Grünschnitt und Roggenstroh erfolgte eine Erweiterung des Versuchsprogramms mit geeigneten Biomassearten von unbelasteten Flächen. Ergänzend zu Monopellets aus Heu, Weizenstroh, Roggenstroh, Miscanthus und Rapspresskuchen wurden auch Mischpellets (Weizenstroh-/Holzpellets, Weizenstroh-/Rapskuchenpellets) hergestellt.

Die Zumischung von Rapspresskuchen zu Weizenstroh bzw. Heu erfolgte mit dem Ziel, den Energiegehalt (Heizwert) zu erhöhen. Zudem sollte der Einfluss auf die Festigkeit untersucht und das optimale Mischungsverhältnis ermittelt werden.

Bei je einer Variante mit Heu und Weizenstroh erfolgte die Beimischung von Talkum bzw. kohlen-saurem Kalk, um das Ascheschmelzverhalten der Brennstoffe zu verbessern. In Tabelle 20 sind die verschiedenen Pelletvarianten der beiden Versuchsjahre zusammengestellt.

Tabelle 20: Brennstoffvarianten und Versuchsprogramm der Jahre 2005 und 2006

Bezeichnung	Beschreibung/Bestandteile	Untersuchungen	
		chem./physikalische	Abbrandtests
Versuchsprogramm 2005			
WSP	Weizenstroh	X	X
WSP_kl	Weizenstroh, 6 mm Pelletdurchmesser	X	
WSP_grau	Weizenstroh, "graues" Stroh (mit Feldliegezeit)	X	X
WSP+50%HS	Weizenstroh mit 50 % Holzspänen	X	X
HeuP0	Heu (GL0, mittlere Belastung)	X	X
HeuP1	Heu (GL1, mittlere Belastung)	X	X
HeuP2+5%T	Heu (GL2, hohe Belastung) mit 5 % Talkum	X	X
MiscP	Miscanthus	X	X
RkP	Rapspresskuchen	X	X
WSP+50%Rk	Weizenstroh mit 50 % Rapspresskuchen	X	X
WSP+10%Rk	Weizenstroh mit 10 % Rapspresskuchen	X	
Versuchsprogramm 2006			
WSP	Weizenstroh	X	X
WSP+5%K	Weizenstroh mit 5 % Kohlensaurem Kalk,	X	X
WSP+3%K	Weizenstroh mit 8 % Kohlensaurem Kalk,	X	
HeuP0	Heu (GL0, mittlere Belastung)	X	
HeuP2	Heu (GL2, hohe Belastung)	X	
RoSP0	Roggenstroh (AL0, mittlere Belastung)	X	X
RoSP2	Roggenstroh (AL2, hohe Belastung)	X	X
RoKorn	Roggenkorn (AL 0, mittlere Belastung)	X	X
RkP	Rapspresskuchen	X	
HolzP	DINplus-Holzpellets	X	X

Die hergestellten Pelletchargen wurden hinsichtlich ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften geprüft. Es wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- chemische Analyse verbrennungstechnisch und emissionsrelevanter Inhaltsstoffe (TS, N, K, Ca, S, Cl, Asche) sowie von Arsen und Schwermetallen,
- kalorimetrische Bestimmung des Brenn- und Heizwertes nach DIN 51 900,
- Ermittlung der Abriebfestigkeit nach DIN 51 717,
- Ermittlung des Ascheschmelzverhaltens mittels Erhitzungsmikroskops nach DIN 51730.

4.1.1 Anlagenbeschreibung und Methodik der Verbrennungsversuche

Anhand der Untersuchungsergebnisse erfolgte die Auswahl geeigneter aussichtsreicher Pelletchargen für die weitere Testung in Abbrandversuchen. Bei den Versuchen wurden das Emissionsverhalten der Brennstoffe in verschiedenen Heizkesseltypen geprüft sowie die Stoffflüsse von Arsen und Schwermetallen untersucht.

In den zwei Versuchsjahren (2005/2006) wurden fünf Heizkesseltypen auf einem Kesselprüfstand bzw. als Praxisanlagen getestet:

FERRO BIOMAT FB 23L mit Abgaswäscher

Die Durchführung der Abbrandversuche erfolgte durch das Institut für Energetik und Umwelt gGmbH in Leipzig an dem im Technikum installierten Kessel der Firma FERRO Wärmetechnik GmbH Schwarbach mit einer Nennwärmeleistung von 23 kW (Abbildung 23).



Der Kessel ist für die Nutzung von Holzpellets konzipiert. Mittels Schubsystem wird der Brennstoff aus dem Vorratsmagazin in den Brennraum transportiert. Die Zufuhr der Primärluft erfolgt durch Düsen direkt in das Glutbett, die Sekundärluft wird von der Brennraumrückseite ein-geblasen. Durch eine Drehzahlregelung des Gebläses wird die Verbrennungsluftmenge dem tatsächlichen Bedarf angepasst. Die entstehende Asche wird durch die Brennstoffnachführung automatisch in den Aschekasten geschoben. Zusätzlich wurde für die Messreihen von der Firma Ferro ein Abgaswärmetauscher in den Abgaskanal eingebaut. Mit diesem soll durch eine Besprühung des Abgases mit Wasser ein Auswaschen von Feinstaubpartikeln erreicht werden.

Abbildung 23: FERRO BIOMAT FB 23L

Baxi MULTI HEAD 25 kW

Die Abbrandversuche mit dem dänischen Kessel der Firma BAXI HS Tarm A/S (Abbildungen 24 und 25) erfolgten an einer Praxisanlage des sächsischen Vertriebspartners in Süptitz.



Die Durchführung der Emissionsmessungen übernahm die Firma AIRTEC Gesellschaft für Umweltmessungen mbH Leipzig. Der Kessel wurde für die Verbrennung von Holzpellets und Getreide sowie Holzhackschnitzel (Typ F mit Rührwerk) konzipiert. Er besteht aus Brennkammer und Vorratsmagazin. Mit einer Förderschnecke wird das Brenngut aus dem Vorratsbehälter in den Feuerraum transportiert. Die Intervalle, in denen die Schnecke arbeitet, sind regelbar entsprechend der abgeforderten Wärmeleistung.

Abbildung 24: Versuchsaufbau mit Kessel Baxi MULTI HEAD 25 kW

Die Zuführung von Verbrennungsluft erfolgt durch das eingebaute Gebläse. Die Verbrennungsluft wird durch Löcher von unten durch den Brennstoff hochgedrückt.

Die Regelung der Kesseltemperatur erfolgt 2-stufig. Der Kessel fährt bis kurz vor Erreichen der eingestellten Temperatur Volllast, dann schaltet die Regelung auf Teillast. Fällt die Temperatur wieder ab, schaltet die Regelung wieder auf Volllast. Dadurch wird eine konstante Kesseltemperatur ermöglicht.

Für den Biomassekessel waren keine Einrichtungen für die Vermeidung von Emissionen installiert.



Abbildung 25: Brennraum des Kessels (Baxi MULTI HEAD 25 kW)

Reka HKRST 30/3

Bei dem für die Abbrandversuche genutzten Heizkessel handelt es sich um einen Praxiskessel mit 32 kW (Holzpellets) Nennwärmeleistung, der in einer Heizanlage zur Wärmeversorgung eines Wohngebäudes integriert ist (Abbildung 26). Die Emissionsmessung führte das Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH Dresden durch.

Bei den Versuchen erfolgte die Zugabe des Brennstoffs in einen Vorratstrichter, der über eine Zellenradschleuse die Stoker-Schnecke des Heizkessels speist. Diese schiebt den Brennstoff in den mit Schamotteplatten ausgekleideten Brennraum ein. Im Verfahren der Rostfeuerung wird der Brennstoff thermisch umgesetzt. Die entstandenen Verbrennungsabgase gelangen in den über dem Brennraum liegenden Nachbrennraum und danach in den liegenden Wärmeübertrager. Am Abgasstutzen des Heizkessels befindet sich eine Lambda-Sonde. Über sie wird die Verbrennung geregelt. Auf Grund der fehlenden Ascheaustragsschnecke muss der Ascheraum des Heizkessels bei Volllastbetrieb in den Wintermonaten in Abständen von ca. einem Tag entleert werden.



Abbildung 26: Versuchsaufbau mit Kessel Reka HKRST 30/3, Brennraum mit Stufenrost

Guntamatik PowerCorn 30

Die Abbrandversuche erfolgten durch das Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH Dresden an einer Praxisanlage (Abbildung 27), welche zur Wärmeversorgung eines Wohn- sowie Bürogebäudes in einen landwirtschaftlichen Betrieb integriert ist. Die Kesselleistung beträgt 30 kW (Holzbrennstoff) sowie 25 kW für Getreide. Zur Verringerung des Schaltspiels speist der Heizkessel zunächst einen entsprechend großen Pufferspeicher. Damit ist es möglich, eine effiziente Nutzung der Heizenergie sowie eine Reduktion der Emissionen auf Grund der verringerten Anzahl von An- und Abfahrvorgängen zu realisieren. Weiterhin ist eine für Festbrennstoffkessel notwendige automatische Rücklaufanhebung in die Heizanlage eingebaut, welche für eine Mindestrücklauftemperatur von ca. 60°C sorgt.

Bei den Verbrennungsversuchen erfolgte die Zugabe des Versuchsbrennstoffs in einen Vorratschacht, der über eine Dosierschnecke mit anschließendem Fallschacht die Stokerschnecke des Heizkessels speist. Diese schiebt den Brennstoff in den mit Schamotteplatten ausgekleideten Brennraum ein. Im Verfahren der Rostfeuerung wird der Brennstoff thermisch umgesetzt. Den Rost bilden dabei mehrere Roststufen (Platten), die leicht überlappend angeordnet sind. Alle Rostplatten liegen angekippt in einem Winkel von etwa 15 - 20° zur Horizontalen. Die entstandenen Verbrennungsabgase gelangen in den über dem Brennraum liegenden Nachbrennraum und danach in den stehenden Wärmeübertrager mit automatischer, mechanischer Abreinigung. Am Abgasstutzen des Heizkessels befindet sich eine Lambda-Sonde. Über sie wird die Verbrennung geregelt. Der

Aschebehälter muss bei Vollastbetrieb in den Wintermonaten in Abständen von etwa drei Tagen geleert werden (brennstoffabhängig).



Abbildung 27: Guntamatik PowerCorn 30 und Blick in den Brennraum

KSM 275-18C (20 kW)

Für die 2. Messkampagne 2006/2007 stand ein Heizkessel der Fa. KSM (Dänemark) mit einer Nennleistung von 20 kW (Holz) zur Verfügung (Abbildung 28). Er ist im Technikum des Ökozentrums Nossen untergebracht und an eine Heizanlage angekoppelt.

Die Anlage kann mit allen rieselfähigen Brennmaterialien (Pellets, Getreide, kl. Hackschnitzel etc.) und sogar mit Stückholz betrieben werden. Für die Nutzung der verschiedenen Brennstoffe werden entsprechende Multistoker angeboten, z.B. für Hackschnitzel (Typ F) oder für Rapskuchen (Typ Hybrid) mit kombinierter Rapsölpresse. Die Anlage ist mit einer elektronisch logistischen Lambda-Steuerung und Rückbrandsicherung ausgerüstet.

Um eine entsprechende Wärmeabnahme zu gewährleisten, stehen ein Pufferspeicher sowie ein Warmluftgebläse zur Verfügung. Eine für Festbrennstoffkessel notwendige automatische Rücklaufanhebung ist in die Heizanlage eingebaut und hält eine Mindestrücklauftemperatur von ca. 60°C aufrecht.

Bei den Verbrennungsversuchen erfolgte die Zugabe des Versuchsbrennstoffs in einen Vorratsbehälter, welcher direkt mit dem Kessel verbunden ist. Über eine Stokerschnecke am Grund des Behälters wird der Heizkessel beschickt. Im Brennraum (ohne Rost) wird der Brennstoff thermisch umgesetzt. Dabei wird Primärluft durch zwei Düsenlanzen am Boden des Brennraums eingeblasen. Die Sekundärluft tritt durch zwei höher liegende Düsen an der Rückseite des Brennraums ein.

Die entstandenen Verbrennungsabgase gelangen in den über dem Brennraum befindlichen Wärmeübertrager. Der Heizkessel ist mit einer Lambda-Sonde ausgerüstet. Über eine entsprechende Regelung stellt sie die Führungsgröße in Form des Sauerstoff-Gehalts im Abgas bereit. Die Entaschung erfolgt durch einen Schieber am Boden des Brennraums bzw. durch die Ascheaustragschnecke im vorderen Brennraumbereich.



Abbildung 28: Versuchsaufbau mit KSM 275-18C, Blick in den Brennraum

FERRO BIOMAT FBR 90

Nach Testung verschiedener Kleinkessel mit einer Feuerungswärmeleistung zwischen 20 und 30 kW erfolgten Abbrandversuche mit dem Heizkessel der Fa. Ferro Wärmetechnik, Modell „BIOMAT FBR 90“, (90 kW Nennleistung für Holzpellets). Der Kessel wurde durch den Hersteller für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt und in den Kesselprüfstand des ILK Dresden integriert (Abbildung 29).

Für die Verbrennungsversuche wurde der Heizkessel ca. 20 % unterhalb seiner Nennlast betrieben. Dies entspricht 72 kW. Diese Leistung wird im Folgenden als Volllast bezeichnet. Bei vielfältigen Versuchen zeigte sich immer wieder, dass der Kesselbetrieb mit halmgutartigen Brennstoffen (z.B. Stroh, Heu) bei Nennlast zu einer schlechteren Verbrennungsqualität führt. Die Auslegung der Heizkessel erfolgt auf den Brennstoff Holz. Bei halmgutartigen Brennstoffen liegt der Anteil an leicht flüchtigen, brennbaren Verbindungen im Verbrennungsprozess jedoch höher als bei Holz. Dies hat zur Folge, dass der Brennraum für den Nennlastbetrieb zu klein dimensioniert wäre. Mit einer Absenkung der Kesselleistung wird dem Rechnung getragen.

Der Heizkessel arbeitet als Rostfeuerung mit liegendem Wärmeübertrager und wird über eine Stoker-Schnecke aus dem direkt angeflanschten stehenden Bunker mit dem Versuchsbrennstoff beschickt. Der Ascheaustrag aus dem Kessel erfolgt händisch. Zur Vermeidung der Festsetzung von Schlacke werden die Rostzinken zyklisch vor- und zurück bewegt. Weiterhin besitzt der Heizkessel eine Lambda-Regelung. Die Antriebe für Schnecke und Gebläse werden über die Kesselregelung angesteuert. Im Versuchsbetrieb arbeitet der Kessel im Durchlaufprinzip. Eine gewisse Wassermenge innerhalb des Kesselkreises ist immer im Umlauf, während Kaltwasser zugegeben wird und die gleiche Menge Warmwasser abfließt. Die Wassermengen lassen sich über Regelventile einstellen, so dass das gewünschte Niveau der Vorlauf-temperatur sowie die Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf-temperatur eingestellt werden kann.



Das eingesetzte Kesselsystem ist mit einem Abgaswärmenutzer (Abbildung 30b) ausgestattet. Er wird als zusätzlicher Wärmeübertrager vom Rauchgas durchströmt und wärmt das Rücklaufwasser des Heizkessels vor. Damit wird die im Rauchgas enthaltene thermische Energie in Form der Abgaswärme genutzt. Es durchströmen aber nur etwa 20 % der gesamten umlaufenden Wassermengen den Abgaswärmenutzer. Dies entspricht ca. 8 - 10 l/min. Dadurch ergeben sich folgende Temperaturniveaus:

- Wassereintrittstemperatur Abgaswärmenutzer: im Mittel 34 ... 37 °C
- Wasseraustrittstemperatur Abgaswärmenutzer: im Mittel 40 ... 44 °C

Die relativ geringe Eintrittstemperatur des Abgaswärmenutzers gegenüber einer Rücklaufftemperatur des Heizkessels von ca. 65 °C wird im Versuchsbetrieb durch eine zusätzliche Beimischung von (vorgewärmtem) Kaltwasser erreicht.

Dieser Versuchsaufbau bildet den angeschlossenen Heizkreis einer Fußbodenheizung nach. Sie erreicht Rücklaufftemperaturen etwa im Bereich der Wassereintrittstemperaturen des Abgaswärmenutzers.

Neben der Ausnutzung thermischer Energie der Abgase erzielt man mit diesem Wärmeübertrager gleichzeitig den Effekt der Abgaskondensation. Durch die niedrigen Wassertemperaturen im Abgaswärmenutzer wird der Taupunkt des Abgases von ca. 40 °C unterschritten und es findet die Kondensation von Wasserdampf aus dem Abgas statt. Die dadurch zusätzlich frei werdende Kondensationswärme wird an das Umlaufwasser abgegeben und es erfolgt eine Brennwertnutzung der Abgase.

Neben der Steigerung des Kesselwirkungsgrades soll der Abgaswärmenutzer lt. Hersteller eine zweite Funktion übernehmen. Er ist im oberen Teil mit einer Wassereindüsung ausgestattet. Damit soll das Rauchgas gewaschen und Schadstoffe wie Staub und SO₂, im Wasser gelöst und ausge tragen werden. Der Wasserablauf befindet sich an der Unterseite des Abgaswärmenutzers. Das anfallende Wasser wird gemeinsam mit dem Abgaskondensat in einen Auffangbehälter geleitet. In ihm befindet sich ein Filtervlies zur Aufreinigung des Wassers. Von diesem Behälter aus wird das Wasser über eine Pumpe wieder der Eindüsung zugeführt. Er wird von der Fa. Schröder unter dem Handelsnamen „Hydrobox“ vertrieben und enthält neben dem Filtervlies einen Spiralrohr-Wärmeübertrager zur Nutzung der thermischen Energie des ablaufenden Wassers (eingedüstes Wasser + Kondensat). Im Versuchsaufbau ist dieser Wärmeübertrager nach einem zweiten Kaltwasserzulauf des Versuchsstandes mit eingebunden, so dass er einen weiteren Anteil zur Wirkungsgraderhöhung darstellt. In der Praxis könnte die durch diesen Wärmeübertrager zur Verfügung stehende Energie zur Trinkwasservorwärmung genutzt werden.

Insgesamt tragen folgende Maßnahmen zu einer Wirkungsgraderhöhung bei und wurden bei den durchgeführten Versuchen im direkten Kesselwirkungsgrad mit bilanziert:

- Nutzung der thermischen Energie der Abgase durch den Abgaswärmenutzer
- Brennwertnutzung (Nutzung der Kondensationswärme im Abgas durch Unterschreitung des Abgastaupunktes verbunden mit einer Eindüsung von Wasser) im Abgaswärmenutzer
- Nutzung der Restwärme des für die Abgaswäsche umlaufenden Wassers.

Der Heizkessel wurde von der Fa. Ferro selbst in Betrieb genommen. Nach ersten Versuchen wurde eine veränderte Sekundärluftzuführung nachgerüstet, da die festgestellte Kesselleistung beim Betrieb mit Strohpellets nur im Bereich von ca. 60 kW lag.

Versuchsdurchführung der Abbrandversuche

Alle Verbrennungsversuche begannen erst nach einer Einfahrphase des Heizkessels, um die entsprechende Betriebstemperatur sowie einen möglichst stationären Zustand der Verbrennung herzustellen.

Bei den Versuchen erfolgte die Erfassung der Emissionen im kontinuierlichen Kesselbetrieb nach 1. BImSchV bezogen auf einen Volumengehalt an Sauerstoff von 13 %. Mit der Durchführung der Abbrandversuche wurden die oben genannten Institutionen bzw. Messstellen gemäß § 26 Bundes-Immissionsschutzgesetz beauftragt.

Es wurden folgende Messkomponenten erfasst:

Kontinuierliche Erfassung

- Stickstoffoxide (NO_x), gemessen als Stickstoffdioxid
- Kohlenmonoxid (CO)
- Kohlendioxid (CO₂)
- Schwefeloxide (SO_x), gemessen als Schwefeldioxid
- Organische Kohlenwasserstoffe, angegeben als Gesamt-C

Diskontinuierliche Erfassung

- gasförmige anorganische Chlorverbindungen, angegeben als Chlorwasserstoff (HCL)
- Gesamtstaub
- Feinstaub (bei ausgewählten Chargen)

Die Gesamtmessdauer für die kontinuierliche Erfassung der gasförmigen Schadstoffe betrug pro Brennstoffvariante mindestens 3 h. Die Bewertung der kontinuierlich erfassten Emissionen erfolgte als Viertelstunden-Mittelwerte mit 13 Vol% Sauerstoff als Bezugswert. Die Bestimmung des Gesamtstaubgehaltes im Rauchgas erfolgte bei dem Ferro BIOMAT 23L durch eine, beim Baxi MULTI HEAD durch drei und bei den anderen Kesseltypen durch jeweils vier Messungen.

In Tabelle 21 ist das Messprogramm der zwei Versuchsjahre mit den jeweiligen Kesseltypen und Brennstoffen zusammengestellt.

Tabelle 21: Messprogramm zur Durchführung von Abbrandversuchen mit verschiedenen Brennstoffen

Nr.	Saison:	Winter 2005/2006			Winter 2006/2007		
	Kesseltyp:	Ferro BIOMAT FB 23L	Reka HKRST 30/3	Baxi MULTI HEAD 25 kW	Guntamatic PowerCorn 30	KSM 275-18 C (20 kW)	Ferro BIOMAT FBR 90
Chargen 2005							
WSP							
WSP_grau							
WSP+50%HS							
HeuP0							
HeuP2+5%T							
HeuP1							
RkP							
WSP+50%Rk							
MiscP							
Chargen 2006							
WSP							
WSP+5%K							
RoSP0							
RoSP2							
RoKorn							
HolzP							

Auf Grund des milden Winters 2006/2007 gestaltete sich die Durchführung der Abbrandversuche, die im Vollastbetrieb zu fahren sind, schwierig. Trotz vielseitiger Maßnahmen zur Erhöhung der Wärmeabnahme konnte der Betrieb der Heizkessel (Guntamatic PowerCorn 30, KSM-Kessel) im Nennlastbereich nicht vollständig erzielt werden.

4.2 Ergebnisse der chemischen und physikalischen Untersuchungen zur Brennstoffqualität

Die Pelletqualität, d.h. die Gehalte an emissionsrelevanten Inhaltstoffen, die Festigkeit der Pellets sowie das Abbrandverhalten bestimmen die Marktfähigkeit der neuen Biobrennstoffe. Für den Handel mit Holzpellets bestehen weltweit verschiedene Normen für die Brennstoffqualität. Bei halmgutartigen Brennstoffen wird derzeit an einer Europäischen Klassifizierungsnorm gearbeitet, um den Handel mit diesen z. T. sehr unterschiedlichen Brennstoffcharakteren zu ermöglichen.

In Tabelle 22 sind die Gehalte an emissionsrelevanten Inhaltsstoffen und Schwermetallen der hergestellten Brennstoffpellets sowie des Roggenkorns zusammengestellt. Die verschiedene Messgenauigkeit bei einigen Parametern zwischen den beiden Versuchsjahren ist auf die Beauftragung unterschiedlicher Labore zurückzuführen.

Gehalte an emissionsrelevanten Inhaltsstoffen

Die NO_x- und SO_x-Emissionen beim Abbrand werden vor allem durch die Gehalte an Stickstoff und Schwefel in den genutzten Brennstoffen bestimmt. Daher besitzen die N-reichen Rapskuchenpellets mit 5,5 - 5,7 % Stickstoff in der TS von den aufgeführten Brennstoffen das höchste NO_x-Potenzial. Bei den Heupellets (1,6 – 2,3 % N) sowie bei Roggenkorn (1,9 % N) ist ebenfalls mit erhöhten Stickoxidemissionen zu rechnen. Die Pellets aus Getreidestroh (Weizen, Roggen) und Miscanthus weisen dagegen niedrige Stickstoffgehalte (0,6 - 0,7 % N) auf.

Im NO_x-Bildungspotenzial ergibt sich somit bei den verschiedenen Biomassen folgende aufsteigende Rangfolge:

Holz << Roggenstroh, Weizenstroh, Miscanthus < Roggenkorn, Heu << Rapskuchen

In Biomassebrennstoffen ist der Gehalt an Schwefel niedrig und somit von untergeordneter Bedeutung bei der Bewertung des Emissionsbildungspotenzials. Fossile Brennstoffe (Stein-, Braunkohlen) weisen um ein Vielfaches höhere Gehalte an Schwefel auf und sind hier kritischer zu bewerten. Innerhalb der Biobrennstoffe weist Holz das geringste und Rapskuchen das höchste SO_x-Bildungspotenzial auf. Die halmgutartigen Brennstoffe nehmen eine mittlere Stellung ein. Im Vergleich der Biomassen stellt sich folgendes SO_x-Bildungspotenzial dar:

Holz << Roggenstroh, Weizenstroh, Miscanthus, Roggenkorn, < Heu << Rapskuchen

Die Gehalte an Chlor in den landwirtschaftlichen Biomassen, welche vor allem bedingt durch Kulturmaßnahmen (Kaliumchloriddüngung) von den Pflanzen aufgenommen werden, sind bei der Nutzung als Brennstoffe problematisch. Bei der Verbrennung werden die Chlorverbindungen weitgehend vollständig als Chlorwasserstoff in das Rauchgas überführt. Die Bedeutung dieser Verbindung liegt einerseits in deren Einfluss auf die PCDD/F-Bildung und andererseits in der korrosiven Wirkung.

Naturbelassenes Holz sowie Rapskuchen weisen im Vergleich zu den anderen Biomassen geringe Chlorgehalte auf. Das HCl-Bildungspotenzial der verschiedenen Biomassen wird an Hand des Chlorgehaltes in der Trockensubstanz wie folgt abgeschätzt:

Holz < Rapskuchen < Roggenstroh, Weizenstroh, Miscanthus, Roggenkorn, Heu
(abhängig von Bewirtschaftungsintensität, Kaliumdüngungstyp)

Tabelle 22: Emissions- und verbrennungstechnisch relevante Inhaltsstoffe in den verschiedenen Brennstoffchargen

Chargen	N %	S %	Cl %	K %	Ca %	As mg/kg	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Hg mg/kg	Pb mg/kg	Zn mg/kg	EOX (wf) mg/kg
Chargen 2005													
WSP	0,6	0,09	0,09	1,58	0,44	1	< 0,5	< 5	< 3	< 0,05	< 5	16	1,3
WSP_kl	0,7	0,12	0,14	1,17	0,34	< 0,8	< 0,5	< 5	< 3	< 0,05	8	23	1,8
WSP_grau	1,0	0,12	0,15	1,16	0,42	< 0,8	< 0,5	< 5	5	< 0,05	8	29	1,3
WSP+50%HS	1,4	0,18	0,09	1,32	0,41	3	0,5	< 5	5	< 0,05	20	50	1,3
HeuP0	1,7	0,28	0,13	1,57	0,56	7	1,9	< 5	11	< 0,05	45	127	1,3
HeuP1	1,6	0,25	0,09	1,54	0,60	5	2,0	< 5	8	< 0,05	35	98	< 1
HeuP+5%T	1,6	0,26	0,15	1,60	0,70	22	2,2	45	9	< 0,05	67	113	< 1
RkP	5,5	0,66	0,002	1,46	0,61	< 0,8	< 0,5	< 5	4	< 0,05	< 5	62	1,1
WSP+50%Rk	3,5	0,41	0,05	1,55	0,55	< 0,8	< 0,5	< 5	3	< 0,05	< 5	44	1,6
WSP+10%Rk	2,1	0,25	0,05	0,84	0,45	< 0,8	< 0,5	< 5	< 3	< 0,05	6	33	1,2
MiscP ₁	0,3	0,09	0,17	0,83	0,17	< 0,8	< 0,5	< 5	< 3	< 0,05	7	26	< 1
Chargen 2006													
WSP	0,7	0,14	n.b.	1,98	0,51	0,0	0,1	0,5	2	0,04	0	10	0,01
WSP+5%K	0,6	0,15	n.b.	1,99	2,60	10	0,2	1,7	3	0,05	12	48	2,3
WSP+3%K	0,8	0,15	n.b.	1,73	1,68	0,7	0,1	0,4	3	0,05	0	30	1,9
HeuP0	2,3	0,21	n.b.	1,19	0,93	8	1,8	1,8	10	0,07	35	112	0,01
HeuP2	2,3	0,26	n.b.	1,38	0,91	34	2,0	0,9	13	0,08	67	154	0,01
RoSP0	0,7	0,10	n.b.	0,43	0,44	27	2,0	0,2	6	0,08	44	84	0,01
RoSP2	0,7	0,09	n.b.	0,41	0,37	52	2,9	1,0	7	0,08	89	121	0,02
RoKorn	1,9	0,13	0,06	0,40	0,06	1,05	0,4	n.b.	2	0,00	2	49	n.b.
RkP	5,7	0,68	0,02	1,17	0,69	< 0,8	< 0,5	< 5	5	< 0,05	< 5	79	< 1
HolzP	< 0,05	0,03	< 0,002	0,07	0,10	< 0,8	< 0,5	< 5	< 3	< 0,05	< 5	13	< 1
DIN 51 731	< 0,3	< 0,08	< 0,03	-	-	< 0,8	< 0,5	< 8	< 5	< 0,05	< 10	< 100	< 3
ÖNORM	< 0,3	< 0,04	< 0,02	-	-								

Charge nicht in Abbrandversuchen getestet

Ascheschmelzverhalten

Die Gehalte an Kalium und Kalzium haben Einfluss auf das Ascheschmelzverhalten. Hohe Kaliumgehalte im Brennstoff führen zu niedrigen Ascheerweichungstemperaturen, so dass die Aschen schon bei niedrigen Ausbrandtemperaturen zur Verschlackung und Versinterung neigen. Dies kann zur Störung des Ascheaustrags und des gesamten Verbrennungsprozesses führen. Kalzium wirkt der Ascheerweichung entgegen, ebenso Magnesium und Silizium. Diese Elemente besitzen im Gegensatz zu den Alkalimetallen (Kalium, Natrium) einen höheren Schmelzpunkt.

Von den in Tabelle 23 aufgeführten Biomassen weisen Holzpellets den niedrigsten Kaliumgehalt auf. Die K-Gehalte von Roggenstroh lagen deutlich unter denen von Weizenstroh, Heu, Rapspresskuchen und Miscanthus. Roggenkorn wies ebenfalls einen vergleichsweise niedrigen K-Gehalt auf, jedoch war auch der Gehalt an Kalzium gering. In Tabelle 23 sind das Verhältnis von Kalium zu Kalzium und die im Labor mittels Erhitzungsmikroskop erfassten Temperaturbereiche des Ascheschmelzverhaltens ausgewählter Biobrennstoffe zusammengestellt.

Tabelle 23: Mittleres Kalium/Kalzium-Verhältnis und durchschnittliche Temperaturbereiche der Aschenschmelze

Biomasseart	N*	Verhältnis K : Ca	Sinter- temperatur [°C]	Erweichungs- temperatur [°C]	Sphärisch- temperatur [°C]	Halbkugel- temperatur [°C]	Fließ- temperatur [°C]
Roggenkorn	1	1 : 0,1	810	860	890	920	1190
Miscanthus	1	1 : 0,2	820	880	950	1020	1060
Weizenstroh	4	1 : 0,3	870	963	1020	1053	1183
Weizenstroh „grau“	1	1 : 0,4	860	930	1010	1090	1210
Rapskuchen	2	1 : 0,5	865	1005	1115	1130	1190
Heu	4	1 : 0,5	985	1090	1163	1188	1230
Roggenstroh	2	1 : 1,0	1000	1115	1200	1260	1395
Holz (DIN-Pellets)	1	1 : 1,5	1090	1170	1360	1450	1480

*Anzahl der Pelletchargen zur Mittelwertbildung

Legende

	800 - 1000 °C
	> 1000 - 1200 °C
	> 1200 - 1400 °C
	> 1400 °C

Holzpellets weisen das günstigste K/Ca-Verhältnis sowie die höchste Erweichungs- und Sphärischtemperatur auf. Der Zusammenhang zwischen dem K/Ca-Verhältnis und dem Ascheschmelzverhalten kann an Hand der aufgezeigten Biomassen einwandfrei nachgewiesen werden. Mit höherem Kalziumanteil und steigendem K/Ca-Verhältnis (größer 1) in der Biomasse steigen die Temperaturbereiche der Ascheschmelze. Das K/Ca-Verhältnis ist ein geeigneter Parameter, um das Ascheschmelzverhalten von Brennstoffen abzuschätzen. Die Höhe des Kaliumgehaltes im Brennstoff ist als alleiniges Kriterium zur Abschätzung des Ascheschmelzverhaltens ungeeignet. Dies zeigt sich besonders beim Roggenkorn. Trotz geringem Kaliumgehalt von 0,4 % beginnt die Asche schon bei

niedrigen Temperaturen zu schmelzen. Dies ist auf den ebenfalls sehr geringen Kalziumgehalt von 0,06 % und dem daraus resultierenden ungünstigen K/Ca-Verhältnis zurückzuführen.

Bei Roggenstroh wurde ein günstigeres K/Ca-Verhältnis und Ascheschmelzverhalten ermittelt als bei Weizenstroh.

Die Neigung zur Verschlackung bei der Verbrennung der verschiedenen Biomassen kann in aufsteigender Linie wie folgt abgeschätzt werden:

Holz << Roggenstroh < Heu, Rapskuchen, Weizenstroh < Miscanthus < Roggenkorn

Um das Ascheschmelzverhalten von halmgutartiger Biomasse zu verbessern und die Erweichungstemperatur zu erhöhen, erfolgte die Herstellung von Brennstoffpellets mit Zumischung verschiedener Kalke. Zum einen wurden Heupellets unter Beigabe von 5 % Talkum hergestellt (HeuP+5%T) und zum anderen Kohlensaurer Kalk (Düngemittel) in prozentualen Anteilen von 3 und 5 % zu Weizenstroh beigemischt (WSP+5%K, WSP+3%K).

Bei Talkum handelt es sich um ein plättchenförmiges Magnesium-Silikat-Hydrat $Mg_3(OH_2)Si_4O_{10}$. Kohlensaurer Kalk wird durch Brechen oder Mahlen aus Kalkstein hergestellt und enthält 95 % $CaCO_3$ und einen geringen Anteil $MgCO_3$. Durch die Beimischung von 5 % Talkum zum Heu konnte der Erweichungspunkt um 80 °C erhöht werden. Der Temperaturbereich von Holzpellets wurde nicht erreicht (Abbildung 30). Das K/Ca-Verhältnis betrug bei den Heupellets mit 5 % Talkum ca. 1,1 und kam somit dem der Holzpellets (1,5) näher.

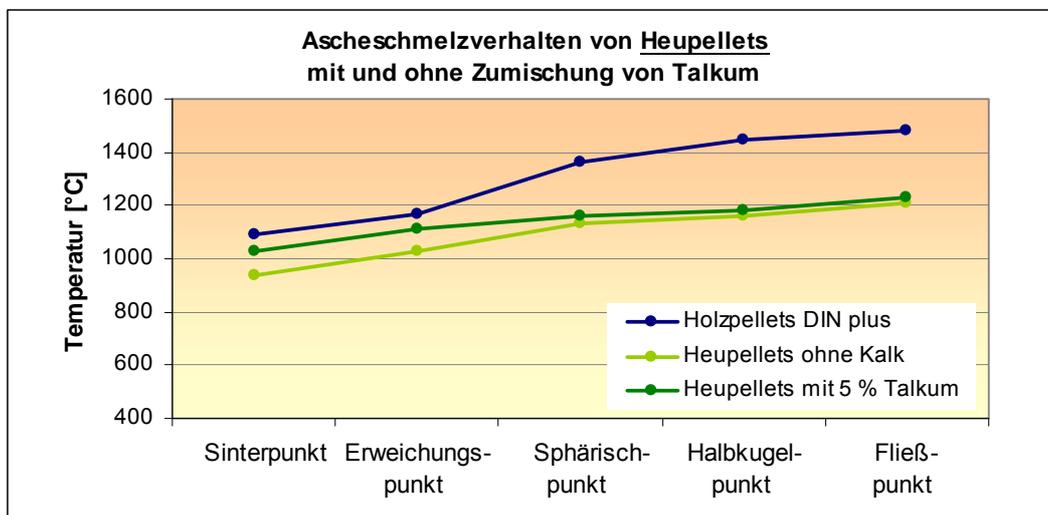


Abbildung 30: Ascheschmelzverhalten von Heupellets mit und ohne Zumischung von Talkum im Vergleich zu Holzpellets

Mit Zumischung von 3 bis 5 % kohlensaurem Kalk zu Weizenstroh konnte eine noch deutlichere Anhebung des Erweichungspunktes von 160 bzw. 360 °C auf das Niveau von Holzpellets erreicht werden (Abbildung 31). Im weiteren Verlauf der Schmelze (Sphärischpunkt bis Fließpunkt) lagen die Strohpellets mit 5 % Kalkzumischung nur wenig unter dem Temperaturbereich von Holzpellets.

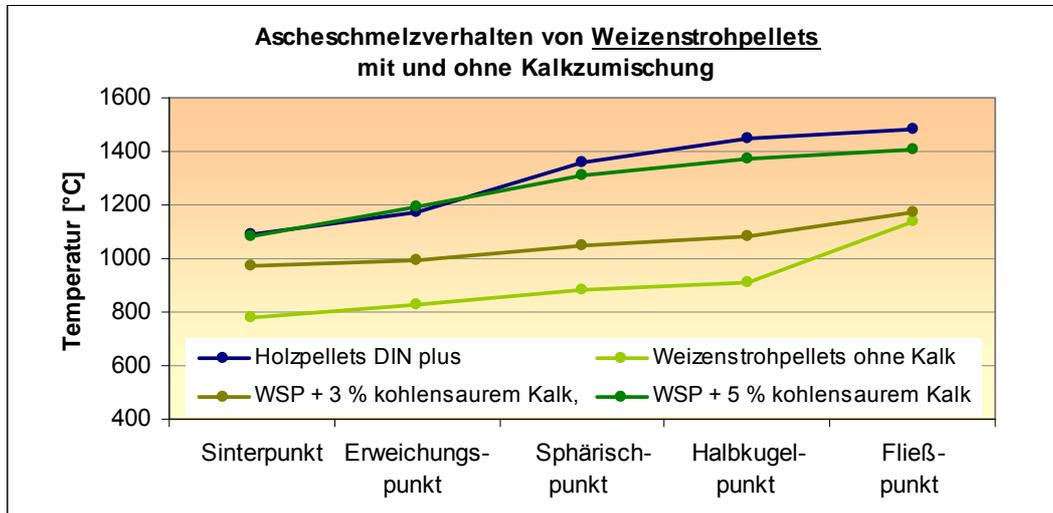


Abbildung 31: Ascheschmelzverhalten von Weizenstrohpellets mit und ohne Kalkzumischung im Vergleich zu Holzpellets

Die Zumischung von 5 % kohlensaurem Kalk zeigte eine effektivere Erhöhung des Ascheschmelzverhaltens als Talkum, was auf den höheren Ascheschmelzpunkt von Kalziumoxiden im Vergleich zu Siliziumoxiden zurückzuführen ist. Durch die Zumischung von kohlensaurem Kalk (5 %) wurde das K/Ca-Verhältnis der Weizenstrohpellets von 0,3 (ohne Kalk) auf 1,3 erhöht.

Feuchte, Aschegehalt und Heizwert

Der Feuchtegehalt der Pellets ist vom Wassergehalt des Ausgangsmaterials abhängig. Der optimale Feuchtegehalt des Ausgangsmaterials für die Pelletierung liegt bei 12 %.

Fast alle Pelletchargen, außer HeuP2 und Roggenkorn, liegen unter 10 % Wasser, wie es die strenge österreichische NORM für Holzpellets vorgibt (Tabelle 24).

Holzpellets weisen mit 5,5 % den geringsten Wassergehalt auf. Der Aschegehalt liegt bei Holzpellets ebenfalls deutlich geringer als bei den Halmgutpellets. Dies ist bei der Konzeption des Ascheausstragssystems der Heizanlage entsprechend zu berücksichtigen.

Der Aschegehalt von Heu lag mit 8,3 – 10,2 % deutlich über den anderen Brennstoffchargen. Zwischen den Getreidestrohart (Winterweizen, Winterroggen) bestanden keine eindeutigen Unterschiede im Aschegehalt und Heizwert. Der Aschegehalt von Roggenkorn ist geringer als von Stroh, jedoch liegt auch der Heizwert niedriger.

Die Zumischung von 50 % Holzspänen zum Weizenstroh brachte eine geringe Anhebung des Heizwertes und nur eine geringe Senkung des Aschegehaltes. Dies weist darauf hin, dass der prozentuale Mengenanteil bei der Zumischung der Holzspäne wahrscheinlich nicht eingehalten wurde. Miscanthus weist einen geringeren Aschegehalt und höheren Heizwert auf als die anderen geprüften Halmgüter.

Tabelle 24: Wassergehalt, Aschegehalt und Heizwert der Brennstoffchargen

Brennstoff	Wasser %	Asche (550°C) %	Heizwert Hu (wf) MJ/kg
Chargen 2005			
WSP	7,7	5,7	17,5
WSP_kl	7,0	7,4	17,2
WSP_grau	7,6	6,6	17,4
WSP+50%HS	8,1	6,6	17,7
HeuP0	8,5	8,7	17,4
HeuP1	8,6	8,5	17,3
HeuP2+5%T	7,9	12,6	16,3
MiscP	6,4	3,1	18,2
RkP	8,2	6,8	20,4
WSP+50%Rk	7,5	6,2	19,2
WSP+10%Rk	7,1	6,8	18,6
Chargen 2006			
WSP	9,4	6,3	17,2
WSP+5%K	6,8	12,4	15,8
WSP+3%K	8,2	8,7	16,9
HeuP0	9,8	8,3	17,4
HeuP2	10,2	10,2	17,3
RoSP0	8,6	5,7	17,5
RoSP2	8,8	6,4	17,3
RoKorn	15,9	1,9	17,0
RkP	8,0	6,5	20,9
HolzP	5,5	0,4	19,0
DIN 51 731	12	1,5	17,5 -19,5
ÖNORM	< 10,0	< 0,50*	≥ 18,0

*Asche bei 815 °C

Der proteinreiche Rapskuchen unterscheidet sich im Aschegehalt nicht von Heu oder Getreidestroh, weist aber auf Grund seines Rohfettgehaltes (12 – 15 %) einen deutlich höheren Heizwert auf als Halmgut- oder Holzpellets. Durch Zumischung von 10 bis 50 % Rapskuchen kann der Heizwert von Stroh- oder Heupellets deutlich erhöht werden.

Die Zumischung von Talkum sowie kohlensaurem Kalk bewirkte einen Anstieg des Aschegehaltes um den prozentualen Anteil der Kalkzumischung und eine Senkung des Heizwertes. Eine Beimischung von 5 % Kalk führte im Vergleich zu den unbehandelten Stroh- und Heupelletvarianten zu einer Minderung des Heizwertes um 1- 1,4 MJ/kg.

Rohdichte und Abriebfestigkeit

Die Pelletchargen des Versuchsjahres 2006 wiesen höhere Rohdichten und auch eine höhere Abriebfestigkeit auf als die Chargen des Jahres 2005 (Tabelle 25). Das ist neben den unterschiedli-

chen Feuchtegehalten und Stoffeigenschaften der Ausgangsprodukte vor allem auf die Verbesserung der Einstellung der Press- und Verfahrensparameter bei der Pelletierung zurückzuführen.

Tabelle 25: Rohdichte und Abrieb der Brennstoffchargen

Brennstoff	Rohdichte [kg/dm ³]	Abrieb [%]
Chargen 2005		
WSP	1,14	9,4
WSP_kl	1,22	3,0
WSP_grau	1,12	1,9
WSP+50%HS	1,17	3,8
HeuP0	1,17	3,8
HeuP1	1,21	2,2
HeuP+5%T	1,19	2,6
MiscP	1,11	2,5
RkP	1,11	15,6
WSP+50%Rk	0,92	22,2
WSP+10%Rk	1,00	3,7
Chargen 2006		
WSP	1,27	1,5
WSP+5%K	1,39	1,7
WSP+8%K	1,28	1,8
HeuP0	1,31	0,9
HeuP2	1,31	1,3
RoSP0	1,30	5,6
RoSP2	1,28	4,4
RoKorn	1,11	0,0
RkP	1,13	6,3
HolzP	1,19	0,8
DIN 51 731	1,0 bis 1,4	-
ÖNORM	≥ 1,12	≤ 2,3

Bei den Weizenstrohpellets des Versuchsjahres 2005 wurde eine sehr geringe Pelletfestigkeit mit einem Abrieb von > 9 % ermittelt. Dies ist auf die Strohqualität zurückzuführen. Das Weizenstroh war sofort nach dem Dreschen vom Feld geborgen worden und wies eine sehr glatte goldgelbe Oberfläche auf. Das „graue“ Stroh (leichte Rotte durch mehrtägige Feldliegezeit) ließ sich im Vergleich dazu besser und fester pelletieren.

Die Pelletierung von Heupellets stellt kein Problem dar und ist aus der Futtermittelherstellung vielfach erprobt. Auf Grund der weniger starren Struktur lässt sich Heu im Allgemeinen leicht pelletieren. Im Vergleich dazu erwies sich die Herstellung von Miscanthuspellets an den Kollergangflachmatrizenpressen als schwierig.

Rapspresskuchen ließ sich leicht pelletieren. Auf Grund des Restölgehaltes wird der Reibungswiderstand herabgesetzt. Die Pellets weisen aber auf Grund des Fettgehaltes nur eine geringe Festigkeit auf und lassen sich leicht in der Hand zerdrücken. Die unterschiedliche Abriebfestigkeit der Rapskuchenpellets zwischen den zwei Versuchsjahren ist auf die verschiedenen Rohfettgehalte der Presskuchen (2005: 14,6 %; 2006: 12,5 %) zurückzuführen.

Besonders schlecht war die Pelletqualität bei den Pellets aus Weizenstroh mit 50 % Rapspresskuchenanteil. Hier kam nur eine geringe Bindung zu Stande. Durch schrittweise Absenkung des Rapskuchenanteils konnte die Pelletqualität verbessert werden. Um eine ausreichende Festigkeit zu gewährleisten, sollte der Mischungsanteil von 10 % Rapskuchen nicht überschritten werden. Bei höheren Anteilen muss ein zusätzliches Bindemittel eingesetzt werden.

Das Roggenkorn wies keinen Abrieb im Untersuchungstest auf.

4.3 Abbrand- und Emissionsverhalten in unterschiedlichen Kleinkesseln beim Einsatz verschiedener Brennstoffpelletchargen

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Abbrandversuche mit den verschiedenen Brennstoffchargen (siehe Tabelle 21) in den unterschiedlichen Kleinkesseln zusammengestellt. Die Einordnung der erfassten Emissionen erfolgt für die Kleinfeuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung < 100 kW an Hand der derzeit gültigen 1. BImSchV. Danach werden Emissionsgrenzen nur für Kohlenmonoxid und staubförmige Emissionen gesetzlich vorgegeben:

Grenzwerte der 1. BImSchV für Kleinfeuerungsanlagen < 100 kW (bezogen auf 13 % O₂)

- 4000 mg CO /Nm³
- 150 mg Staub/Nm³

Derzeit befindet sich die 1. BImSchV in der Novellierung, welche eine drastische Verschärfung der Grenzwerte vorsehen wird. Die Zulassung von Getreidekorn als Brennstoff im Landwirtschaftsbe- reich ist in der neuen Verordnung vorgesehen. Derzeit besteht bezüglich dieser Neuregelung eine große Unsicherheit bei bestehenden und potenziellen Kesselbetreibern.

4.3.1 Ergebnisse der Abbrandversuche mit dem Pelletkessel FERRO BIOMAT 23 L

Der Pelletkessel FERRO BIOMAT 23 L wurde schon in früheren Untersuchungen mit Halmgutpellets genutzt und erzielte zum Teil gute Ergebnisse beim Abbrand und den Emissionen. Jedoch konnte auch in diesem Kessel der Grenzwert der 1. BImSchV für die staubförmigen Emissionen beim Abbrand von Stroh- und Heupellets kaum eingehalten werden. Aus diesem Grund wurde der Kessel von der Firma FERRO mit einem Abgaswärmetauscher/Abgaswäscher ausgerüstet. Hierdurch sollten die Emissionen reduziert werden.

Die Abbrandversuche liefen störungsfrei. Die Pellets wurden durch das Schubsystem kontinuierlich in den Feuerraum eingetragen und verbrannten mit starker Flamme.

In Abbildung 32 sind die Emissionen an Kohlenmonoxid, Stickoxid und Staub der verschiedenen Brennstoffchargen im Kessel FERRO BIOMAT 23 L (23 kW) mit Abgaswäsche dargestellt. Die gemessenen CO-Werte liegen deutlich unter dem Grenzwert von 4000 mg/Nm³ der 1. BImSchV sowie unter dem der novellierten Verordnung von 1000 mg/Nm³. Sie weisen jedoch zum Teil eine große Schwankungsbreite auf. Die höheren CO-Emissionen bei der Verbrennung der Heupellets (HeuP1) und der Rapspresskuchenpellets (RkP) sind auf Luftmangel bei der automatischen Be-

schickung der Anlage zurückzuführen. Entsprechend der Regelungscharakteristik der Feuerungsanlage wird beim Absinken des O₂-Anteils im Abgas (gemessen am Kamineintritt) unter 9,5 Vol.-% die Gebläseleistung automatisch gesteigert. In Phasen hoher Beschickung reicht die aktuelle Gebläseleistung nicht aus, um den erhöhten Luftbedarf bereitzustellen. In Folge kommt es zu den Erhöhungen des CO-Wertes.

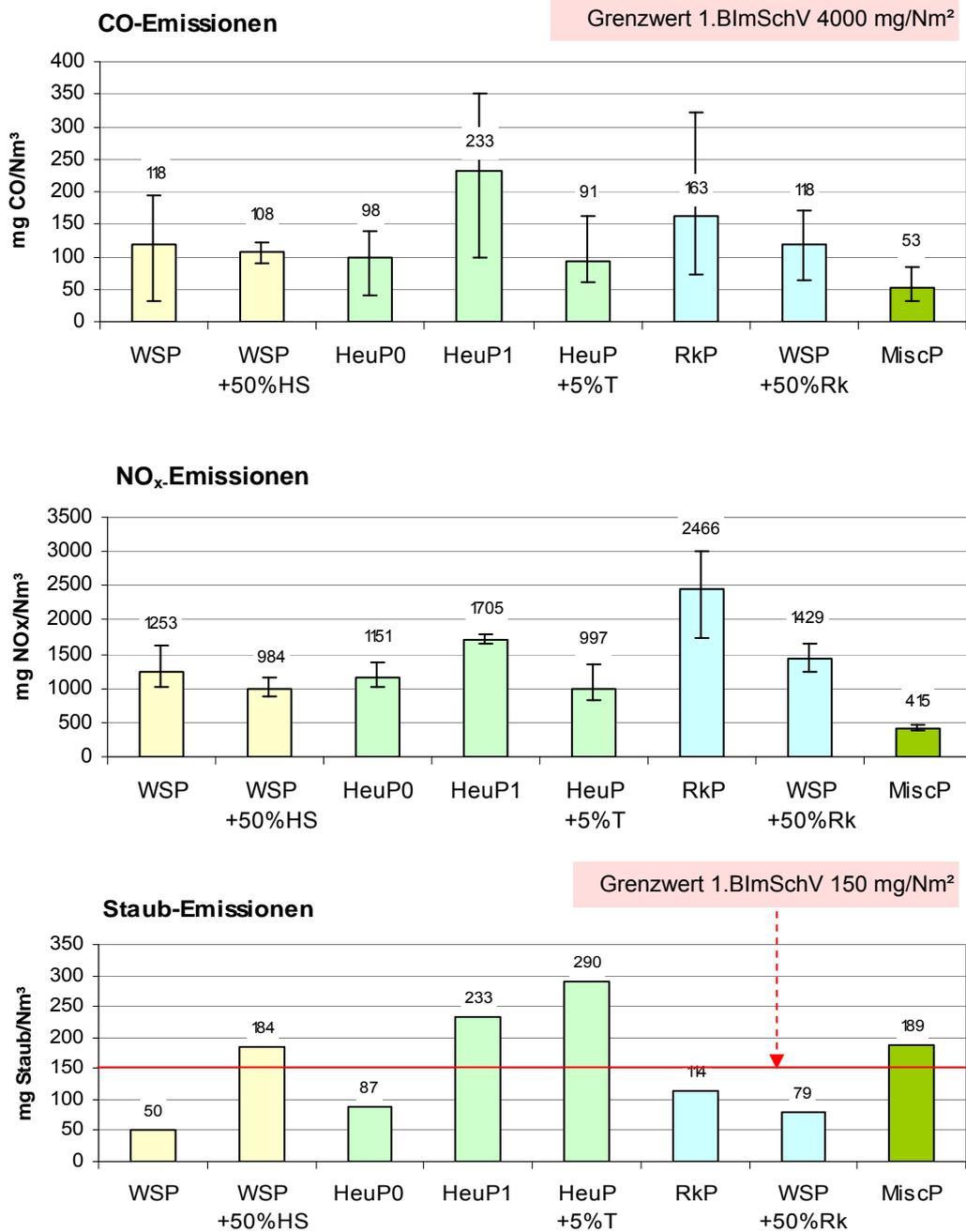


Abbildung 32: CO-, NO_x- und Staub-Emissionen beim Abbrand verschiedener Brennstoffpellets im Kessel FERRO BIOMAT 23L

Die gemessenen NO_x-Werte lagen in den Abbrandversuchen unverhältnismäßig hoch. Nach 1.BImSchV wird kein Grenzwert für NO_x-Emissionen ausgewiesen, für die Novelle werden 600 mg als Grenzwert für die erforderliche Typenprüfung diskutiert. Ein Zusammenhang zwischen den Stickstoffgehalten im Brennstoff und den verursachten Emissionen ist tendenziell zu beobachten. Allerdings lassen sich die hohen Emissionen eventuell eher durch eine nicht optimale Luftstufung und -zufuhr in der Verbrennungskammer erklären.

Die Ermittlung der Staubemissionen erfolgte bei jeder Brennstoffvariante nur einmalig. Aufgrund des verwendeten Abgaswärmetauschers nahm die Feuchte im Abgas stark zu. An der Filtersonde lagerte sich Wasser ab, feuchte Stellen auf dem für die Staubablagerung verwendeten Filterblatt verminderten den Durchfluss. Somit sind größere Messfehler bei den ermittelten Staubemissionen zu erwarten, deren Ausmaß nicht abschätzbar ist. Die Werte deuten aber an, dass die halmgutartigen Brennstoffe kritisch bezüglich der Einhaltung des Grenzwertes einzustufen sind.

In Tabelle 26 sind die erzielten Kesselwirkungsgrade und die Emissionen an SO₂, HCl und Ges.-C zusammengestellt.

Der Kesselwirkungsgrad lag in den Messkampagnen bei den meisten Chargen zwischen 70 und 77 % und damit deutlich unter dem vom Hersteller angegebenen Wirkungsgrad von 86 %. Beim Abbrand der Heupellets mit Talkum (HeuP+5%T) betrug der Wirkungsgrad ca. 84 %.

Tabelle 26: Kesselwirkungsgrad und Emissionen an SO₂, HCl und Ges.-C

Kessel: FERRO BIOMAT 23L		Abgaskonzentrationen bezogen auf 13 Vol % O ₂ Durchschnittswerte aller 1/4-Stunden-Mittel		
Brennstoff	Kesselwirkungsgrad [%]	SO ₂ [mg/Nm ³]	HCl [mg/Nm ³]	Ges.-C [mg/Nm ³]
WSP	77,1	100	1,8	1,7
WSP+50%HS	n.b.	60	1,3	1,5
HeuP0	69,9	275	8,3	1,8
HeuP1	76,2	177	4,9	1,7
HeuP+5%T	83,6	223	11,3	3,0
RkP	70,8	149	1,9	2,7
WSP+50%Rk	73,2	102	12,4	2,0
MiscP	72,6	210	6,6	1,4
Grenzwerte der TA-Luft (FWL > 100 kW, bei 11 % O ₂)		350	30	50

n.b.: nicht bestimmt

Beim Abbrand der verschiedenen Brennstoffe wurden im Durchschnitt 60 – 275 mg SO₂/Nm³, 1,3 – 12,4 mg HCl/Nm³ und 1,4 – 3,0 mg Ges.-C/Nm³ ermittelt. Für diese Stoffe werden nach 1. BImSchV keine gesetzlichen Grenzwerte festgelegt. Als Orientierungswerte können nur die allgemeinen Grenzwerte der TA-Luft (Anlagen > 100 kW Feuerungswärmeleistung, Ziffer 5.2.4) herangezogen werden. Diese Grenzwerte werden auch unter Beachtung des geringeren Bezugssau-

erstoffgehaltes (11 %) bei allen Brennstoffen problemlos unterschritten. Die jeweils höheren Emissionen an Schwefeldioxid und Salzsäure werden tendenziell bei den Brennstoffvarianten beobachtet, die auch vergleichsweise viel Schwefel und Chlor in der Trockenmasse aufweisen (vgl. Tabelle 22).

Verbrennungsaschen und Verschlackungsverhalten

Trotz eines sehr guten Ausbrandes bildeten sich bei einem Großteil der Brennstoffpellets Asche-Schlacke-Agglomerate, die den Verbrennungsvorgang jedoch nicht behinderten. Bei den Weizenstrohpellets (WSP), den Rapspresskuchenpellets (RkP) und den Weizenstrohpellets mit Rapspresskuchen (WSP+50 %Rk) neigten die Aschen kaum zur Verschlackung. In Abbildung 33 sind die Fein- und Grobaschenanteile der Rostaschen zusammengestellt.

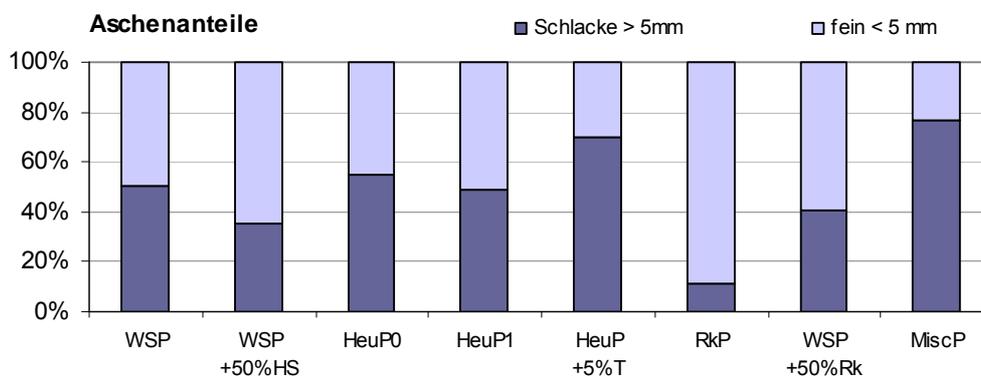


Abbildung 33: Fein- und Grobanteile der Rostaschen aus der Verbrennung verschiedener Biomassepellets in einem Pelletkessel FERRO BIOMAT 23 L

Die Asche der Rapskuchenpellets (RkP) weist den geringsten Grobanteil auf. Rapspresskuchen zeigte beim Abbrand keinerlei Verschlackungen.

Die Zumischung von Talkum zeigte beim Abbrand der Heupellets (Heup+5%T) in dem FERRO-Kessel keine positive Wirkung. Eine Ursache könnte in höheren Brennraumtemperaturen beim Abbrand dieser Charge liegen.

Beim Verbrennungsvorgang werden in der Asche mineralische Pflanzennährstoffe gebunden. Ihre Rückführung würde somit zur Entwicklung geschlossener Nährstoffkreisläufe beitragen (Tabelle 27).

Die Aschen bestehen zum größten Teil aus Kalium, Kalzium, Phosphor und Magnesium. Die Gehalte dieser Elemente sind maßgeblich von den Gehalten in der Biomasse abhängig.

Die niedrigen Glühverluste (GV) der Aschen deuten auf einen sehr guten Ausbrand der verschiedenen Brennstoffe im Prüfkessel FERRO BIOMAT 23L hin.

Tabelle 27: Inhaltsstoffgehalte der Verbrennungsaschen (FERRO BIOMAT 23 L)

Element	eingesetzte Brennstoffe								Grenz- wert DüMV
	WSP	WSR +50%HS	HeuP0	HeuP1	HeuP +5%T	RkP	WSP +50%Rk	MiscP	
TS [%]	99,2	99,6	99,4	99,7	99,8	99,1	99,1	98,0	
GV [% i.TS]	2,1	0,5	1,9	1,1	3,7	1,1	5,2	4,8	
pH-Wert	11,1	10,8	10,7	11,0	10,3	10,0	9,5	11,1	
Nt [% i.TS]	0,06	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,24	0,06	
P [% i.TS]	2,3	4,2	4,1	3,9	2,6	14,4	12,5	1,8	
K [% i.TS]	11,1	19,3	17,3	17,7	13,9	21,3	19,6	26,6	
Mg [% i.TS]	1,5	3,3	3,0	5,4	8,4	6,7	5,7	1,4	
Ca [% i.TS]	4,4	7,6	6,8	7,6	6,3	9,4	8,7	6,1	
S [% i.TS]	0,4	0,7	0,7	0,7	0,5	0,6	0,5	0,5	
As [mg/kg TS]	4,6	18,1	28,4	48,2	75,9	5,3	4,9	0,2	40
Cd [mg/kg TS]	0,3	0,7	0,7	0,9	0,7	0,3	0,2	0,1	1,5
Pb [mg/kg TS]	4,5	17,4	37,2	39,6	44,3	5,4	0,8	<0,01	150
Cr [mg/kg TS]	37,0	61,6	49,4	138,1	315,8	22,4	17,0	53,4	
Cu [mg/kg TS]	38,8	73,0	86,6	80,2	74,4	61,1	46,7	62,8	70
Hg [mg/kg TS]	<0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,37	0,01	1
Ni [mg/kg TS]	41,2	33,3	23,5	187,3	499,9	9,4	5,4	20,6	80
Zn [mg/kg TS]	145,0	230,5	452,2	382,8	342,0	466,8	406,7	123,6	1000
TI [mg/kg TS]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1

Die Aschen aus der Verbrennung der eingesetzten Heupellets und Weizenstroh-Holzpellets haben sehr hohe Gehalte an Kupfer. Das verpresste Heu stammt von einer mit Arsen, Cadmium und Blei belasteten Fläche. Die Heupellets HeuP1 sind stärker belastet als die HeuP0, dies zeigt sich auch in dem höheren Arsengehalt der Asche. Die Zumischung von Talkum zum Heu (HeuP+5%T) spiegelt sich nach der Verbrennung leider auch in hohen Arsen-, Chrom- und Nickelgehalten der Aschen wider. Die Aschen der genannten Brennstoffe genügen nicht den Grenzwerten der DüMV und dürften somit nicht auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht bzw. anderen Düngemitteln zugemischt werden.

4.3.2 Ergebnisse der Abbrandversuche mit dem Kessel BAXI MULTI HEAT 25 kW

Die Abbrandversuche mit dem Biomassekessel BAXI MULTI HEAT 25 kW erfolgten an einer Praxisanlage, mit der ein Bürogebäude und Lagerräume beheizt werden. Die Untersuchungen wurden stets im Volllastbereich, d.h. bei höchstmöglichem Durchsatz der Anlage gefahren.

In der Abbildung 34 sind die erfassten Durchschnittswerte der Viertelstunden-Mittel der Emissionen an CO, NO_x und Staub dargestellt.

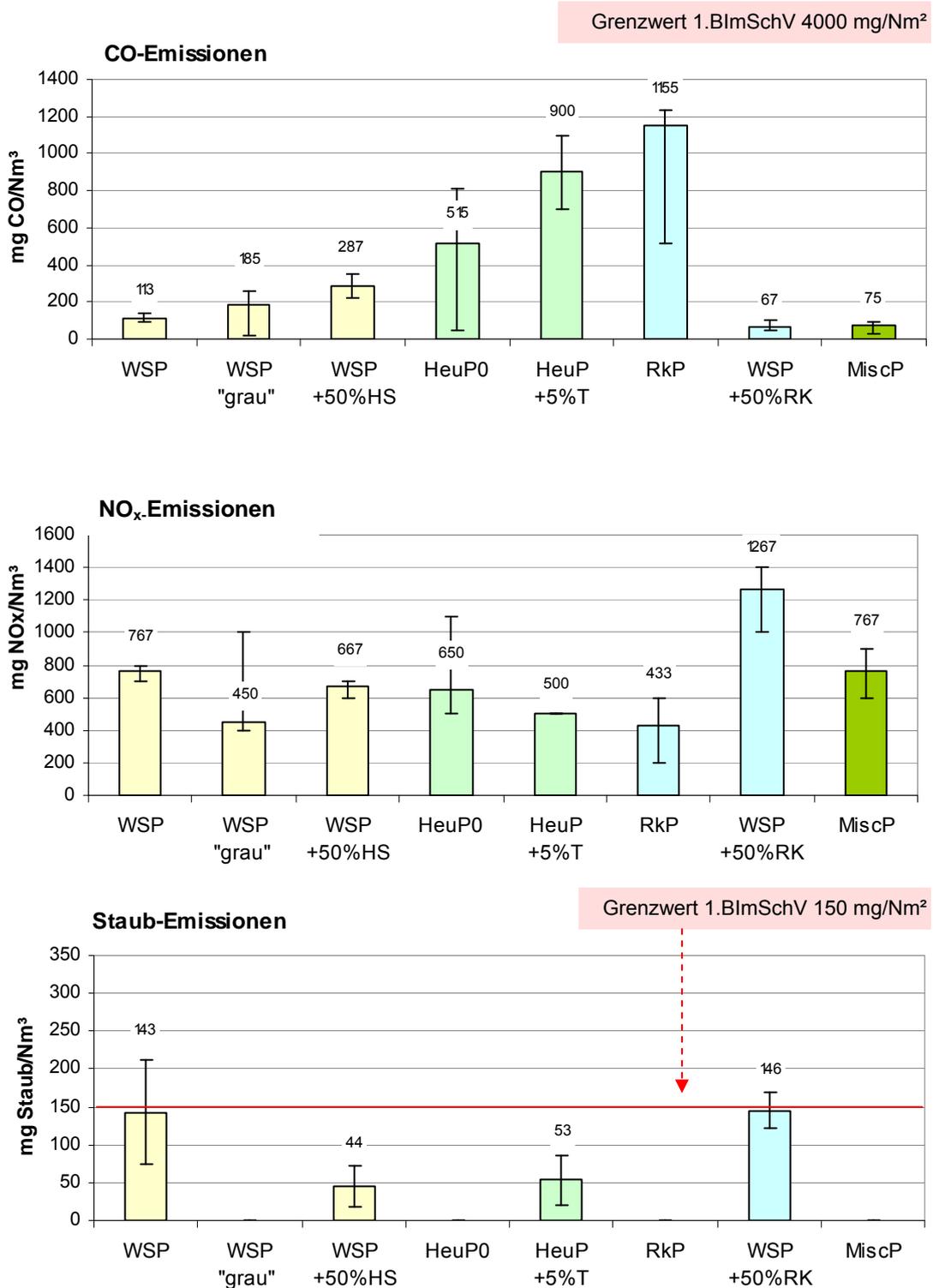


Abbildung 34: Durchschnittliche Viertelstunden-Mittelwerte der Emissionen an CO, NO_x und Staub beim Abbrand verschiedener Brennstoffchargen im BAXI MULTIHEAT

Bei den CO-Emissionen konnte kein Rückschluss auf den jeweiligen Brennstoff gezogen werden. Die Mittelwerte lagen deutlich unter dem derzeit gültigen Grenzwert von 4000 mg/Nm³. Vergleicht man jedoch die Höhe der CO-Emissionen mit den erfassten NO_x-Emissionen, so wird deutlich, dass mit zunehmenden CO-Emissionen die NO_x-Emissionen abnahmen. Man kann daraus schließen, dass seitens der Regeltechnik (Luftzufuhr) noch Optimierungspotenzial bezüglich der CO- und NO_x-Emissionen besteht.

Die Staubemissionen wurden nur bei vier Brennstoffvarianten messtechnisch erfasst. Bei den vier Brennstoffen konnte keine Überschreitung des Grenzwertes der 1.BImSchV festgestellt werden. Beim Abbrand der Weizenstroh-Holzpellets 50:50 (WSP+50 % HS) und der Heupellets mit 5 % Talkum (HeuP+5%T) lagen die Staubemissionen sogar deutlich unter dem in der Novelle diskutierten Grenzwert von 100 mg/Nm³.

In Tabelle 28 sind die Emissionen an SO₂, HCl und Ges.-C zusammengestellt. Der Kesselwirkungsgrad wurde bei der Messkampagne mit dem BAXI -Kessel nicht bestimmt.

Tabelle 28: Emissionen an SO₂, HCl und Ges.-C

Kessel: BAXI MULTI HEAT 25 kW	Abgaskonzentrationen bezogen auf 13 Vol %O ₂ Durchschnittswerte aller 1/4-Stunden-Mittel		
Brennstoff	SO ₂ [mg/Nm ³]	HCl [mg/Nm ³]	Ges.-C [mg/Nm ³]
WSP	57	16,4	1,9
WSP „grau“	347	41,7	21,2
WSP+50%HS	377	79,8	4,3
HeuP0	487	26,1	3,5
HeuP+5%T	607	51,3	25,8
RkP	890	11,9	39,1
WSP+50%Rk	507	40,3	37,4
MiscP	177	40,4	15,6
Grenzwerte der TA-Luft (FWL > 100 kW, bei 11 % O ₂)	350	30	50

Die Emissionsmessungen am BAXI MULTI HEAT zeigten beim Abbrand der geprüften Biopellets eine vergleichsweise hohe Konzentration von Schwefeldioxid (57 – 890 mg SO₂/Nm³) und Salzsäure (12 – 80 mg HCl). Der im Vergleich zu den anderen Brennstoffen besonders schwefelreiche Rapskuchen erzeugte dabei wie erwartet die höchsten SO₂-Emissionen. Ein ähnlicher Zusammenhang konnte auch bei den HCl-Emissionen beobachtet werden. Bei Brennstoffe mit geringem Chloranteil in der Trockensubstanz (RkP) wird auch wenig HCl bei der Verbrennung emittiert. Die Gesamt-C-Emissionen lagen mit 2 – 39 mg Ges.-C/Nm³ im unteren bis mittleren Bereich.

Verschlackungsverhalten

Bei der Verbrennung der verschiedenen halmgutartigen Brennstoffe wurden Versinterungen der Verbrennungaschen festgestellt, diese führten jedoch nicht zu einer Beeinträchtigung des Verbrennungsvorgangs. Die Rapspresskuchenpellets verbrannten auch in diesem Kessel fast ohne Versinterungen. In Abbildung 35 sind die Fein- und Grobaschenanteile der Rostaschen zusammengestellt. Der Einsatz von Talkum bei der Pelletvariante HeuP+5%T zeigte nur einen geringen positiven Effekt.

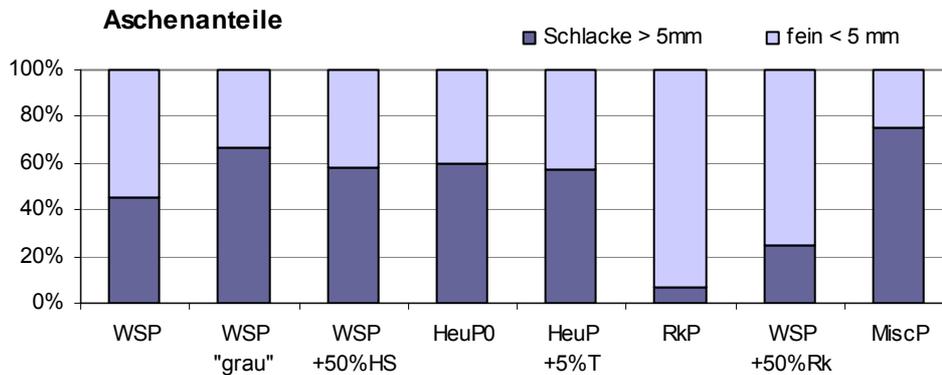


Abbildung 35: Fein- und Grobanteile der Rostaschen aus der Verbrennung verschiedener Biomassepellets in einem Pelletkessel BAXI MULTI HEAT 25 kW

Der ermittelte Glühverlust der Aschen lag zwischen 1,5 und 5,4 % bzw. bei den Weizenstroh-Rapskuchenpellets bei 9 % (Tabelle 29). Bei letzteren konnte somit der Brennstoff nicht ausreichend verbrannt und genutzt werden. Unverbrannte organische Kohlenstoffverbindungen liegen normalerweise unter 5 % TS (OBERNBERGER 1998).

Tabelle 29: Inhaltsstoffgehalte der Verbrennungsaschen

Element	eingesetzte Brennstoffe								Grenz- wert DüMV
	WSP	WSR „grau“	WSR +50%HS	HeuP0	HeuP +5%T	RkP	WSP +50%Rk	MiscP	
TS [%]	97,2	98,0	98,6	98,6	98,9	96,0	96,8	98,3	
GV [% i.TS]	2,1	4,0	3,7	3,6	1,5	5,4	9,0	4,6	
pH-Wert	11,1	10,6	10,5	10,5	10,4	10,4	10,4	10,1	
Nt [% i.TS]	0,09	0,08	0,15	0,09	0,03	0,39	0,19	0,05	
P [% i.TS]	1,9	1,9	2,7	3,7	2,2	8,4	8,0	2,6	
K [% i.TS]	23,8	9,1	14,0	15,4	11,6	19,8	18,0	20,6	
Mg [% i.TS]	2,2	1,5	4,7	3,0	7,6	4,7	6,0	3,4	
Ca [% i.TS]	7,9	3,6	5,7	6,2	5,6	7,6	7,5	5,9	
S [% i.TS]	0,7	0,5	0,7	0,0	0,0	1,0	0,8	0,0	
As [mg/kg TS]	20,0	12,6	52,5	31,5	94,1	21,4	41,5	22,9	40
Cd [mg/kg TS]	0,3	0,2	0,6	0,3	0,2	0,8	0,4	0,2	1,5
Pb [mg/kg TS]	7,3	6,4	26,0	14,1	19,4	22,7	24,1	5,9	150
Cr [mg/kg TS]	54,1	61,6	218,5	87,0	357,1	41,2	125,7	137,2	
Cr^{VI} [mg/kg TS]	1,2	1,9	9,3	3,0	9,1	1,9	2,4	4,0	2
Cu [mg/kg TS]	44,5	37,4	81,0	89,0	76,1	53,2	59,9	84,1	70
Hg [mg/kg TS]	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1
Ni [mg/kg TS]	53,9	88,6	326,1	83,0	598,4	48,1	191,0	158,9	80
Zn [mg/kg TS]	148,7	160,2	263,7	331,8	248,1	473,0	382,0	151,1	1000
TI [mg/kg TS]	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,05	0,02	0,01	1

Die Aschen der Heupellets mit 5 % Talkum (HeuP+5%T) sowie der Weizenstroh-Holzpellets (WSP+50%HS) weisen eine hohe Belastung mit Arsen, Chrom (VI), Kupfer und Nickel auf und dürften laut DüMV nicht als Düngemittel eingesetzt werden.

Von den Aschen der im Versuch eingesetzten acht verschiedenen Brennstoffe genügten hinsichtlich der Gehalte an Kontaminanten nur zwei Aschen den strengen gesetzlichen Anforderungen der DüMV. Die anderen Aschen waren mit Schwermetallen (Cr VI, Cu, Ni) belastet und dürften nicht als Düngemittel bzw. als Beimischung zu Düngemitteln verwendet werden.

4.3.3 Ergebnisse der Abbrandversuche mit dem Kessel REKA HKRST 30/3

Die Abbrandversuche mit dem Biomassekessel REKA HKRST 30/3 (32 kW) erfolgten an einer Praxisanlage, welche in einem Wohngebäude zur Wärmeversorgung integriert ist. Der Pufferspeicher konnte über Nacht heruntergefahren werden, so dass der Kessel im Volllastbereich betrieben werden konnte.

In der Abbildung 36 sind die erfassten Durchschnittswerte der Viertelstunden-Mittel der Emissionen an CO, NO_x und Staub dargestellt. Die Einhaltung des CO-Grenzwertes von 4000 mg/Nm³ (1.BImSchV) stellte kein Problem dar. Die erfassten Mittelwerte lagen bei allen Brennstoffen deut-

lich unter 1000 mg CO/Nm³. Bei den drei verschiedenen Heupelletchargen waren die CO-Emissionen sowie deren Schwankungen im Vergleich zu den anderen Chargen am höchsten.

Vergleicht man die Höhe der CO-Emissionen mit den erfassten NO_x-Emissionen, so lässt sich auch hier mit zunehmenden CO-Emissionen eine Abnahme der NO_x-Emissionen erkennen. Eventuell hätten die CO-Emissionen noch weiter optimiert werden können.

Die Rapskuchenpellets wiesen die höchsten NO_x-Emissionen auf, was auf den Gehalt an Stickstoff im Brennstoff von 5,5 % zurückzuführen ist.

Die Staubemissionen lagen bei allen Brennstoffchargen beim Abbrand in diesem Kessel deutlich über dem zulässigen Grenzwert von 150 mg/Nm³. Die höchsten Staubemissionen wurden beim Abbrand von Weizenstroh-Rapskuchenpellets mit ca. 370 mg Staub/Nm³ und der Heupellets mit ca. 260 – 340 mg/Nm³ ermittelt. Bei den drei Heupelletvarianten ist eine Reduzierung der staubförmigen Emissionen durch die Zumischung von 5 % Talkum erkennbar.

Eine Reduzierung der Staubemissionen auf ein Niveau unterhalb des Grenzwertes, auch im Hinblick einer Verschärfung des Grenzwertes auf 100 mg/Nm³ durch die Novellierung der 1.BImSchV, ist nur mit dem Einsatz entsprechender Filtertechnik realisierbar.

Neben der Bestimmung der Emissionen an Gesamtstaub erfolgte auch eine Erfassung der Feinstäube im Partikelgrößenbereich 10, 2,5 und < 2,5 µm. Hier lagen, im Durchschnitt aller Brennstoffvarianten, 96 - 98,5 % der Feinstäube im Partikelgrößenbereich < 2,5 µm. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit von Sekundärmaßnahmen zur Staubabsenkung in kleinen Biomassefeuerungsanlagen.

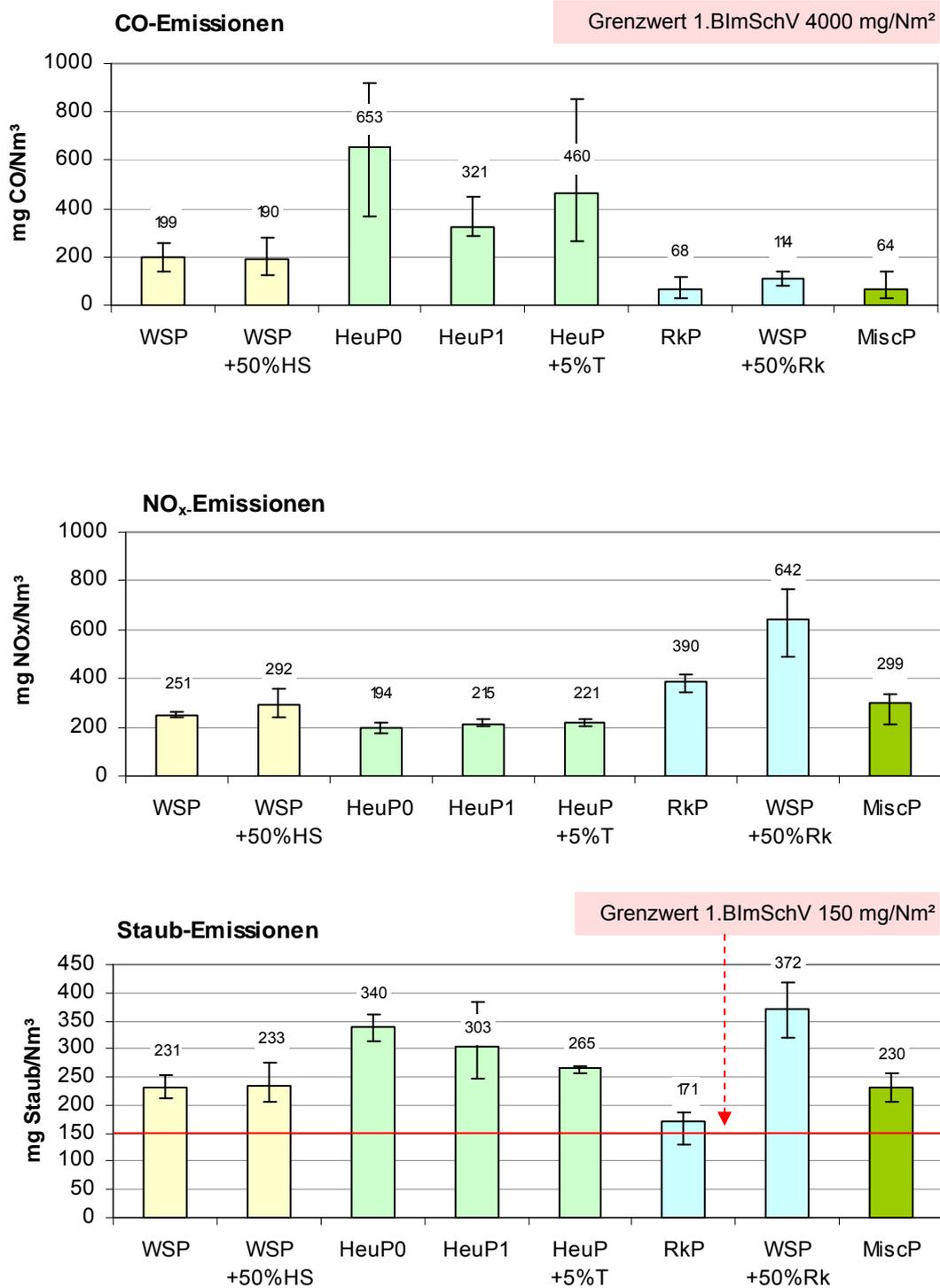


Abbildung 36: Durchschnittliche Viertelstunden-Mittelwerte der Emissionen an CO, NO_x und Staub beim Abbrand verschiedener Brennstoffchargen im REKA HKRST 30/3 (32 kW)

Mit den Weizenstroh-Holzpellets wurde der höchste Kesselwirkungsgrad von 90 % erzielt. Die Heupellets mit 5 % Talkum erreichten nur ≈ 75 %, während die anderen Chargen zwischen 80 und 85 % lagen (Tabelle 30).

Tabelle 30: Kesselwirkungsgrad sowie Emissionen an SO₂, HCl und Ges.-C beim Abbrand verschiedener Brennstoffe im Kessel REKA HKRST 30/3

Kessel: REKA HKRST 30/3		Abgaskonzentrationen bezogen auf 13 Vol %O ₂ Durchschnittswerte aller 1/4-Stunden-Mittel		
Brennstoff	Kesselwirkungsgrad [%]	SO ₂ [mg/Nm ³]	HCl [mg/Nm ³]	Ges.-C [mg/Nm ³]
WSP	81,3	223	67,0	1,1
WSP+50%HS	90,0	289	45,0	2,2
HeuP0	80,1	310	61,3	8,7
HeuP1	80,3	277	51,1	2,9
HeuP+5%T	75,1	325	45,8	3,9
RkP	82,1	1169	33,8	3,8
WSP+50%Rk	84,7	493	34,9	1,8
MiscP	82,6	113	47,6	3,3
Grenzwerte der TA-Luft (FWL > 100 kW, bei 11 % O ₂)		350	30	50

Die Rapskuchenpellets mit einem Schwefelgehalt von ca. 0,7 % erzeugten beim Abbrand sehr hohe SO₂-Emissionen von ca. 1170 mg/Nm³. Die Emissionen der anderen Brennstoffchargen lagen zwischen 113 und 325 mg SO₂/Nm³ bzw. die Mischpellets aus Weizenstroh und Rapskuchen bei 495 mg SO₂/Nm³.

Beim Abbrand der verschiedenen Brennstoffe wurden im Durchschnitt 34 – 67 mg HCl ermittelt. Dies zeigt, dass beim Einsatz von Halmgutpellets mit höheren Konzentrationen an HCl im Rauchgas zu rechnen ist. Der Zusammenhang zwischen den Gehalten an Schwefel und Chlor im Brennstoff und den erfassten Emissionen an SO₂ und HCl ist deutlich erkennbar. Die Gesamt-C-Emissionen lagen in der Messkampagne bei 1 – 4 mg Ges.-C/Nm³ bzw. 9 mg Ges.-C/Nm³ (HeuP0).

Verschlackungsverhalten

Bei der Verbrennung der verschiedenen halmgutartigen Brennstoffe in dem getesteten REKA-Kessel wurden zum Teil sehr starke Versinterungen und Verschlackungen der Aschen im Brennraum festgestellt, die unter anderem zur Beeinträchtigung des Kesselbetriebes führten. Um das Verschlackungsverhalten der einzelnen Brennstoffe nachvollziehbar darzustellen, wurden die Beobachtungen während der Messkampagne dokumentiert (Tabelle 31). Demnach wäre ein kontinuierlicher Kesselbetrieb ohne Beeinträchtigungen nur mit Rapskuchenpellets, Rapskuchen-Weizenstrohpellets, Heupellets mit 5 % Talkum und Miscanthuspellets möglich. Alle anderen Brennstoffchargen würden zu einer mittleren bis schweren Beeinträchtigung der Kesselfunktion vor allem durch Blockade des Schubrostes führen.

Der Grobascheanteil > 5 mm lag bei allen Brennstoffvarianten, außer den Aschen der Rapskuchenpellets und Rapskuchen-Weizenstrohpellets, über 40 % (Abbildung 37).

Tabelle 31: Verschlackungsverhalten verschiedener halmgutartiger Brennstoffe beim Abbrand im Biomassekessel REKA HKRST 30/3

Brennstoff	Bewertung des Verschlackungsverhaltens	Note der Bewertung
WSP	-Versinterungen und Verschmelzungen, krümlige Schlacke mit größeren Klumpen, -Beeinträchtigung der Feuerungstechnik durch Schlackeanhaftungen im Brennraum möglich	4
WSP+50%HS	-Versinterungen mit Verschmelzungen, meist brechende versinterte Aschefragmente, -Beeinträchtigung der Feuerungstechnik durch Schlackeanhaftungen im Brennraum bei längerem Einsatz möglich	3 - 4
HeuP0	-flüssige Verschmelzungen, größere Schlackebrocken, -schwere Beeinträchtigung der Feuerungstechnik, Verklebung des Schubrostes und Verbackungen an den Brennraumwänden	5 - 6
HeuP1	-Verschmelzungen, größere Schlackebrocken, -schwere Beeinträchtigung der Feuerungstechnik, Ascheförderung (Schubrost) blockiert	5
HeuP+5%T	-Versinterungen mit größeren Klumpen, Schicht aus versinterten Aschefragmenten bricht jedoch leicht auseinander, -keine Beeinträchtigung der Feuerungstechnik	3
RkP	-einzelne Versinterungen, keine Klumpen, -keine Beeinträchtigung der Feuerungstechnik	2
WSP+50%Rk	-Versinterungen mit wenigen Klumpen, Schicht aus versinterten Aschefragmenten bricht jedoch leicht auseinander, -keine Beeinträchtigung der Feuerungstechnik	2 - 3
MiscP	-Versinterungen mit wenigen Klumpen, Schicht aus versinterten Aschefragmenten bricht jedoch leicht auseinander, -keine Beeinträchtigung der Feuerungstechnik	2 - 3

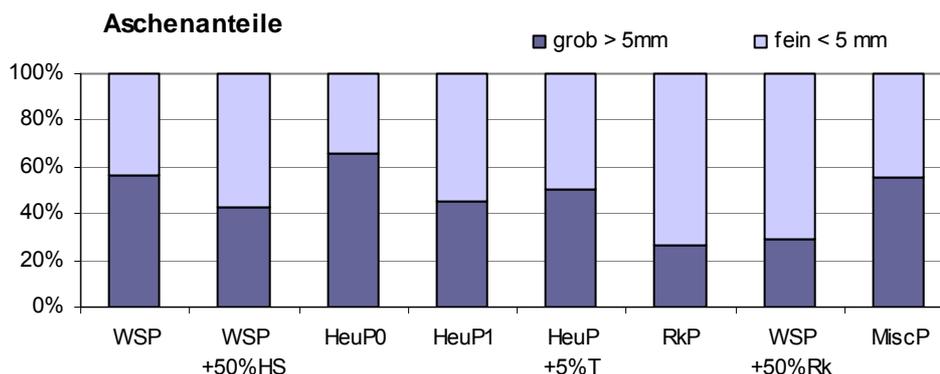


Abbildung 37: Fein- und Grobanteile der Rostaschen aus der Verbrennung verschiedener Biomassepellets in einem Biomassekessel REKA HKRST 30/3

Die Verbrennungsaschen aus der Verbrennung im REKA-Kessel wiesen hohe Glühverluste von ca. 9 - 10 % auf. Das weist auf eine schlechtere Verbrennung hin, die unter anderem durch die starken Versinterungen und der Behinderung der Kesselfunktion verursacht wurde (Tabelle 32).

Tabelle 32: Inhaltsstoffgehalte der Verbrennungsaschen

Element	eingesetzte Brennstoffe								Grenzwert DüMV
	WSP	WSR +50%HS	HeuP0	HeuP1	HeuP +5%T	RkP	WSP +50%Rk	MiscP	
TS [%]	99,5	99,2	99,6	99,5	99,0	98,3	98,4	98,5	
GV [% i.TS]	10,0	9,6	9,4	10,1	9,5	8,6	9,6	9,7	
pH-Wert	1,2	2,7	0,5	1,3	7,5	5,7	3,9	4,7	
Nt [% i.TS]	0,01	0,04	0,01	0,02	0,27	0,19	0,09	0,06	
P [% i.TS]	2,7	3,4	3,3	3,9	2,5	16,8	10,1	2,7	
K [% i.TS]	15,6	16,5	13,5	16,7	10,9	20,8	19,6	18,4	
Mg [% i.TS]	2,0	2,5	4,8	3,3	7,1	7,1	4,5	1,7	
Ca [% i.TS]	6,3	6,5	6,0	7,5	4,9	8,2	8,2	5,2	
S [% i.TS]	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	
As [mg/kg TS]	6,6	12,4	38,6	15,2	70,3	0,9	1,6	2,8	40
Cd [mg/kg TS]	0,2	0,4	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	1,5
Pb [mg/kg TS]	4,9	7,7	14,9	1,4	23,2	1,6	<0,01	1,0	150
Cr [mg/kg TS]	103,2	147,2	270,8	124,6	352,8	49,2	26,7	123,6	
Cu [mg/kg TS]	60,5	66,4	78,8	85,5	62,7	76,6	47,0	59,8	70
Hg [mg/kg TS]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1
Ni [mg/kg TS]	57,7	73,9	293,4	62,0	505,8	10,0	5,7	67,2	80
Zn [mg/kg TS]	190,4	251,2	296,0	226,6	304,4	591,0	240,3	207,1	1000
TI [mg/kg TS]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1

Die Kupfer- und Nickelgehalte einiger Verbrennungsaschen liegen über dem Grenzwert der DüMV. Bei dem Einsatz der Heupellets mit Talkum liegt zudem eine Arsenbelastung der Asche vor. Somit sind diese Aschen nicht als Düngemittel oder als Beimischung zu Düngemitteln zu verwenden.

4.3.4 Ergebnisse der Abbrandversuche mit dem Kessel Guntamatic PowerCorn 30

Im Winter 2006/2007 fanden die Abbrandversuche mit dem Kessel Guntamatic PowerCorn 30 an einer Praxisanlage in einem landwirtschaftlichen Betrieb statt. Die Kesselleistung beträgt bei Holzbrennstoffen 30 kW und bei Getreide 25 kW. Auf Grund der sehr milden Witterung konnte trotz vielseitiger Maßnahmen zur Wärmeabnahme der Nennlastbereich nicht ganz erreicht werden, dies ist bei der Bewertung der Emissionen zu berücksichtigen.

In den Abbrandversuchen 2006/2007 kamen zum Teil andere Brennstoffe und Brennstoffmischungen zum Einsatz als in der Messkampagne 2005.

In Abbildung 38 sind die erfassten Emissionen an CO, NO_x und Staub bei der Verbrennung verschiedener Brennstoffe dargestellt.

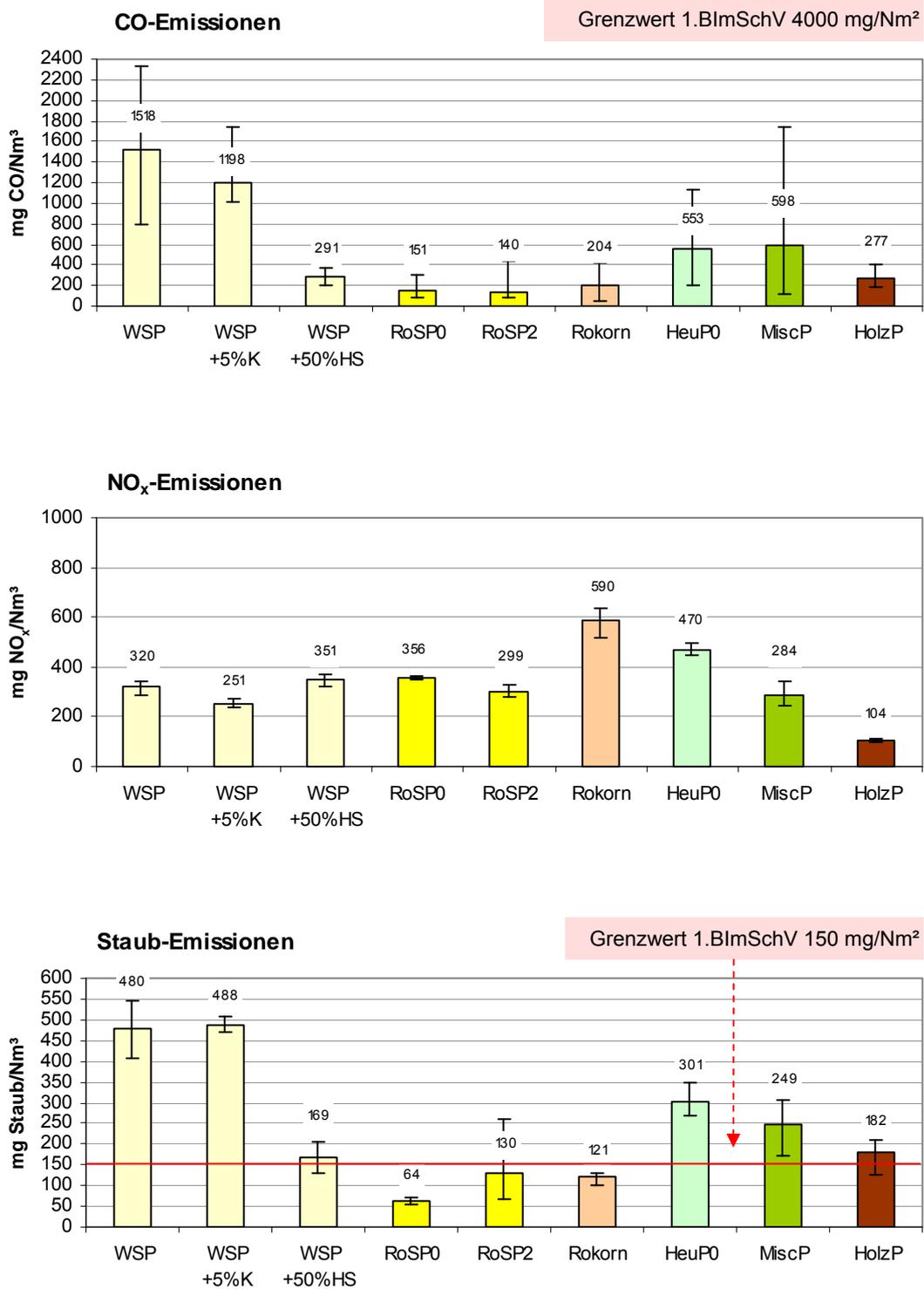


Abbildung 38: Durchschnittliche Viertelstunden-Mittelwerte der Emissionen an CO, NO_x und Staub beim Abbrand verschiedener Brennstoffchargen im Guntamatic PowerCorn 30

Die CO-Emissionen lagen bei allen Brennstoffen stark unter dem derzeitigen Grenzwert von 4000 mg/Nm³. Außer bei Weizenstrohpellets und Weizenstrohpellets mit 5 % Branntkalk wurde auch der neue Grenzwert von 1000 mg/Nm³ deutlich unterschritten. Bei den genannten zwei Pelletvarianten besteht dabei durchaus noch Optimierungspotenzial. Dies wird auch deutlich bei der Betrachtung der NO_x-Emissionen.

Die NO_x-Emissionen lagen, außer bei Roggenkorn, unter 500 mg/Nm³. Bei Roggenkorn wurden mit 590 mg/Nm³ die höchsten Emissionen an NO_x erfasst. Dies ist vor allem auf den hohen Gehalt an Stickstoff im Brennstoff von 1,9 % zurückzuführen. Im Vergleich dazu wurden durch den Abbrand der Holzpellets mit einem Stickstoffgehalt < 0,05 % nur 134 mg NO_x/Nm³ emittiert.

Die Staubemissionen lagen bei fast allen Varianten über dem Grenzwert von 150 mg/Nm³. Die Roggenstrohpellets sowie das Roggenkorn scheinen diesbezüglich von Vorteil. Sie unterschritten im Abbrand den gegenwärtigen Grenzwert deutlich. Kritisch sind vor allem die reinen Weizenstrohpellets. In Form von Mischpellets (50 % Stroh/50 % Holz) konnte die Staubemission abgesenkt werden.

Im Teillastbereich kann der Grenzwert der Staubemissionen auch bei Holzbrennstoffen leicht überschritten werden. HARTMANN (2007) erzielte in vergleichbaren Abbrandversuchen mit Holzpellets in diesem Kessel im Volllastbereich und einer optimalen Kesseleinstellung sehr gute Ergebnisse. Die Staubemissionen lagen unter 20 mg Staub/Nm³. Auch beim Abbrand verschiedener Getreidearten (Körner und Strohpellets) konnten zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Der Grenzwert von 150 mg/Nm³ wurde bei den Halmgut- und Getreidebrennstoffen meistens eingehalten. Beim Einsatz von Gerstenkorn lagen die Emissionen sogar bei ≤ 100 mg/Nm³. Die Einhaltung des niedrigen neuen Staub-Grenzwertes der Novelle der 1.BImSchV (voraussichtlich 100 mg/Nm³) scheint mit diesem Kessel ohne zusätzlichen Einsatz von Filtertechnik auch nur mit ausgewählten Brennstoffen und optimaler Kesseleinstellung möglich zu sein.

Bei den Staubemissionen sind 84 bis 96 % der Partikel den Feinstäuben mit einer Partikelgröße < 2,5 µm zuzuordnen (Abbildung 39). Ein Unterschied zwischen Holz- und Halmgutbrennstoffen konnte nicht festgestellt werden. Die Roggenstrohpellets (RoSP0) und das Roggenkorn erzielten dabei den geringsten Anteil an dieser Partikelfraktion mit 84 bzw. 89 %.

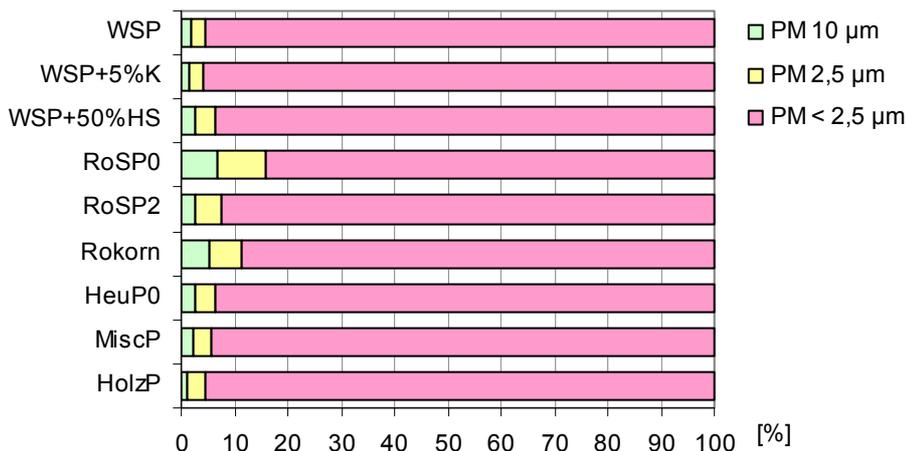


Abbildung 39: Partikelfractionen der Staubemissionen beim Abbrand verschiedener Brennstoffe im Guntamatic PowerCorn 30

In Tabelle 33 sind die tatsächlich erzielte Kesselleistung, der Kesselwirkungsgrad und die durchschnittlichen Emissionen an SO₂, HCl und Ges.-C zusammengestellt.

Die Kesselleistung lag auf Grund der milden Witterung und der ungenügenden Wärmeabnahme nur bei 18 bis 22 kW. Der Kesselwirkungsgrad betrug 67 – 83 %. Die niedrigsten Wirkungsgrade wurden bei den Roggenstroh-, Roggenkorn- und Heubrennstoffen festgestellt.

Tabelle 33: Kesselwirkungsgrad sowie Emissionen an SO₂, HCl und Ges.-C beim Abbrand verschiedener Brennstoffe im Kessel Guntamatic PowerCorn 30 (25 kW)

Kessel: Guntamatic PowerCorn 30 (25 kW)			Abgaskonzentrationen bezogen auf 13 Vol % O ₂ Durchschnittswerte aller 1/4-Stunden-Mittel		
Brennstoff	Kesselleistung [kW]	Kesselwirkungsgrad [%]	SO ₂ [mg/Nm ³]	HCl [mg/Nm ³]	Ges.-C [mg/Nm ³]
WSP	20	76,5	91	30,2	4,7
WSP+5%K	18	82,5	81	69,0	3,4
WSP+50%HS	22	79,5	223	52,0	4,1
RoSP0	20	72,3	164	47,5	3,0
RoSP2	22	66,9	116	59,0	2,3
Rokorn	18	69,2	287	24,6	4,3
HeuP0	20	69,6	331	79,8	3,4
MiscP	19	77,5	101	38,7	2,8
HolzP	18	79,0	18	10,9	3,7
Grenzwerte der TA-Luft (FWL > 100 kW, bei 11 % O ₂)			350	30	50

Die SO₂-Emissionen lagen bei 18 – 331 mg/Nm³, die HCl-Emissionen bei 11 – 80 mg/Nm³ und die Emissionen an Ges.-C bei 2,3 – 4,7 mg/Nm³. Dabei ist die Höhe der Salzsäureemissionen teilweise als kritisch zu beurteilen.

Die Holzpellets mit den geringsten Gehalten an Schwefel und Chlor erzeugten auch die niedrigsten Emissionen an SO₂ und HCl.

Verschlackungsverhalten

Die Versuchsbrennstoffe zeigten im eingesetzten Guntamatic-Heizkessel ein unterschiedlich ausgeprägtes Verschlackungsverhalten (Abbildung 40). Als Referenz können die Holzpellets ohne jegliche Verschlackung angesehen werden. Die Getreidekörner (AL0) zeigten nur geringfügige Verklebungen in der Asche mit Agglomeraten geringen Durchmessers (ca. 2 cm Durchmesser).



Abbildung 40: Verbrennungsaschen der eingesetzten Brennstoffe im Guntamatic Power-Corn 30

Es kann davon ausgegangen werden, dass für keinen Brennstoff eine Beeinträchtigung des Kesselbetriebs zu erwarten ist. Durch die bauartspezifische Kesseltechnik (schräg gestellter Treppenrost) sowie der Vorschubbewegung von Brennstoffeintrag und Rost werden auch größere zusammenhängende Schlackebrocken in Richtung Ascheaustrag abgefördert. Eine zusätzliche Schnecke am Rostende bewirkt zudem, dass größere Aschebrocken gebrochen werden und mit in den Aschebehälter fallen.

Die Aschen aus der Verbrennung im Guntamatic-Kessel wiesen bei den verschiedenen Brennstoffen sehr unterschiedliche Glühverluste auf (Tabelle 34). Die Glühverluste lagen in einer Spanne von 0,2 % bis 49 %. Der hohe Anteil an organischer Substanz (Kohlenstoff) in der Roggenkornasche (49,2 %) und der Miscanthusasche (25,5 %) deutet auf einen ungenügenden Ausbrand der Brennstoffe hin.

Die meisten der untersuchten Aschen wiesen Belastungen mit Arsen, Cadmium, Kupfer, oder Nickel auf und dürften somit nicht als Düngemittel auf landwirtschaftlichen Flächen eingesetzt werden.

Tabelle 34: Inhaltsstoffgehalte der Verbrennungsaschen (Guntamatic PowerCorn 30)

Element	eingesetzte Brennstoffe									Grenzwert DüMV
	WSP	WSP +5%K	WSP +50%HS	RoSP0	RoSP2	RoKorn	HeuP0	MiscP	HolzP	
TS [%]	98,6	99,8	99,5	99,8	100,0	94,5	99,8	97,2	98,5	
GV [% i.TS]	9,8	0,2	8,0	9,2	0,7	49,2	7,2	25,5	13,1	
pH-Wert	9,8	12,3	9,8	10,3	11,7	9,2	9,9	9,6	10,0	
Nt [% i.TS]	0,2	0,03	0,3	0,4	0,02	1,9	0,3	0,9	0,2	
P [% i.TS]	1,8	0,7	3,7	1,8	0,7	9,1	4,1	3,5	1,9	
K [% i.TS]	24,6	13,7	16,5	4,7	5,3	13,2	15,4	17,5	21,8	
Mg [% i.TS]	2,1	1,5	2,4	1,1	0,7	3,3	2,6	2,2	2,1	
Ca [% i.TS]	6,5	29,7	6,4	3,1	5,4	1,5	6,1	4,2	8,5	
S [% i.TS]	1,0	0,9	0,7	0,3	0,3	0,2	0,8	0,7	1,4	
As [mg/kg TS]	16	57	32	179	284	28	29	11	11	40
Cd [mg/kg TS]	0,4	0,1	0,7	0,5	0,4	1,6	0,3	0,5	2,1	1,5
Pb [mg/kg TS]	12	0,1	22	21	18	131	13	3	16	150
Cr [mg/kg TS]	46	30	108	65	68	25	55	56	45	
Cu [mg/kg TS]	45	28	77	48	51	110	84	67	76	70
Hg [mg/kg TS]	0,01	0,02	0,02	0,6	0,08	0,02	0,02	0,01	0,02	1
Ni [mg/kg TS]	26	19	146	29	41	12	33	58	27	80
Zn [mg/kg TS]	164	108	234	192	147	854	343	273	313	1000
TI [mg/kg TS]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1

4.3.5 Ergebnisse der Abbrandversuche mit dem Kessel KSM (20 kW)

Die Abbrandversuche mit dem dänischen Kessel KSM erfolgten im Winter 2006/2007 an einer Praxisanlage in einem Landwirtschaftsbetrieb. Die Nennwärmeleistung beträgt bei Holzbrennstoffen 20 kW. Für andere Brennstoffe wird vom Hersteller keine Leistung angegeben.

Trotz milder Witterung konnte durch einen Pufferspeicher und ein Warmluftgebläse eine ausreichende Wärmeabnahme während der Messkampagne sichergestellt werden. In Abbildung 41 sind die erfassten Emissionen an CO, NO_x und Staub bei der Verbrennung verschiedener Brennstoffe dargestellt. Die CO-Emissionen lagen unter 500 mg/Nm³ und damit unter dem derzeitigen Grenzwert der 1.BImSchV und der geplanten Novelle. Die Weizenstrohpellets verbrannten mit mehreren CO-Spitzen.

Bei den NO_x-Emissionen kann deutlich auf den Gehalt im Brennstoff geschlossen werden. Das Roggenkorn mit 1,9 % N i.d.TS wies bei der Verbrennung die höchsten NO_x-Emissionen (690 mg/Nm³) auf. Die NO_x-Emissionen der anderen Brennstoffe lagen unter 500 mg NO_x/Nm³.

Der Grenzwert für die staubförmigen Emissionen von 150 mg/Nm³ wurde bei fast allen Varianten überschritten. Die Roggenstrohpellets wiesen mit durchschnittlich 51 mg Staub/Nm³ sehr geringe Emissionen auf. Beim Roggenkorn wurde der Grenzwert nur leicht überschritten. Die Weizenstrohpellets fielen auch beim Abbrand im KSM-Kessel durch sehr hohe Staubemissionen von fast 600 mg/Nm³ auf.

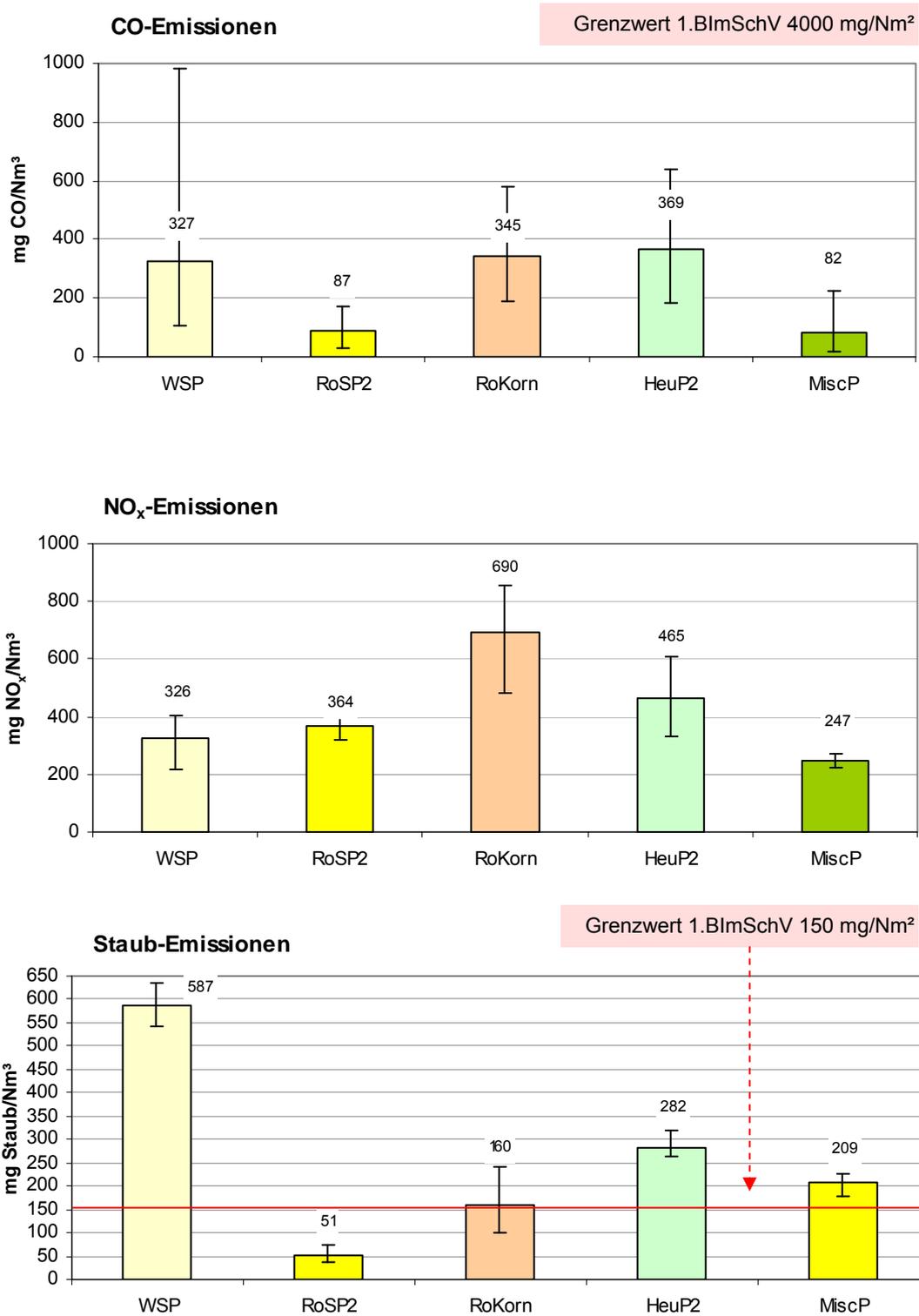


Abbildung 41: Durchschnittliche Viertelstunden-Mittelwerte der Emissionen an CO, NO_x und Staub beim Abbrand verschiedener Brennstoffchargen im Kessel KSM 20 kW

Bei der Verbrennung der verschiedenen Brennstoffchargen lagen im Durchschnitt 92 % (78 - 97 %) der emittierten Staubpartikel im Größenbereich < 2,5 µm (Abbildung 42). Die Roggenstrohpellets wiesen den geringsten Anteil an Feinststäuben bei der Verbrennung im KSM-Kessel auf.

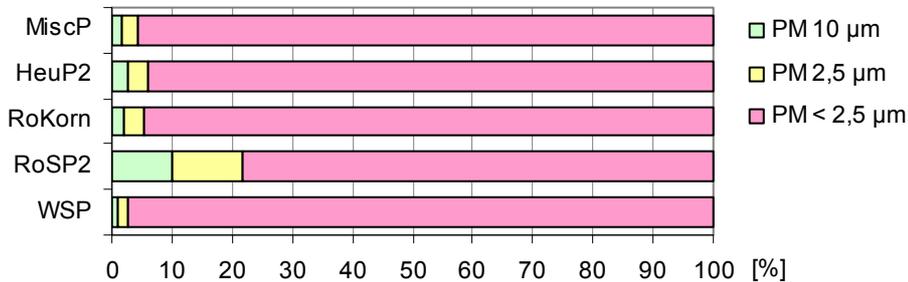


Abbildung 42: Partikelfractionen der Staubemissionen beim Abbrand verschiedener Brennstoffe im KSM-Kessel (20 kW)

In Tabelle 35 sind die Kesselleistung, der Kesselwirkungsgrad und die Emissionen an SO_x und Ges.-C zusammengestellt. Die Emissionen an HCl wurden während dieser Messkampagne nicht erfasst.

Tabelle 35: Kesselleistung, -wirkungsgrad und Emissionen an SO₂ und Ges.-C beim Abbrand der Versuchschargen im KSM-Kessel

Kessel: KSM 20 kW			Abgaskonzentrationen bezogen auf 13 Vol % O ₂ Durchschnittswerte aller 1/4-Stunden-Mittel	
Brennstoff	Kesselleistung [kW]	Kesselwirkungsgrad [%]	SO ₂ [mg/Nm ³]	Ges.-C [mg/Nm ³]
WSP	16	84,1	99	n.b.*
RoSP2	17	81,0	107	2,6
Rokorn	14	74,3	277	30,4
HeuP2	16	79,7	206	4,0
MiscP	18	77,1	67	n.b.*
Grenzwerte der TA-Luft (FWL > 100 kW, bei 11 % O ₂)			350	50

* Messgerät ausgefallen

Die Kesselleistung betrug bei den eingesetzten Brennstoffen 16 - 18 kW, bei Roggenkorn 14 kW. Die Kesselwirkungsgrade lagen zwischen 74 und 84 %.

Die höchsten SO₂-Emissionen wurden beim Abbrand des Roggenkorns erfasst, welches auch den höchsten Schwefelgehalt in der Trockenmasse aufwies. Die SO₂-Emissionen lagen in der Messkampagne bei 67 bis 277 mg/Nm³ und die Emissionen an Ges.-C bei 3 bis 30 mg/Nm³. Die erhöhte Gesamt-C-Emission beim Abbrand des Roggenkorns spiegelt sich auch in dem geringeren Kesselwirkungsgrad wider.

Verschlackungsverhalten

Wie bereits in den Parallelversuchen am Guntamatic-Heizkessel, zeigten auch hier alle fünf Brennstoffe ein unterschiedlich ausgeprägtes Verschlackungsverhalten (Abbildung 43). Jedoch kann durch die bei den Versuchen gemachten Beobachtungen davon ausgegangen werden, dass dadurch keine Beeinträchtigungen des Kesselbetriebs zu erwarten sind. Die Entaschung des Heizkessels erfolgt durch einen Ascheschieber, welcher sich am Brennraumboden periodisch hin und her bewegt und dadurch auch Schlacke in Richtung Ascheaustrag schiebt und größere Schlackeplatten zerdrückt.

Die Asche und zerkleinerte Schlackebrocken werden seitlich mittels Schnecke in einen Aschebehälter ausgetragen. Jedoch hat die Bildung von Schlacketeilen möglicherweise Einfluss auf die Verbrennungsgüte. Die Luftzufuhr besonders im Glutbettbereich wird behindert und Teile des Brennstoffs werden nicht optimal thermisch umgesetzt. Dies kann als eine mögliche Ursache für CO-Spitzen gewertet werden.

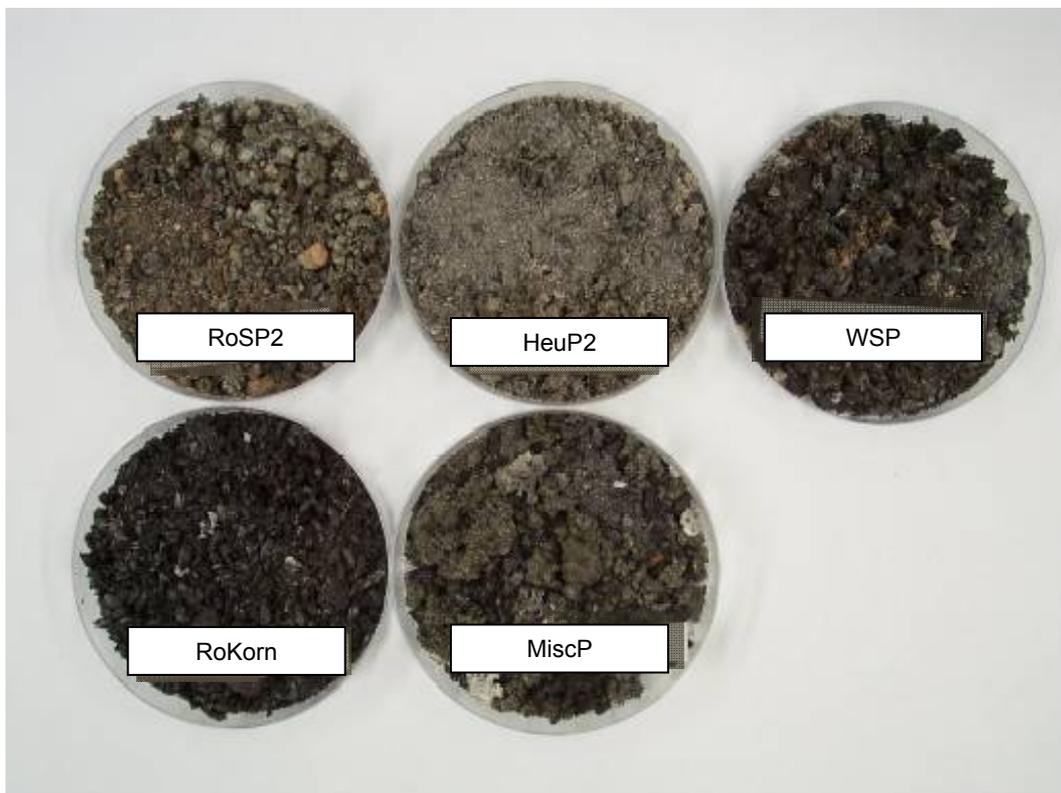


Abbildung 43: Verbrennungsaschen der eingesetzten Brennstoffe im KSM-Kessel 20 kW

Die Verbrennungsaschen der verschiedenen Brennstoffe weisen bis auf die Roggenkornasche sehr niedrige Glühverluste auf (Tabelle 36). Die Asche aus der Verbrennung des Roggenkorns enthält einen großen Anteil unverbrannter organischer Substanz. Dies weist auf einen unvollständigen Ausbrand der Roggenkörner hin, was sich bereits bei dem im Vergleich zu den anderen Brennstof-

fen geringeren Kesselwirkungsgrad und höheren Gesamt-C-Emissionen andeutete. Ähnliches wurde beim Abbrand des Roggenkorns im Guntamatic-Kessel beobachtet.

Außer der Weizenstrohpelletasche weisen die Aschen hohe Gehalte an Kupfer, Arsen oder Cadmium auf und könnten somit nicht als Düngemittel eingesetzt werden.

Tabelle 36: Inhaltsstoffgehalte der Verbrennungsaschen (KSM-Kessel)

Element	eingesetzte Brennstoffe					Grenzwert DüMV
	WSP	RoSP2	RoKorn	HeuP0	MiscP	
TS [%]	98,9	99,7	94,4	99,7	98,7	
GV [% i.TS]	2,1	1,3	42,9	0,8	6,5	
pH-Wert	11,7	10,3	8,1	10,9	10,2	
Nt [% i.TS]	0,1	0,01	1,6	0,0	0,24	
P [% i.TS]	1,8	0,8	9,1	3,6	3,9	
K [% i.TS]	24,4	5,5	12,0	15,1	19,5	
Mg [% i.TS]	2,2	0,7	3,6	2,7	2,6	
Ca [% i.TS]	6,7	7,6	3,5	6,3	6,2	
S [% i.TS]	0,7	0,2	0,4	0,7	0,6	
As [mg/kg TS]	8	319	15	57	8	40
Cd [mg/kg TS]	0,2	0,9	2,9	0,9	1,9	1,5
Pb [mg/kg TS]	6	33	24	39	16	150
Cr [mg/kg TS]	41	57	65	59	67	
Cu [mg/kg TS]	52	105	97	84	84	70
Hg [mg/kg TS]	<0,01	0,07	<0,01	0,01	<0,01	1
Ni [mg/kg TS]	23	30	58	38	50	80
Zn [mg/kg TS]	129	137	954	407	409	1000
TI [mg/kg TS]	0,04	0,04	0,98	0,05	0,94	1

4.3.6 Ergebnisse der Abbrandversuche mit dem Kessel FERRO BIOMAT FBR 90

Die Abbrandversuche mit FERRO-Kessel BIOMAT FBR 90 mit installiertem Wärmetauscher fanden im Winter 2006/2007 auf dem Kesselprüfstand des Instituts für Luft- und Kältetechnik gGmbH statt. Der Kessel mit einer Nennlast von 90 kW für Holzbrennstoffe wurde während der Messkampagne mit halmgutartigen Brennstoffen ca. 20 % (72 kW) unterhalb seiner Nennleistung betrieben. Damit wurde dem spezifischen Abbrandverhalten dieser Brennstoffe und dem größeren Brennraumbedarf Rechnung getragen.

In Abbildung 44 sind die erfassten Emissionen an CO, NO_x und Staub bei der Verbrennung verschiedener Brennstoffe dargestellt.

Die CO-Emissionen lagen unter 200 mg/Nm³ und damit weit unter dem derzeitigen Grenzwert der 1.BImSchV und der geplanten Novelle. Die ungewöhnlich niedrigen CO-Emissionen spiegeln die gute Verbrennungsqualität wider. Bei den Brennstoffen Roggenstrohpellets, Roggenkorn und Heupellets wurden durchschnittlich sogar nur 10 bis 34 mg CO/Nm³ emittiert.

Die NO_x-Emissionen betragen weniger als 500 mg/Nm³. Auch hier wird das Zusammenspiel zwischen den Emissionen an CO und NO_x deutlich. Brennstoffe, die im Abbrand höhere NO_x-Emissionen erzeugten, verbrannten CO-ärmer. Beim Einsatz des Roggenkorns wurden auch hier auf Grund des höheren Gehaltes an Stickstoff im Brennstoff die höchsten NO_x-Emissionen erzeugt. Der Grenzwert der 1.BImSchV für die staubförmigen Emissionen konnte nur beim Einsatz der Roggenstrophpellets eingehalten werden. Hier lagen die durchschnittlichen Staub-Emissionen bei nur 52 mg/Nm³. Bei den anderen Brennstoffvarianten hatte auch der Einsatz des Wärmetauschers keinen positiven Effekt auf die Höhe der Staubemissionen. Ähnliche Ergebnisse erzielte auch HARTMANN 2007 beim Einsatz von Wärmetauschern an einem Heizomat-Kessel. Die Weizenstrophpellets wiesen beim Abbrand die höchsten Staubemissionen mit 555 mg Staub/Nm³ auf.

Damit wäre auch bei diesem Kessel ein emissionsarmer Betrieb nur mit entsprechender Filtertechnik bzw. ausgesuchten Brennstoffchargen möglich.

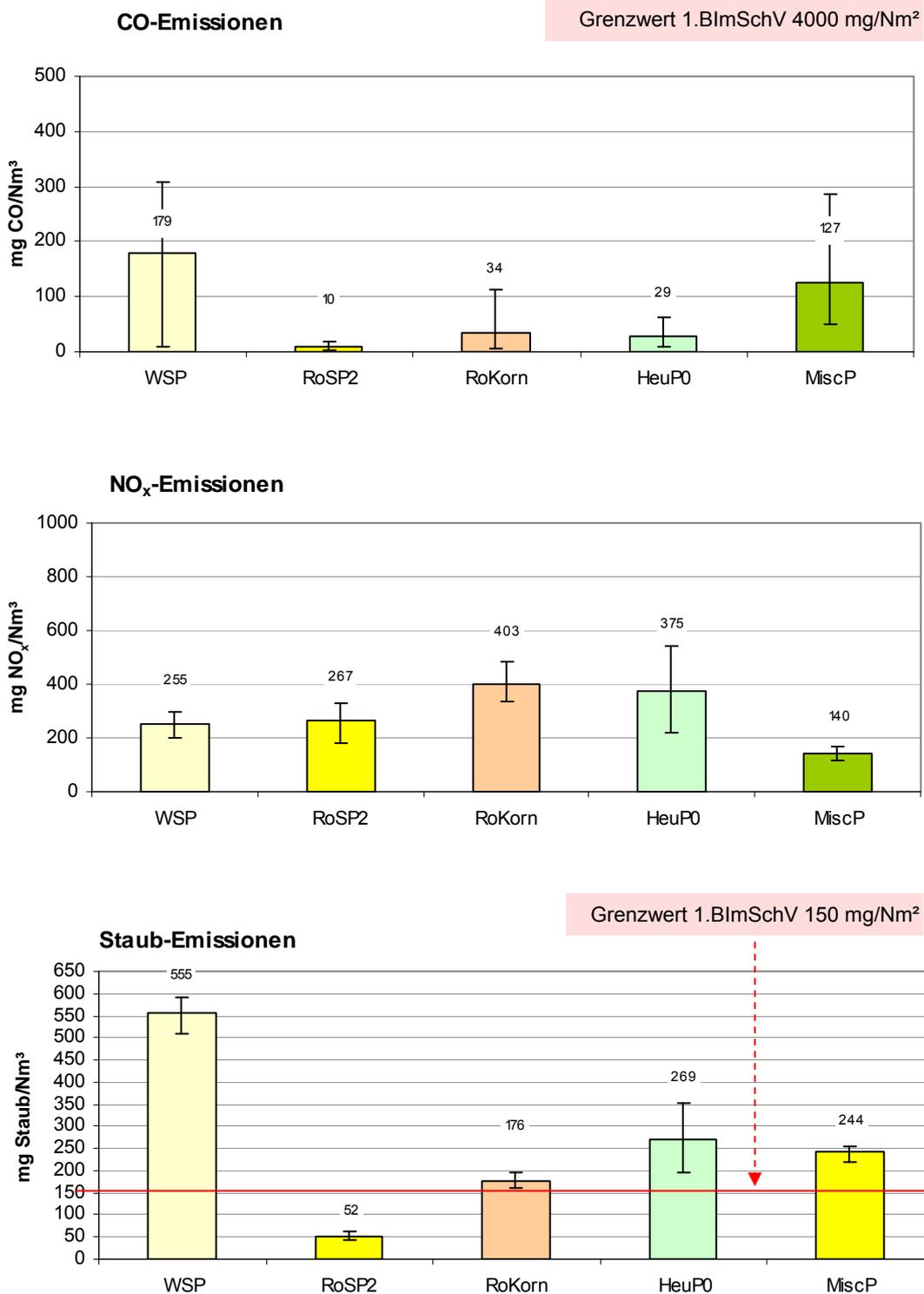


Abbildung 44: Durchschnittliche Viertelstunden-Mittelwerte der Emissionen an CO, NO_x und Staub beim Abbrand verschiedener Brennstoffchargen im FERRO-Kessel BIOMAT 90 kW mit Abgaswärmetauscher

Im Durchschnitt sind ca. 95 % der angefallenen Staubpartikel der Feinstfraktion < 2,5 µm zuzuordnen (Abbildung 45). Bei den Roggenstrohpellets lagen 89 % der Stäube im Partikelgrößenbereich < 2,5 µm. Insgesamt gibt es zwischen den Brennstoffen nur relativ geringe Abweichungen in der Größe der Fraktionsanteile.

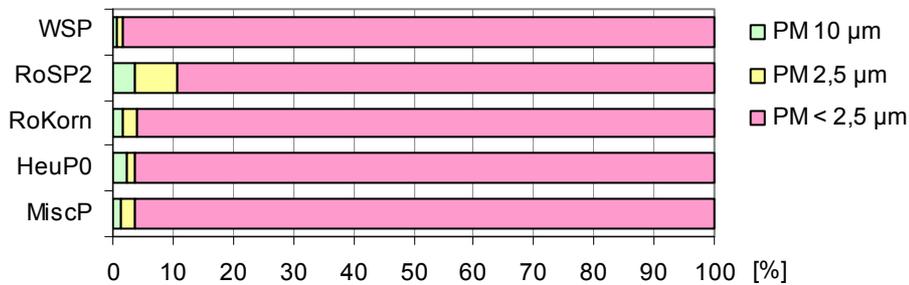


Abbildung 45: Partikelfraktionen der Staubemissionen beim Abbrand verschiedener Brennstoffchargen im FERRO-Kessel BIOMAT 90 KW

Die Kesselleistung betrug bei den eingesetzten Brennstoffen 67 - 75 kW (Tabelle 37). Die erzielten Kesselwirkungsgrade lagen mit 88 – 96 % auf einem sehr hohen Niveau. Dies ist auf die Verwendung des zusätzlichen Wärmetauschers zur Nutzung der sensiblen und latenten Abgaswärme (Brennwertnutzung) sowie den sehr guten Ausbrand zurückzuführen.

Die vom Abgaswärmenutzer neben Ausnutzung der sensiblen Abgaswärme durch Abgaskondensation gewonnene Energie kann exemplarisch für den Brennstoff Roggenkorn dargestellt werden. Der Leistungsgewinn durch Abgaskondensation beträgt für diesen Brennstoff 1,8 kW. Damit führt die um diesen Betrag erhöhte thermische Leistung des Heizkessels zu einer Wirkungsgraderhöhung von 2,5 %.

Tabelle 37: Kesselleistung, -wirkungsgrad und Emissionen an SO₂, HCl und Ges.-C beim Abbrand der Versuchschargen im FERRO BIOMAT FBR 90

Kessel: FERRO BIOMAT FBR 90			Abgaskonzentrationen bezogen auf 13 Vol % O ₂ Durchschnittswerte aller 1/4-Stunden-Mittel		
Brennstoff	Kesselleistung [kW]	Kesselwirkungsgrad [%]	SO ₂ [mg/Nm ³]	HCl [mg/Nm ³]	Ges.-C [mg/Nm ³]
WSP	75	90,3	128	8,2	2,6
RoSP2	74	87,9	134	7,7	1,2
Rokorn	72	96,3	288	9,6	2,6
HeuP0	67	90,5	339	7,5	2,0
MiscP	74	91,8	106	6,2	1,7
Grenzwerte der TA-Luft (FWL > 100 kW, bei 11 % O ₂)			350	30	50

Die SO₂-Emissionen lagen in der Messkampagne bei 106 bis 339 mg/Nm³. Beim Abbrand des Roggenkorns und der Heupellets wurden die höchsten SO₂-Emissionen erfasst. Bei größeren Anlagen wäre der Einsatz dieser Brennstoffe bezüglich der Einhaltung der TA-Luft und der Berücksichtigung des geringeren Bezugssauerstoffgehaltes von 11 % problematisch.

Die Emissionen an HCl lagen beim Abbrand der verschiedenen Brennstoffe bei 6,2 – 9,6 mg/Nm³ und die Ges.-C-Emissionen bei 1 -3 mg/Nm³. Die HCl- und die Ges.-C-Emissionen liegen dabei auf einem sehr niedrigen Niveau. Es kann angenommen werden, dass ein Teil der Emissionen durch den Abgaswäscher ausgewaschen wurde und somit im Kondensat vorliegt. Somit hat der Einsatz des Wärmetauschers einen positiven Einfluss auf diese Emission. Bei den Schwefelemissionen konnte dieser Effekt nicht beobachtet werden. Eine Analyse des Kondensats erfolgte jedoch nicht.

Verschlackungsverhalten

Die Versuchsbrennstoffe zeigten im eingesetzten FERRO-Heizkessel ein unterschiedlich ausgeprägtes Verschlackungsverhalten. Durch die vermutlich relativ hohen Brennraumtemperaturen wird bei allen Versuchsbrennstoffen der Ascheerweichungspunkt überschritten. Es treten deutlich sichtbare Schmelzeffekte in den Aschefragmenten in Form von Versinterungen und Verschlackungen auf. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass für keinen Brennstoff eine Beeinträchtigung des Kesselbetriebs bei längeren Vollastzeiten zu erwarten ist. Durch die Brennraumgestaltung (breit gehaltener Rost) kann sich nur ein relativ dünnes Schlackebett bilden. Daher wird durch die Vorschubbewegung des Rostes auch ein zusammenhängendes Schlackebett in Richtung Ascheaustrag abgefördert. Einflüsse der Verschlackung auf die Verbrennungsqualität konnten für die Brennstoffe in unterschiedlichem Maße festgestellt werden. Die Auswirkungen waren in den Verläufen der Emissionsparameter CO (und Ges.-C) feststellbar. Traten im Rostbereich durch das Aufbrechen von Schlacketeilen plötzliche Veränderungen des stöchiometrischen Verbrennungsluftverhältnisses auf, stiegen kurzzeitig die Temperaturen im Glutbettbereich an, und es traten mehr flüchtige Bestandteile aus dem Brennstoff. Dies hatte ein kurzzeitiges Absenken des Luftverhältnisses zur Folge, und die Verbrennung verlief nicht mehr vollständig. Trotz einer Behinderung der Primärluftzufuhr von der Rostunterseite her blieb aber die Verbrennungsqualität insgesamt auf einem gehobenen Niveau. Proben der bei den Versuchen angefallenen Verbrennungsaschen im Brennraum sind in Abbildung 46 dargestellt.

In Abbildung 47 wird für die Brennstoffe Roggenkorn, Heupellets und Miscanthuspellets das unterschiedliche Verschlackungsverhalten sichtbar. Dargestellt sind die Brennräume mit dem Rost und aufliegender Asche bzw. Schlacke nach den Verbrennungsversuchen. Markant ist dabei eine sehr „fließende“ Schlacke für Miscanthus, während bei dem Heubrennstoff eher Brocken sichtbar werden. Dagegen zeigt der Getreidebrennstoff eine eher krümelige Schlacke mit einzelnen Inseln von zusammengeschmolzenen Aschefragmenten.

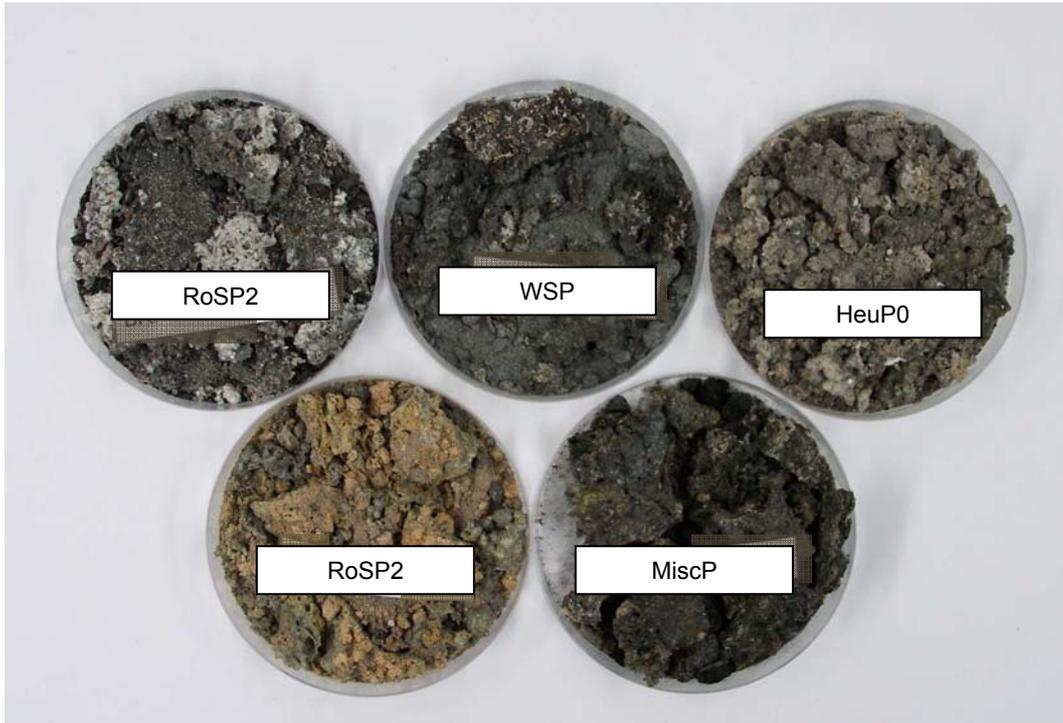


Abbildung 46: Verbrennungaschen der eingesetzten Brennstoffe im FERRO BIOMAT FBR 90

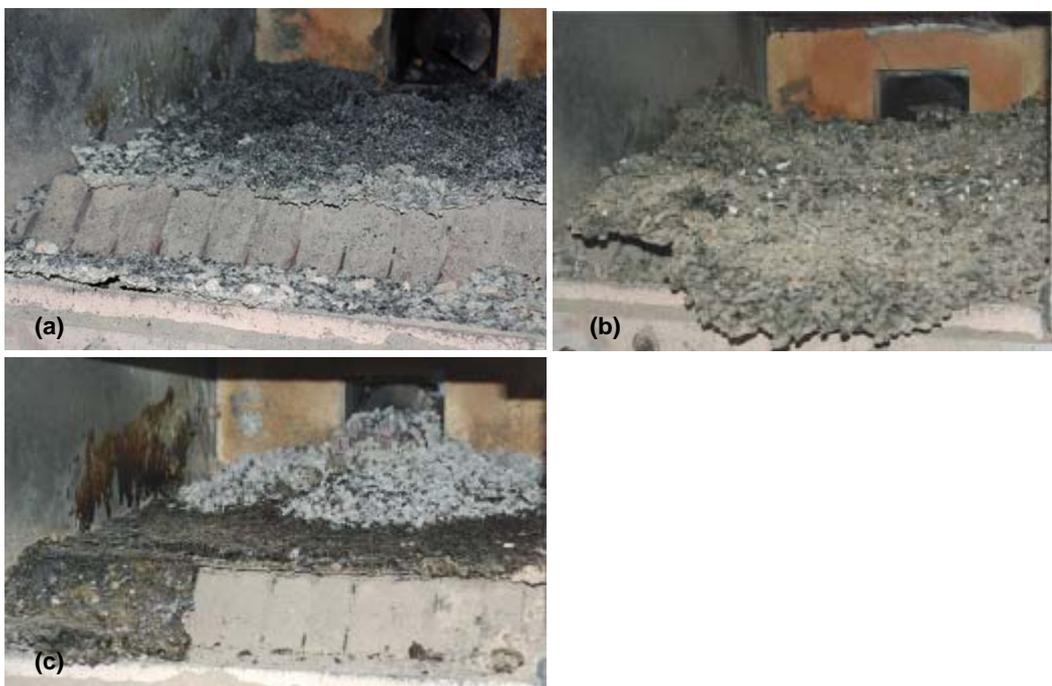


Abbildung 47: Aschen im Brennraum des Kessels FERRO BIOMAT 90 kW nach den Verbrennungsversuchen mit verschiedenen Brennstoffen: (a) Roggenkorn, (b) Heupellets, (c) Miscanthuspellets

Die Glühverluste der Aschen lagen je nach eingesetztem Brennstoff zwischen 0,3 und 9,6 %. Die relativ hohen Glühverluste bei den Roggenkorn- und Miscanthusaschen spiegeln damit nicht die sehr guten Kesselwirkungsgrade und niedrigen Gesamt-C-Emissionen wider.

Außer den Weizenstrohaschen wiesen alle anderen Verbrennungsaschen erhöhte Gehalte an Arsen bzw. Schwermetallen auf. Nach DüMV könnten die Weizenstrohaschen auf Grund des hohen Gehaltes an Kalzium (> 30 % CaO) sowie der geringen Schwermetallkonzentrationen als Kalkdünger eingestuft werden.

Tabelle 38: Inhaltsstoffgehalte der Verbrennungsaschen (Ferro-Kessel 90 kW)

Element	eingesetzte Brennstoffe					Grenzwert DüMV
	WSP	RoSP2	RoKorn	HeuP0	MiscP	
TS [%]	98,9	99,9	96,5	99,9	98,9	
GV [% i.TS]	3,3	0,4	9,6	0,3	8,2	
pH-Wert	10,0	9,9	9,9	10,3	9,6	
Nt [% i.TS]	0,05	0,06	0,19	0,05	0,12	
P [% i.TS]	1,0	0,7	13,1	4,1	2,1	
K [% i.TS]	2,2	1,6	30,0	9,3	4,7	
Mg [% i.TS]	23,4	3,8	19,3	15,3	19,5	
Ca [% i.TS]	28,2	4,6	23,2	18,4	23,5	
S [% i.TS]	1,8	0,5	5,2	2,7	1,8	
As [mg/kg TS]	2	477	64	33	21	40
Cd [mg/kg TS]	0,1	0,9	7,4	0,4	0,2	1,5
Pb [mg/kg TS]	0,01	20	141	11	3	150
Cr [mg/kg TS]	64	57	20	89	100	
Cu [mg/kg TS]	38	59	212	99	73	70
Hg [mg/kg TS]	<0,01	0,09	0,03	0,01	0,01	1
Ni [mg/kg TS]	34	37	10	50	59	80
Zn [mg/kg TS]	47	131	1070	190	44	1000
Tl [mg/kg TS]	0,02	0,25	0,17	0,01	0,01	1

4.3.7 Stoffbilanzen und Stoffströme

An Hand der Ergebnisse der Abbrandversuche 2006/2007 (Guntamatic Powercorn 30, KSM 20 kW, FERRO BIOMAT 90 kW) werden im Folgenden der Einfluss des Brennstoffs auf die Bildung der Emissionen an NO_x, SO_x, Staub näher betrachtet und die Arsen- und Schwermetallströme bzw. -bilanzen dargestellt.

Emission von Stickstoff- und Schwefeloxiden

Der im Brennstoff enthaltene Stickstoff geht bei der Verbrennung fast vollständig als NO, NO₂ und N₂ in das Rauchgas über (HARTMANN 2007). In den Verbrennungsaschen betrug der N-Gehalt nur 0,1 - 0,5 %. Er ist vor allem auf den Anteil unverbrannten Materials in den Aschen zurückzuführen. Die Höhe der NO_x-Emissionen ist demzufolge stark vom N-Gehalt im Brennstoff abhängig (Abbildung 48). Aus den für die einzelnen Kessel dargestellten signifikanten Zusammenhängen (Potenzfunktionen) zwischen dem Brennstoff-N-Gehalt und der NO_x-Emission geht hervor, dass bei N-Gehalten ≥ 1,5 % im Brennstoff mit Emissionen > 500 mg NO_x/Nm³ zu rechnen ist. Aus dieser Sicht ist der Abbrand von Heupellets, Getreidekorn und Rapskuchen kritisch zu bewerten.

Für Kleinf Feuerungsanlagen < 100 kW FWL (Geltungsbereich der 1.BImSchV) besteht derzeit kein Grenzwert für den NO_x-Ausstoß. Erst ab einer Leistung von ≥ 100 kW kommt der Grenzwert der 4. BImSchV (TA Luft) von 500 mg NO_x/Nm³ (bezogen auf 11 % Bezugssauerstoff) zum Tragen. Auch unter diesem Blickwinkel zeichnen sich alle drei Kessel durch niedrige NO_x-Emissionen aus. Dies ist allerdings an die Voraussetzung geknüpft, dass stickstoffarme Brennstoffe eingesetzt werden.

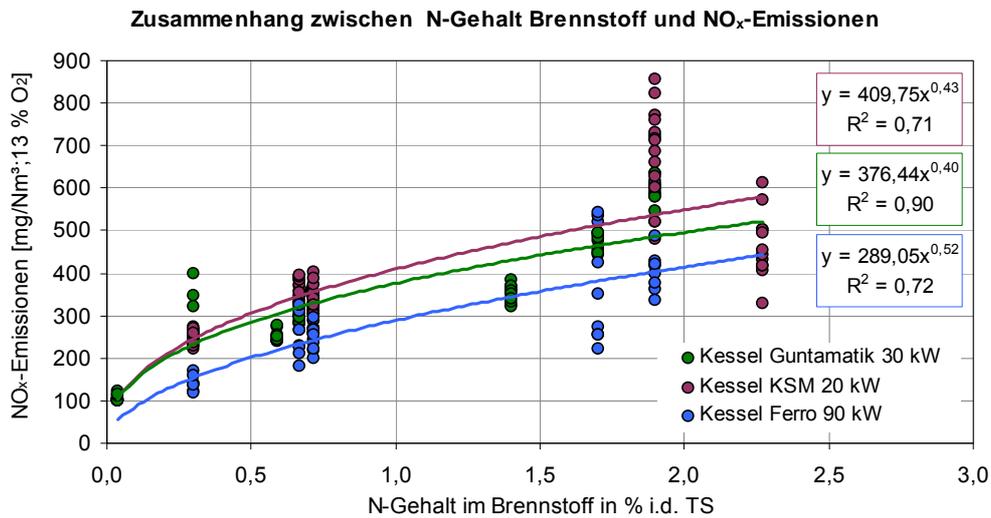


Abbildung 48: Zusammenhang zwischen dem Stickstoffgehalt im Brennstoff und den NO_x-Emissionen, Viertelstunden-Mittelwerte aus Abbrandversuchen mit den Heizkesseln Guntamatik Powercorn 30 kW, KSM 20 kW und Ferro 90 kW

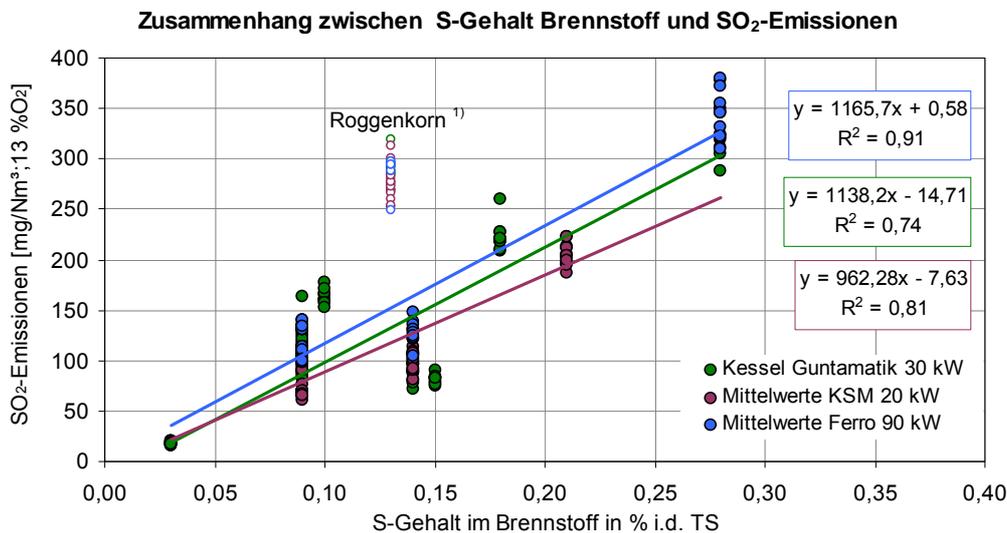
Der im Brennstoff vorhandene Schwefel wird beim Abbrand zum größten Teil unter Bildung von SO₂, SO₃ und Alkalisulfaten mit dem Rauchgasstrom emittiert (OBERNBERGER 1995). Die Verbrennungsaschen wiesen nur einen geringen Schwefelgehalt von ca. 0,5 - 0,7 % auf.

Die Höhe des Schwefelgehaltes im Brennstoff beeinflusst somit in starkem Maße die Konzentration der Schwefelverbindungen im Rauchgasstrom. Dieser signifikante Zusammenhang lässt sich durch lineare Regressionsfunktionen beschreiben (Abbildung 49). Niedrige Schwefelgehalte im Brennstoff (Holz, Getreidestroh, Miscanthus) führen zu einer niedrigen Emissionsrate an SO_x-Gasen.

Für den Ausstoß von Schwefeloxiden besteht im Kleinf Feuerungsbereich < 100 kW (1. BImSchV) kein gesetzlicher Grenzwert. Bei Feuerungsanlagen ≥ 100 kW (4. BImSchV) kann der allgemeine Grenzwert der TA-Luft (Ziffer 5.2.4) von 350 mg SO_x/Nm³ (bezogen auf 11 % Bezugssauerstoff) als Orientierung und Bemessungsgrenze herangezogen werden. Diesbezüglich ist die Verbrennung von Brennstoffen mit Schwefelgehalten > 0,25 % S in der Trockenmasse (Heupellets) kritisch zu bewerten.

Zwischen den Kesseln bestehen in den SO_x-Emissionen nur geringe Unterschiede beim Abbrand schwefelarmer Substanzen.

Die aus den Abbrandversuchen ermittelten regressionsanalytischen Zusammenhänge erlauben eine erste Abschätzung der brennstoffabhängigen Emissionen an NO_x- und SO_x-Gasen für Kleinfeuerungsanlagen.



¹⁾ Messwerte überproportional hoch, daher nicht bei der Regressionsanalyse berücksichtigt.

Abbildung 49: Zusammenhang zwischen dem Schwefelgehalt im Brennstoff und den SO₂-Emissionen, Viertelstunden-Mittelwerte aus Abbrandversuchen mit den Heizkesseln Guntamatic Powercorn 30 kW, KSM 20 kW und Ferro 90 kW

Staubemissionen

Derzeit stellen die bei der Verbrennung von Halmgut entstehenden hohen Staubemissionen eines der größten Probleme beim Einsatz dieser Brennstoffe in Kleinfeuerungsanlagen dar. Halmgut weist einen bis zu 30-fach höheren Aschegehalt als Holz auf. Generell verursachen Brennstoffe mit hohem Aschegehalt auch eine größere Menge an Flugasche. Dieser Zusammenhang zwischen Aschegehalt und Staubemissionen konnte in den Versuchen nicht immer belegt werden (Abbildung 50). So weisen z.B. die Weizenstroh- und Roggenstrohpellets fast identische Aschegehalte (WSP: 6,3 %, RoSP0: 5,7 %, RoSP2: 6,4 %) auf, unterscheiden sich aber in der Höhe der Staubemissionen deutlich. Die Weizenstrohpellets erzeugten beim Abbrand ca. 480 – 587 mg Staub/Nm³ während bei der Verbrennung der Roggenstrohpellets nur 51 - 130 mg Staub/Nm³ emittiert wurden.

Neben dem Aschegehalt des Brennstoffs sind die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Asche (Volumengewicht, Inhaltsstoffe) mit entscheidend für die Höhe der Staubemission. Nach OBERNBERGER 1995 weisen Halmgutaschen ein sehr viel geringeres Schüttgewicht als Holzaschen auf. Man geht davon aus, dass bei der Verbrennung von Halmgut die besonders feinkörnigen

Aschepartikel vom Abgasstrom leichter mitgerissen werden und somit zu erhöhten Staubemissionen sowie Ablagerungen im Feuerraum und an den Wärmetauschern führen (HARTMANN 2007).

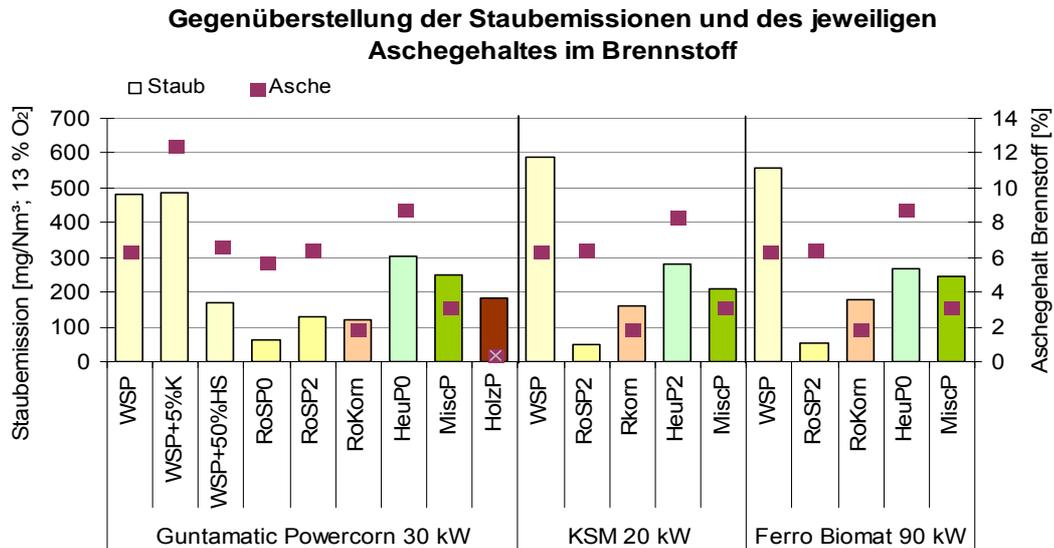


Abbildung 50: Gegenüberstellung der beim Abbrand verschiedener Brennstoffe erfassten Staubemissionen und der Aschegehalte der Brennstoffe; Abbrandversuche 2006/2007; Kessel: Guntamatic Powercorn 30 kW, KSM 20 kW, Ferro Biomat 90 kW

Die unterschiedliche chemische Brennstoffzusammensetzung spiegelt sich auch in den Stoffkonzentrationen der Flugstäube (Filterproben Gesamstaubmessung) wider (Abbildung 51). Bei der Verbrennung von mineralstoffreichem Weizen-, Roggenstroh, Heu und Miscanthus entstehen Stäube, die eine 10-fach höhere Konzentration an Kalium, Chlorid und Sulfat aufweisen als die Flugstäube von naturbelassenem Holz, das in sehr geringer Konzentration diese Mineralstoffe enthält. Die Halmgutstäube bestehen im Durchschnitt aus 25 % Kalium, 27 % Chlorid und 8 % Sulfat, während die Holzpelletstäube nur 3 % Kalium, 4 % Chlorid und 0,2 % Sulfat enthalten.

Je nach Art und Herkunft der halmgutartigen Biomasse (Weizenstroh, Roggenstroh) bestehen je Gramm Feinstaub durchaus gravierende Unterschiede in der Zusammensetzung (Abbildung 51). Die relativ kalium- und schwefelarmen Roggenstrophpellets (RoSP0) überzeugten bei den Abbrandversuchen durch ein niedriges Staubemissionsniveau und geringe Konzentrationen an Kalium, Chlorid und Sulfat in den Flugstäuben. Dies belegt, dass der Gehalt an diesen aerosolbildenden Elementen ausschlaggebend für die Höhe der staubförmigen Emissionen ist.

An Hand der Untersuchungen mit belastetem bzw. stark belastetem Roggenstroh (RoSP2) zeigte sich, dass auch Arsen, Cadmium und Blei in den Stäuben wiederzufinden sind und diese Kontaminanten zu einer Erhöhung der Staubemissionen beitragen. Cadmium spielt anteilmäßig bei der Bildung der Gesamtstaubemissionen nur eine geringe Rolle.

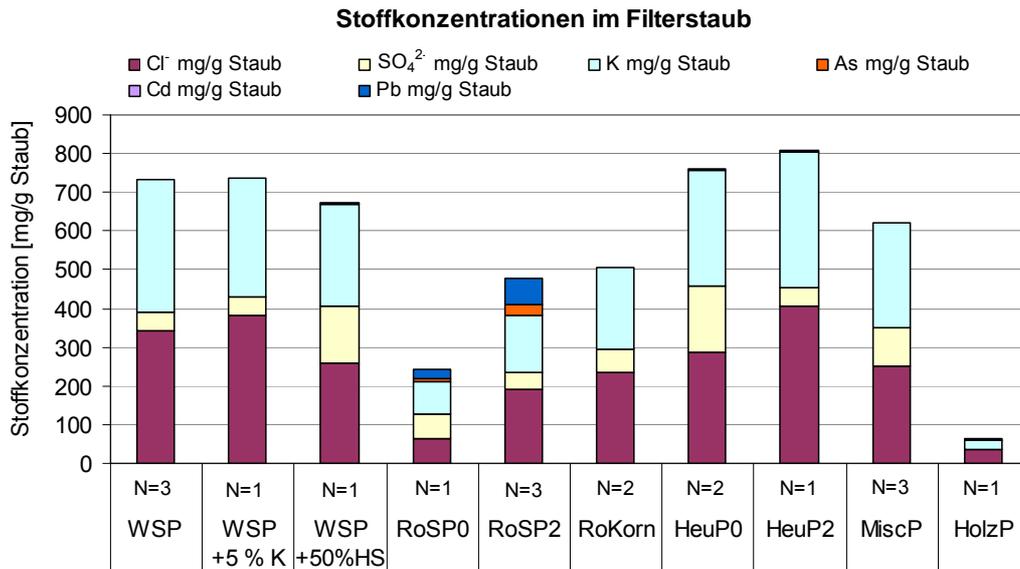


Abbildung 51: Mittlere Stoffkonzentrationen im Filterstaub beim Abbrand halmgut- und holzartiger Brennstoffe, Mittelwerte der Versuche mit den Kesseln Guntamatic 30 kW, KSM 20 kW, Ferro 90 kW

Neben den genannten aerosolbildenden Elementen (K, S, Cl, As, Cd, Pb) sind noch andere Elemente wie z.B. Natrium, Zink, Kupfer, Chrom und Nickel an der Bildung von staubförmigen Emissionen beteiligt (OBERNBERGER 1995, SCHULZE 2002, HARTMANN 2007).

Arsen- und Schwermetallbilanzen

Im Rahmen der Abbrandversuche an den Kleinf Feuerungsanlagen Guntamatic, Powercorn 30, KSM 20 kW und FERRO BIOMAT 90 kW wurde für die eingesetzten Brennstoffe eine Bilanzierung der Stoffströme an Arsen-, Cadmium- und Blei vorgenommen (Tabelle 39). Die Stäube und Aschen, die aus dem Abbrand der belasteten Brennstoffe (Roggenstrophpellets RoSP2, Heupellets HeuP2) resultieren, weisen deutlich höhere Arsen- und Schwermetallgehalte auf als die der unbelasteten Brennstoffe.

Aus diesen Daten wurden Bilanzen berechnet (Tabelle 40). Sie zeigen, dass die im Brennstoff vorliegenden Schwermetalle und Arsenmengen in unterschiedlichem Maße in den Staub- und Aschefrachten eingelagert wurden. Hier ist zu beachten, dass sich auf Grund von Messfehlern bzw. Messtoleranzen der Analysemethoden sowie der in den Aschen enthaltenen unverbrannten Anteile (Glühverluste) die Stoffströme bei geringen Konzentrationen im Brennstoff wie z.B. bei den Weizenstroh-, Miscanthuspellets, Roggenkorn und Holzpellets nur schwer nachverfolgen lassen. Damit können auch die sehr hohen Wiederfindungsraten von weit über 100 % erklärt werden (Tabelle 40). In den weiteren Betrachtungen wurden diese Brennstoffchargen daher nicht mit berücksichtigt.

Tabelle 39: Durchschnittliche Stoffströme von Arsen, Blei und Cadmium bei der Verbrennung verschiedener Biobrennstoffe in verschiedenen Kleinfeuerungsanlagen

Brennstoff	N	INPUT Brennstoff			OUTPUT Staubemission			OUTPUT Asche		
		As [mg/h*kg Brennstoff]	Cd [mg/h*kg Brennstoff]	Pb [mg/h*kg Brennstoff]	As [mg/h*kg Brennstoff]	Cd [mg/h*kg Brennstoff]	Pb [mg/h*kg Brennstoff]	As [mg/h*kg Brennstoff]	Cd [mg/h*kg Brennstoff]	Pb [mg/h*kg Brennstoff]
WSP	3	< 0,01	0,1	< 0,01	0,1	< 0,01	0,5	0,6	0,01	0,4
WSP +5 % K	1	9,8	0,2	12,1	1,1	< 0,01	4,9	5,6	0,01	< 0,01
WSP +50%HS	1	3,0	0,5	20,0	1,2	0,1	7,5	2,2	0,05	1,5
RoSP0	1	27,0	2,0	44,3	7,2	0,4	19,2	10,6	0,03	1,3
RoSP2	3	51,6	2,9	88,9	18,3	1,1	48,2	24,9	0,05	1,6
RoKorn	2	1,1	0,4	2,5	1,1	0,2	2,3	1,0	0,14	2,1
HeuP0	2	7,0	1,9	45,0	1,3	0,6	12,1	2,8	0,03	1,1
HeuP2	1	34,3	2,0	66,9	2,0	0,7	16,0	6,1	0,10	4,2
MiscP	3	< 0,01	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0	0,5	0,03	0,2
HolzP	1	< 0,8	< 0,5	< 5,0	0,1	< 0,01	5,7	< 0,01	0,01	0,1

Tabelle 40: Wiederfindungsraten von Arsen, Cadmium und Blei in den staubförmigen Emissionen und Aschen bei der Verbrennung verschiedener Brennstoffe

Brennstoff	N	Wiederfindungsraten								
		Gesamt %			Staubemission %			Asche %		
		As	Cd	Pb	As	Cd	Pb	As	Cd	Pb
WSP	3	>>100	37	>>100	>>100	20	>>100	>>100	17	>>100
WSP +5 % K	1	69	5*	41	12	0*	41	57	5	0*
WSP +50%HS	1	111	28	45	39	19	38	72	10	7
RoSP0	1	66	21	46	27	20	43	39	1	3
RoSP2	3	84	39	56	35	37	54	48	2	2
RoKorn	2	196	89	179	100	53	94	96	36	84
HeuP0	2	60	32	29	19	30	27	40	2	2
HeuP2	1	24	43	30	6	38	24	18	5	6
MiscP	3	>>100	142	>>100	>>100	103	>>100	>>100	39	>>100
HolzP	1	17	8*	116	12	6	114	5	1	1
Mittel*:		69	33	41	25	28	37	44	4	4

* Mittel aus den Werten der Brennstoffe WSP+50%HS, RoSP0, RoSP2, HeuP0, HeuP2

Die höchste Wiederfindungsrate von ca. 69 % konnte bei Arsen ermittelt werden. Dabei lagen ca. 44 % des Arsens in den Verbrennungsaschen vor und ca. 25 % waren in den Stäuben eingebunden.

Bei Cadmium hingegen war die Wiederfindungsrate mit insgesamt ca. 33 % relativ niedrig. Der größte Anteil an Cadmium wurde in den Stäuben (ca. 28 %) nachgewiesen. Der Cadmiumanteil in den Verbrennungsaschen betrug im Mittel nur 4 %. Aus diesen Bilanzierungsdaten ist abzuleiten, dass Cadmium beim Abbrand hauptsächlich in die gasförmige Phase übertritt und sich überwiegend mit den Flugaschepartikeln im Kessel und an Wärmetauscherflächen ablagert.

Bei Blei konnten ebenfalls nur geringe Wiederfindungsraten gemessen werden. Im Mittel wurden 41 % des Bleies wiedergefunden, dabei lagen ca. 37 % in den Staubemissionen und nur ca. 4 % in den Verbrennungsaschen vor.

Aus den Arsen- und Schwermetallbilanzen ist zu schlussfolgern, dass Cadmium und Blei vorwiegend in die Staubfraktion eingebunden werden, Arsen hingegen liegt überwiegend in der Rostasche vor. Diese Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit, auch biogene Kleinfeuerungsanlagen, insbesondere bei der Nutzung von belasteten Brennstoffen, mit Staubfiltertechnik auszurüsten.

4.4 Fazit der Untersuchungen zur Pelletierung und zum Abbrandverhalten von Biobrennstoffen

Auf Grund der strengen Anforderungen der Bundesemissionsschutzverordnung und dem derzeitigen Stand der Technik auf dem Gebiet der Kesseltechnologien und Rauchgasreinigungssysteme gestaltet sich die Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse zur Wärmeerzeugung in Kleinanlagen im Allgemeinen immer noch schwierig. Hier sind vor allem die beim Abbrand von Halmgütern entstehenden spezifisch hohen Staubemissionen sowie die erhöhte Verschlackungsneigung der Aschen problematisch.

In den Jahren 2005 bis 2007 wurden insgesamt 20 verschiedene Pelletvarianten aus verschiedenen landwirtschaftlichen Biomassen (Weizen-, Roggenstroh, Heu, Miscanthus, Rapspresskuchen), z. T. als Mischvarianten bzw. mit Zuschlägen von Talkum, Kohlensaurem Kalk und Holzspänen hergestellt. Auf Grund aktueller Diskussionen sowie einer bevorstehenden Aufnahme als zugelassener Brennstoff in die 1.BImSchV wurde auch Roggenkorn in die Untersuchungen mit aufgenommen.

Der Großteil der verwendeten Biobrennstoffe stammt von mit Arsen und Schwermetallen kontaminierten Böden. Hier sollte die energetische Nutzung in Kleinfeuerungsanlagen als Alternative geprüft werden.

Bei den Emissionen an NO_x und SO_x konnte wie erwartet ein starker Zusammenhang zwischen den Gehalten an Stickstoff und Schwefel im Brennstoff und den erfassten Emissionen festgestellt werden. Die Verbrennung von relativ stickstoff- und schwefelreichem Rapspresskuchen geht daher auch mit erhöhten NO_x - und SO_x -Emissionen einher.

Die an Hand des im Brennstoff vorhandenen Kalium-/Kalzium-Verhältnisses abgeleitete Verschlackungsneigung bei der Verbrennung konnte durch die Beobachtung in den Abbrandversuchen bestätigt werden. Brennstoffe mit einem hohen Kaliumanteil und einem K/Ca-Verhältnis < 1 neigen somit eher zur Verschlackung. Die Zumischung von Kalk in Form von Talkum oder Kohlensaurem Kalk brachte diesbezüglich deutliche Vorteile. Das Verschlackungsverhalten der Brennstoffe ist auch maßgeblich von der jeweiligen Brennraumtemperatur im Kessel abhängig, somit ergaben sich drastische Unterschiede bei dem Ascheschmelzverhalten der Brennstoffe in den unterschiedlichen Kesseltypen. Beim Abbrand in dem REKA-Kessel kam es zum Teil zu gravierenden Behinderungen des Kesselbetriebes. Besonders schwierig gestaltete sich diesbezüglich die Verbrennung der Heu-

pellets. Durch die Zumischung von 5 % Talkum konnte auch in den Praxisversuchen eine deutliche Verbesserung des Ascheschmelzverhaltens erreicht werden.

Die Höhe der Staubemissionen und die Einhaltung des derzeitigen Grenzwertes der 1. BImSchV von 150 mg/Nm³ waren vor allem von der Brennstoffart und dem eingesetzten Kesseltyp abhängig. Bei einer zukünftigen Verschärfung des Staubgrenzwertes auf 100 mg/Nm³ (Novellierung 1.BImSchV) dürften die meisten der getesteten Brennstoffe nicht ohne geeignete Filtertechnik in den Kesseln verbrannt werden. Nur beim Abbrand von Roggenstrohpellets lagen die Staubemissionen deutlich unter dem geplanten neuen Grenzwert von 100 mg Staub/m³.

Zu beachten ist ferner, dass mit dem Abbrand der unterschiedlichen Biobrennstoffpellets ein sehr hoher Anteil an Feinstäuben $\leq 2,5 \mu\text{m}$ erzeugt wird.

Hinsichtlich der bei der Verbrennung stattfindenden Stoffströme wurde festgestellt, dass Arsen zum größten Teil in den Verbrennungaschen vorliegt, während die Elemente Cadmium und Blei überwiegend mit dem Rauchgasstrom transportiert werden. Dies bedeutet, dass im Hinblick einer Vermeidung des Austrags dieser Schwermetalle eine geeignete Filtertechnik bei der Verbrennung belasteter Chargen eingesetzt werden muss.

5 Anbau von schnellwachsenden Baumarten

Mit dem Anbau von Energiepflanzen wie schnellwachsenden Baumarten bietet sich eine weitere Möglichkeit, kontaminierte landwirtschaftliche Flächen langfristig sinnvoll zu nutzen.

BUNGART (1999) ermittelte beim Anbau verschiedener Pappelklone auf unbelastetem Kippenboden erhöhte Schwermetallgehalte im Erntegut. In den Versuchen der 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. Auf dieser Fläche werden drei Pappel- und fünf Weidensorten hinsichtlich ihrer Standorteignung, des Ertragspotenzials sowie der Schwermetallakkumulation geprüft.

5.1 Versuchsdurchführung und Methodik

5.1.1 Standortcharakteristik und Versuchsanlage

In Zusammenarbeit mit dem Amt für Landwirtschaft Freiberg-Zug und dem Verein zur Förderung von Biomasse und Nachwachsenden Rohstoffen e.V. erfolgte die Auswahl der ca. 2 ha großen Versuchsfläche in Krummenhennersdorf bei Freiberg.

Hier handelt es sich um einen flachgründigen Lössstandort (Lö 6, sandiger Lehm) in Übergangslage zum Verwitterungsboden mit der Ackerzahl 45. Der Vorgebirgsstandort Krummenhennersdorf ist weiterhin gekennzeichnet durch eine

- hohe durchschnittliche Niederschlagssumme von 820 mm/a,
- mittlere Jahrestemperatur von 7,2 °C und
- Höhe von 320 m über NN.

Um die Witterung im Versuchsgebiet der Region Freiberg zu kennzeichnen, wurden die Aufzeichnungen der Wetterstation des Landesamtes für Umwelt und Geologie in Hilbersdorf übernommen. Diese Daten sind auf Grund ihrer Nähe auch für den Versuchsstandort Krummenhennersdorf repräsentativ. In den Versuchsjahren 2005 und 2006 lag die Jahresdurchschnittstemperatur bei 8,2 °C bzw. 8,6 °C und die Niederschlagssumme bei 667 mm bzw. 534 mm. In den Abbildungen 52 und 53 sind die Temperaturverläufe und die Niederschläge der Versuchsjahre 2005 und 2006 monatsweise dargestellt.

Das Jahr 2005 zeigte eine für den Standort typische Jahrestemperatur und Niederschlagssumme, während das Versuchsjahr 2006 durch anhaltende Frühjahrstrockenheit sowie sehr hohe Niederschläge in der Hauptvegetationszeit Juli-August gekennzeichnet war.

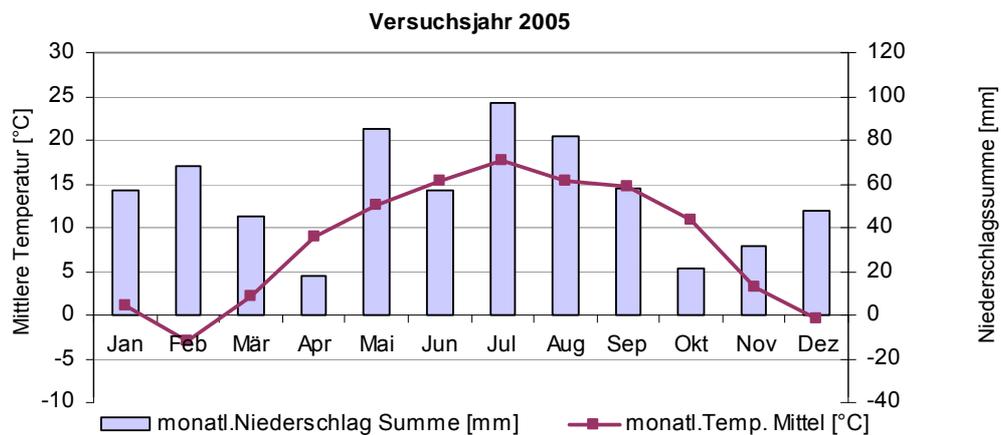


Abbildung 52: Witterungsdaten 2005 am Standort Hilbersdorf

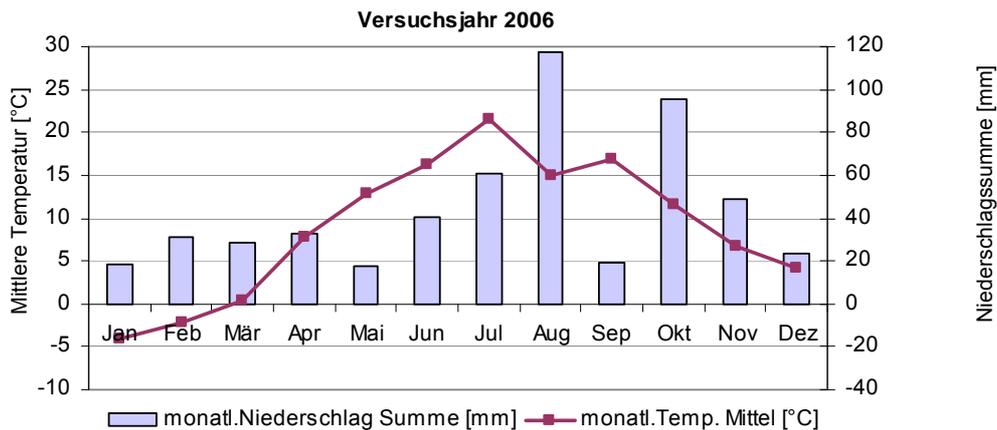


Abbildung 53: Witterungsdaten 2006 am Standort Hilbersdorf

Das Versuchsjahr 2007 war ebenfalls durch eine Frühjahrstrockenheit (März) gekennzeichnet. Im Verlauf des weiteren Jahres wurde der Wassermangel allerdings durch starke und lange Niederschlagsperioden kompensiert. Insgesamt sind die Niederschlags- und Temperaturverhältnisse in der Region für den Anbau von Pappeln und Weiden optimal.

Boden

Die Fläche ist insgesamt nur gering mit Schwermetallen belastet. Der Gehalt an Arsen übersteigt den Prüf- oder Maßnahmewert laut BBodSchV für Grünlandstandorte und weist auch für Ackerland einen hohen Gehalt auf (Tabelle 41 und 42).

Tabelle 41: pH-Wert, Humus- u. Nährstoffgehalte im Boden, 1. Standjahr, Krummenhensdorf

Termin	Tiefe	Nmin kg/ha	pH-Wert	Humus %	P mg/100g Boden	K mg/100g Boden	Mg mg/100g Boden	Nt %	Ct %
5_2005	0 - 30	125	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
11_2005	0 - 20	-	5,7	2,7	3,2	12,4	10,5	0,2	1,5
	0 - 30	58	5,6	2,5	2,6	9,9	9,9	0,1	1,4
	30 - 60	53	5,8	0,8	1,0	4,8	8,9	0,0	0,5
	60 - 90	25	5,7	1,3	1,5	7,4	10,5	0,1	0,8

Tabelle 42: Arsen- und Schwermetallgehalte im Boden, 1. Standjahr, Krummenhensdorf

Termin	Tiefe cm	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Hg mg/kg	Cu mg/kg	Cr mg/kg	Ni mg/kg	Zn mg/kg
5_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.
11_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/maßnahmewert BBodSchV	Acker	200			5				
	Grünland	50	20	1200	2	1300 ¹⁾		1900	

Die Ackerkrume der Versuchsfläche weist mit Ausnahme von Phosphor (Gehaltsklasse B) einen guten bis sehr guten Versorgungszustand (Kalium, Magnesium) auf. Der Gehalt an pflanzenverfügbarem Stickstoff zu Vegetationsbeginn im Pflanzjahr liegt deutlich über dem bodenspezifischen N_{\min} -Standardwert von 55 kg N_{\min} /ha (Bodenschicht 0 – 60 cm).

Der pH-Wert im Boden ist der Gehaltsklasse B (niedrig) zuzuordnen.

Die im Herbst gemessenen Nährstoffgehalte lassen keine Verschlechterung des Nährstoff- und Humusstatus der Versuchsfläche erkennen. Der Boden bietet in seiner bodenchemischen Zusammensetzung der Ackerkrume gute Wachstumsvoraussetzungen für das Gedeihen der schnellwachsenden Pappel- und Weidensorten.

Sortenauswahl und Pflanzgut

Auf Grund der Standortcharakteristik wurden drei verschiedene Pappelklone und fünf Weidensorten für den Anbau in Krummenhennersdorf ausgewählt (Tabelle 43).

Tabelle 43: Pappel- und Weidensorten, Krummenhennersdorf

Variante	Sorte	Kreuzungspartner
Pappeln		
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>
Weiden		
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 Hann. Münden und die Weidensorten wurden von der Firma Agrobränsle AB in Örebro (Schweden) bezogen.

Pflanzung und Pflanzsystem

Nach ausreichender Frühjahrsbodenbearbeitung erfolgte Ende Mai die Pflanzung der Steckhölzer per Hand durch die ortsansässige Baumschule. Mit Blick auf die Ernte- und Pflégetechnik pflanzte man die Steckhölzer im Doppelreihensystem (Abbildung 54). Die Pflanzdichte (11.850 Bäume/ha) ist auf eine mittlere Umtriebszeit (3 - 4 Jahre) ausgerichtet. Die Einzelheiten zur sortenspezifischen Parzellengröße und Steckholzzahl sind Tabelle 44 zu entnehmen.

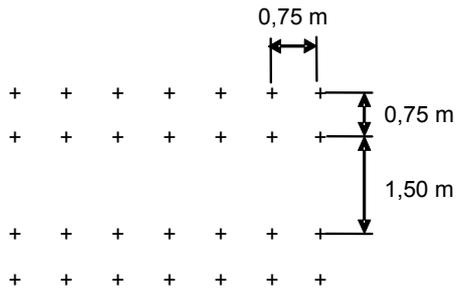


Abbildung 54: Skizze des Doppelreihensystems

Tabelle 44: Anbaufläche und Anzahl der gesteckten Steckhölzer pro Sorte/Klon, Krummenhennersdorf

Art	Sorte	Anbaufläche ha	Anzahl der tatsächlich gesteckten Steckhölzer	
			Stck/Sorte	Stck/ha
Pappel	Weser 6	0,2025	2.217	10.948
	Max 3	0,1620	1.924	11.877
	Hybride	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	0,1878	2.158	11.491

Pflegemaßnahmen

Die Pflegemaßnahmen auf der Versuchsanlage erstreckten sich auf die Pflanzbettvorbereitung, herbizide Maßnahmen und den Bau eines Wildschutzaunes (Tabelle 45).

Um den Unkrautdruck im ersten Standjahr 2005 zu reduzieren, wurde ca. 5 Tage nach der Pflanzung das Herbizid Flexidor ausgebracht. Dieses selektive Vorauf-Herbizid dämmt die Keimung von Samen zweikeimblättriger Unkräuter für etwa drei Monate nach der Pflanzung wirksam ein. In einigen Bereichen der Versuchsfläche trat vermehrt Stumpfblättriger (Großblättriger) Ampfer auf. Um eine großflächige Ausbreitung zu verhindern, erfolgte eine Einzelpflanzenbehandlung (Dochtstreichgerät) mit dem Totalherbizid Glyphos.

Die Versuchsfläche grenzt fast unmittelbar an kleinere Waldstücke an, was in dieser wildreichen Gegend zur Folge hatte, dass die jungen Triebe von Rehwild verbissen wurden. Dies machte den Bau eines Wildschutzaunes an diesem Standort unumgänglich, um eine ordnungsgemäße Versuchsdurchführung zu gewährleisten.

Tabelle 45: Anbau- und Pflegemaßnahmen im 1. und 2. Standjahr auf der KUP Krummhennersdorf

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 (Vorauslauf-Herbizid zur Bekämpfung von aus Samen auflaufenden zweikeimblättrigen Unkräutern), 1 Liter/ha	31. Mai 2005
	Glyphos (Einzelpflanzenbehandlung von großblättrigen Ampfer, Totalherbizid), 200 ml/Gesamtfläche	8. Sep.2005
	Ratron Feldmausköder, 10 kg/ha	3. Nov.2005, 8. April 2006
Zaubau:	Wildschutzzaun 2 m Höhe	10. August 2005

5.1.2 Methodik der Erfassung von Prüfmerkmalen, der pflanzensoziologischen Kartierung und faunistischen Aufnahmen

Durch ein umfangreiches Prüfprogramm, das nachfolgend in seinen methodischen Grundlagen beschrieben ist, werden das Wachstum der Sorten, die Nährstoff-, Arsen- und Schwermetallaufnahme in der Biomasse sowie pflanzensoziologische und faunistische Parameter von der Versuchsfläche erfasst.

Prüfmerkmale und Ertragsparameter

Anwuchsrate und Ertragsparameter wurden wie folgt ermittelt:

- Anwuchsrate: - Aufnahme der gesteckten Steckhölzer je Sorte zur Pflanzung (Mai 2005)
 - Erfassung der ausgetriebenen Steckhölzer je Sorte im Herbst 2005
- Wildschaden: - Erfassung der angefressenen Steckhölzer im Herbst 2005
- Ertragsparameter: - Messung von Wuchshöhe, Wurzelhalsdurchmesser (in 10 cm Höhe),
 Brusthöhendurchmesser (in 1,3 m Höhe) von jeweils 5 x 20 Bäumen/Sorte
 bzw. 5 x 7,5 m Doppelreihe/Sorte in der Vegetation (August) und in der
 vegetationsfreien Zeit (November),
- Ertragschätzung an Hand der Wuchshöhe und des Brusthöhen-
 durchmessers mittels Ertragsfunktion von RÖHLE et al. 2006
- Blatt- und Stängel- - Pflücken von 500 g Blättern der Triebspitzen (5. - 8. Blatt) im August jeden
 analyse: Jahres, Mischprobe je Sorte
- Ernte von vier Bäumen/Sorte in der vegetationsfreien Zeit (November),
 eine Mischprobe je Sorte

Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS 14.0. Es wurde mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$ gerechnet. Das Testen der Nullhypothese erfolgte mit der einfaktoriellen und zweifaktoriellen Varianzanalyse. Konnten signifikante F-Werte ermittelt werden, wurde ein Mittelwertvergleich mit dem Tukey-Test durchgeführt.

Pflanzensoziologische Kartierung

Die pflanzensoziologische Kartierung erfolgte in den Jahren 2006 und 2007 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 (Anhang 2). Dabei haben die aufgeführten Zeichen folgende Artmächtigkeit:

- r: 1-2 Individuen, unter 1 % Deckung
- +: 3-5 Individuen, unter 1 % Deckung
- 1: unter 50 Individuen, unter 5 % Deckung
- 2m: über 50 Individuen, unter 5 % Deckung
- 2a: Deckung 5-15 %
- 2b: Deckung 15-25 %
- 3: Deckung 25-50 %
- 4: Deckung 50-75 %
- 5: Deckung 75-100 %

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

- L: Lichtzahl (1 = Tiefschattenpflanze, 9 = Volllichtpflanze)
- T: Temperaturzahl (1 = Kältezeiger, 9 = extremer Wärmezeiger)
- K: Kontinentalitätszahl (1 = euozeanisch, 9 = eukontinental)
- F: Feuchtezahl (1 = Starkrockniszeiger, 9 = Nässezeiger)
- R: Reaktionszahl (1 = Starksäurezeiger, 9 = Basen- und Kalkzeiger)
- N: Stickstoffzahl (1 = auf stickstoffärmsten Standorten, 9 = auf übermäßig stickstoffreichen Standorten)
- S: Salzzahl (0 = nicht salzertragend, 1 = salzertragend, 9 = auf Böden mit sehr hohem Salzgehalt)

Zum Vergleich der floristischen Ähnlichkeit der Erstaufnahme 2006 mit der Wiederholungsaufnahme 2007 wurde der Präsenz-Gemeinschaftskoeffizient GS nach SOERENSEN (1948) berechnet:

$$G_S = \frac{2c}{A+B} \times 100 = \frac{c}{\frac{1}{2}(A+B)} \times 100$$

- 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

Die Durchführung der faunistischen Untersuchungen erfolgte im 2. und 3. Standjahr (2006/2007) durch den Biologen Ismail Al Hussein aus Halle.

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.

Die zusätzlichen Methoden wie Kescherfänge, Handfänge sowie visuelle Beobachtungen dienten zur Erfassung der in der Kraut- und Strauchschicht lebenden Schädlinge und Nützlinge. Die Bestimmung der Webspinnen (Arachnida: Araneae) erfolgte nach WIEHLE (1956; 1960), GRIMM (1985), ROBERTS (1985; 1987) sowie HEIMER & NENTWIG (1991). Die Nomenklatur richtet sich nach PLATNICK (1993).

Für die Auswertung der gefährdeten Arten wurden die Roten Listen der Bundesrepublik Deutschland (RLD) nach PLATEN et al. (1996) und des Freistaates Sachsens (RLSN) nach HIEBSCH & TOLKE (1996) herangezogen.

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 Gefährdungskategorien bedeuten:

1 = vom Aussterben bedroht

2 = stark gefährdet

3 = gefährdet

R (Sachsen) = Arten im Rückgang

R (Deutschland) = extrem seltene Arten

P = 4 = potenziell gefährdet

V = Arten der Vorwarnliste

V* = unterschiedliche Gefährdungssituation
im Norden und Süden Deutschlands

U = Arten, deren Gefährdungsstatus unsicher ist

Derzeit existieren noch keine einheitlichen Gefährdungskategorien für die Roten Listen Deutschlands und die einzelnen Bundesländer. Einige Kategorien stimmen jedoch überein. Die Anmerkungen zu den ökologischen Ansprüchen der Spinnenarten (Araneae) erfolgten in erster Linie in Anlehnung an PLATEN et al. (1991).

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Anwuchsrate und Wildverbiss

Nach der Anpflanzung der Plantage Ende Mai 2005 erfolgte eine ständige Kontrolle der Bestände hinsichtlich der Anwuchsrate, des Schädlingsbefalls sowie eventueller Schäden durch Wildverbiss (Tabelle 46, Abbildung 55).

Tabelle 46: Anwuchsrate, Wildverbiss und Ausfallraten am Ende des 1. Standjahres, KUP Krummenhennersdorf

Sorte/Klon	Anzahl der Steckhölzer [Stck/Sorte]	Anwuchsrate [%]	Wildverbiss [%]	Ausfallrate [%]
Weser 6	2217	57	0	43
Max 3	1924	92	2	8
Hybride 275	2308	92	5	8
<i>Ø Pappeln</i>		81	2	19
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>Ø Weiden</i>		90	42	10

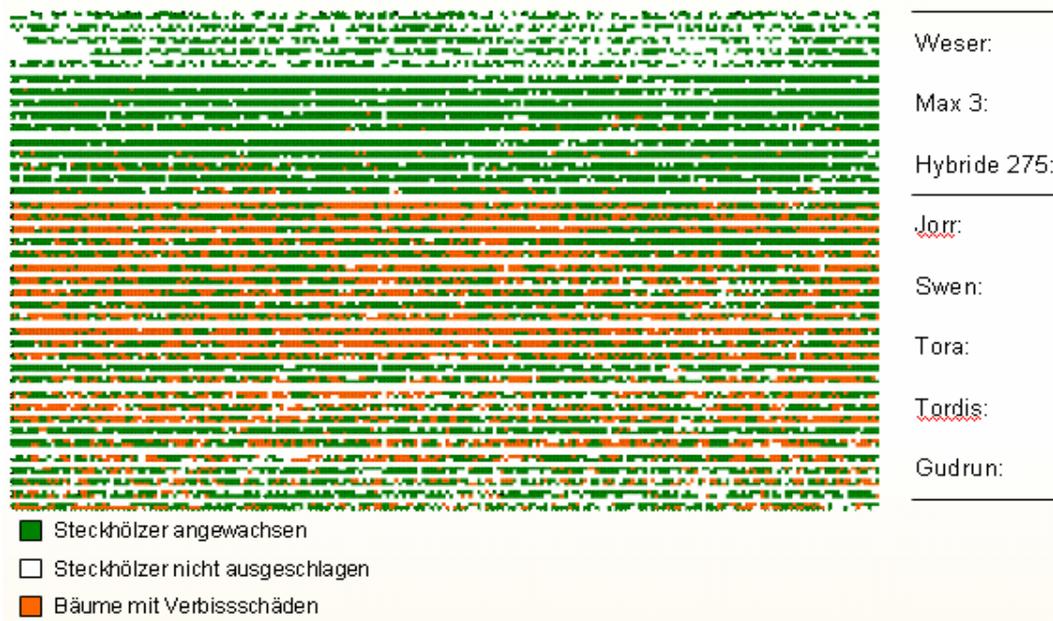


Abbildung 55: Flächenskizze der Anwuchsrate und des Wildverbisses am Ende des 1. Standjahres der KUP Krummenhennersdorf

Die Bonituren zum Anwuchs der Steckhölzer zeigten bei den meisten Pappel- und Weidensorten sehr hohe Anwuchsrate von > 90 %. Wichtige Voraussetzungen für den guten Anwuchserfolg waren das ausreichend tief gelockerte (25 cm), feinkrümelige Pflanzbett, das einen vollständigen Kontakt zwischen Boden und Steckholz gewährleistete sowie die sehr gute Steckholzqualität und das sorgfältige Einpflanzen der Steckhölzer.

Die Sorte Weser 6 wurde als erste Variante unter ungünstigen Witterungsbedingungen gepflanzt. Der Boden war auf Grund starker Regenfälle staunass. Die schlechte Anwuchsrate von 57 % ist wahrscheinlich auf diese schlechten Pflanzbedingungen zurückzuführen.

Bei den Weidensorten ist eine Abnahme der Anwuchsrate von der oberen Hälfte der Fläche nach unten zu verzeichnen. Die Kurzumtriebsplantage (KUP) weist eine leichte Hangneigung auf. Auch hier könnte Staunässe eine mögliche Ursache für die abnehmenden Anwuchsraten sein.

In den ersten zwei Monaten nach der Pflanzung (bis zum Zaunbau) schädigte Rehwild besonders die Weidenpflanzen durch Verbiss der Triebspitzen und jungen Laubblätter. Die Pappelsorten waren davon kaum betroffen (Abbildung 55). Dies führte zu einer stärkeren Verzweigung der Ruten. Totalausfälle durch die von Rehwild verursachenden Fegeschäden (Abziehen der Rinde) konnten durch den Zaunbau verhindert werden. Im Herbst 2005 zeigte sich ein starkes Aufkommen von Mäusen (Abbildung 56). Es erfolgte das Ausbringen von Giftködern (Rodron). Im Frühjahr 2006 waren nur wenige Bäume auf Grund des starken Wurzelverbisses abgestorben. Der Totalausfall beschränkte sich auf ca. 10 bis 20 Weiden auf der Gesamtfläche.



Abbildung 56: Schäden durch Wühlmäuse/Schermäuse

5.2.2 Wachstumsindikatoren und Ertragsparameter

Wichtige Wachstumsindikatoren und Parameter für die Schätzung des Biomasseaufwuchses stellen die Anzahl der Triebe pro Baum, die Gesamthöhe, der Wurzelhalsdurchmesser und der Brusthöhendurchmesser dar.

Die Bonituren der ertragsrelevanten Wachstumsindikatoren erfolgten in der Vegetationsruhe (Oktober 2005 und 2006). Von jeder Sorte wurden an je 100 Bäumen (80 Bäume bei Max 3) die Wuchshöhe, die Triebzahl, der Wurzelhalsdurchmesser sowie der Brusthöhendurchmesser gemessen. Die Stichprobenverteilung erfolgte über alle fünf Doppelreihen der jeweiligen Sorte, d.h. die Messungen wurden an 5 x 20 Bäumen bzw. auf 5 x 22,5 m² je Sorte (Max 3: 4 x 20 Bäume) durchgeführt.

In den Tabellen 47 und 48 sind die Triebzahl pro Fläche bzw. die Häufigkeitsverteilung der Triebe bei den einzelnen Pappel- und Weidensorten zusammengestellt. Die Triebzahl pro Fläche ergab sich aus der Anzahl der gepflanzten Steckhölzer, der Anwuchsrate und der Anzahl der Triebe pro Baum.

Tabelle 47: Triebzahlen der verschiedenen Pappel- und Weidenklone im 2. Standjahr, Krummenhennersdorf

Art	Sorte/Klon	etablierte Steckhölzer [Stck/Sorte]	Triebzahl/ha	
			1.Standjahr	2.Standjahr
Pappel	Weser 6	6.247	10.058	7.559
	Max 3	10.981	14.139	12.903
	Hybride 275	10.528	14.213	12.529
Weide	Jorr	11.551	22.870	23.448
	Sven	11.170	17.761	17.314
	Tora	11.319	19.921	19.581
	Tordis	10.909	18.327	19.526
	Gudrun	8.786	13.003	15.288

Tabelle 48: Arithmetisches Mittel und Median der Anzahl der Triebe bei den Pappel- und Weidensorten im 1. und 2. Standjahr

Sorte/Klon	Standjahr	Mittelwert Triebe/ Baum	Median Triebe/ Baum	Häufigkeit der Triebanzahl/Baum [%]					
				1	2	3	4	5	6
Pappeln									
Weser 6	1. Standjahr	1,6	1	59	30	6	2	2	1
	2. Standjahr	1,2	1	82	15	3			
Max 3	1. Standjahr	1,3	1	73	26	1			
	2. Standjahr	1,2	1	83	18				
Hybride 275	1. Standjahr	1,4	1	68	29	3			
	2. Standjahr	1,2	1	81	19				
Weiden									
Jorr	1. Standjahr	2,0	2	25	53	21	1		
	2. Standjahr	2,0	2	23	54	21	1	1	
Sven	1. Standjahr	1,6	1	57	28	14	1		
	2. Standjahr	1,6	1	60	26	13	1		
Tora	1. Standjahr	1,7	2	43	43	10	3	1	
	2. Standjahr	1,7	2	46	40	10	3	1	
Tordis	1. Standjahr	1,7	2	44	45	10	1		
	2. Standjahr	1,8	2	37	48	14	1		
Gudrun	1. Standjahr	1,5	1	55	42	3			
	2. Standjahr	1,7	2	47	40	6	6	1	

Höchster Wert

Die Pappelsorten bildeten im 1. und 2. Standjahr zum Großteil nur einen Trieb pro Baum (monopodiales Wachstum) aus. Nach der Pflanzung wuchsen viele Steckhölzer mehrtriebzig, jedoch starben die schwächeren Triebe oft wieder ab.

Die Weidensorten zeigten eine stärkere Triebbildung als die Pappelsorten. Hier dominiert die strauchartige Wuchsform. Im Mittel wurden bei den Pappeln ein Trieb und bei den Weiden zwei Triebe pro Steckholz/Baum ausgebildet. Die Sorte Jorr wies mit ca. 23.500 Trieben/ha die höchste Triebzahl pro Fläche auf. Dies ist auf die hohe Anzahl gepflanzter Steckhölzer, die sehr guten Anwuchsraten und die hohen Triebzahlen/Baum zurückzuführen.

Die Weidensteckhölzer zeigten im ersten Standjahr einen schnelleren Austrieb, eine stärkere Verzweigung sowie ein stärkeres Längenwachstum als die Pappelsteckhölzer (Tabelle 49).

Bei den Pappelklonen ist die Sorte Max 3 den anderen Sorten in den ersten zwei Jahren auf dem Standort überlegen. Sie wies die größte Wuchshöhe und den stärksten Wurzelhals- und Brusthohendurchmesser auf.

Die Sorte Tora zeigte bei den Weiden sowie auch im Vergleich mit den Pappelklonen das höchste Wachstum. Die mittlere Wuchshöhe lag schon im ersten Standjahr bei 2,2 m und am Ende des 2. Standjahres bei 4,5 m.

Bei der Weidensorte Gudrun wurde unter den gegebenen Standortbedingungen bisher eine sehr schwache Wuchsleistung ermittelt.

Derzeit lässt sich an Hand der Wachstumsindikatoren noch keine detaillierte Aussage zur Sorteneignung treffen. Die Pappeln zeigten zwar im 1. Standjahr ein niedrigeres Wachstum, jedoch war die Zuwachsrate im 2. Standjahr höher als bei den Weiden. Dies zeigte sich vor allem in stärkeren Stammdurchmessern. Hier bleibt abzuwarten, wie sich der Zuwachs in den nächsten Jahren verhält.

Tabelle 49: Durchschnittliche Wuchshöhe und mittlerer Wurzelhals- und Brusthöhendurchmesser der Pappel- und Weidenklone der KUP Krummenhersdorf

Art Sorte/Klon N	Pappel			Weiden					GD _{5%}
	Weser 6 (100)	Max 3 (80)	Hybride 275 (100)	Jorr (100)	Swen (100)	Tora (100)	Tordis (100)	Gudrun (100)	
Wuchshöhe [m]									
1.Standjahr	1,2	1,4	1,2	1,5	1,8	2,2	2,0	0,9	0,11
2.Standjahr	2,8	3,6	3,1	3,0	3,9	4,5	4,5	2,3	0,15
Zuwachs [%]	135	153	147	107	113	109	122	153	36
Wurzelhalsdurchmesser des Haupttriebes [cm]									
1.Standjahr	1,5	1,5	1,4	1,1	1,3	1,6	1,5	1,0	0,09
2.Standjahr	3,2	3,3	3,0	2,3	2,6	3,1	2,7	1,9	0,17
Zuwachs [%]	112	128	115	101	101	92	82	83	17
Brusthöhendurchmesser des Haupttriebes [cm]									
1.Standjahr	0,3	0,5	0,3	0,4	0,6	0,8	0,7	-	0,08
2.Standjahr	1,3	2,2	1,6	1,3	1,7	2,1	1,9	0,8	0,13
Zuwachs [%]	436	369	495	235	176	163	152	-	40

Höchster Wert

Im Februar 2007 wurde in Zusammenarbeit mit Mitarbeitern des Staatsbetriebs Sachsenforst Graupa und des Forschungsprojektes AGROWOOD der TU Tharandt eine Ertragsschätzung durchgeführt. Dazu erfasste man auf der Fläche Krummenhennersdorf die Wuchshöhe und den Brusthöhendurchmesser und verglich diese mit den Ertragsdaten anderer Kurzumtriebsplantagen in Sachsen. An Hand verschiedener Biomassefunktionen anderer Kurzumtriebsplantagen wurde der Biomasseaufwuchs der zweijährigen Fläche geschätzt (Tabelle 50, Abbildung 57).

Folgende Parameter wurden erfasst bzw. berechnet:

d_g: Durchmesser des Grundflächenmittelstammes = ist der Durchmesser eines Stammes mit der mittleren Querschnittsfläche in 1,3 m Höhe

d_g = Wurzel aus Quadratsumme der Brusthöhendurchmesser (BHD)/ Anzahl

h_m: Mittelhöhe = arithmetisches Mittel der gemessenen Höhen

BM Biomasse = wurde geschätzt über bekannte Biomassefunktionen ähnlicher Flächen. Es wurden nur Flächen mit ähnlichen Durchmesserbereichen berücksichtigt. Der höchste und der niedrigste Wert wurden nicht berücksichtigt.

Es wurde folgende Biomassefunktion nach RÖHLE 2006 bzw. SCHILDBACH 2002 für die Ertrags-schätzung zu Grunde gelegt:

$$BM = a0 \cdot BHD^{a1}$$

Tabelle 50: Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (d_g), Mittelhöhe (h_m) und geschätzter Biomassertrag (BM)(SCHILDBACH 2007) der schnellwachsenden Baumarten im 2. Standjahr, Krummenhennersdorf

Parameter	Pappeln			Weiden				
	Weser 6	Max 3	Hybride 275	Jorr	Sven	Tora	Tordis	Gudrun
Fläche [m ²]	90	67,5	67,5	45	45	45	45	45
Triebzahl/ha	8.444	13.333	13.037	24.889	18.222	22.222	19.556	16.444
d_g [cm]	1,4	1,6	1,4	1,2	1,7	1,7	1,7	0,9
h_m [m]	2,8	3,0	2,9	2,8	4,0	4,1	4,3	2,3
BM [kg/Fläche]	18,3	28,6	20,0	18,0	31,1	39,9	34,8	6,6
BM [t_{atro}/ha]	2,0	4,2	3,0	4,0	6,9	8,9	7,7	1,5

Höchster Wert

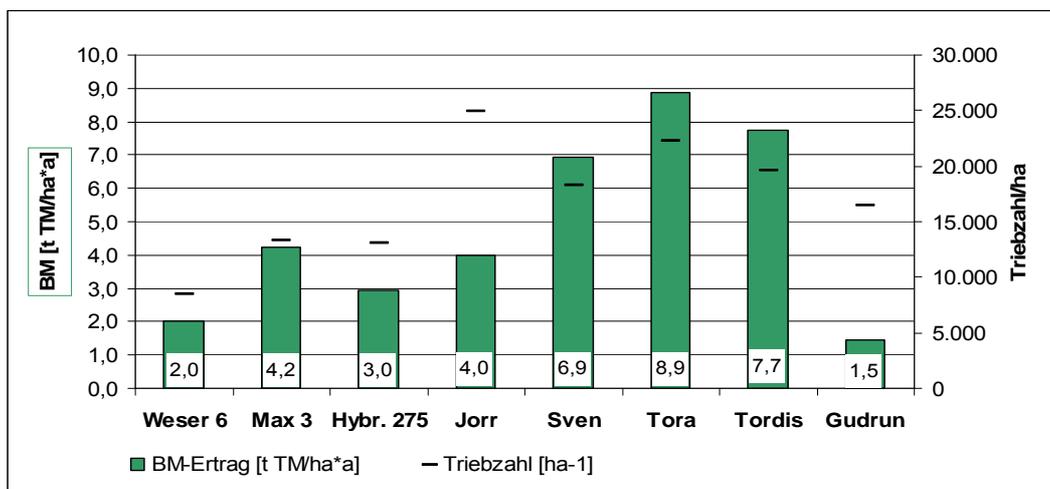


Abbildung 57: Triebzahlen/ha und geschätzte Biomasseerträge der KUP Krummenhennersdorf nach dem 2. Standjahr

Nach der Ertragsschätzung durch SCHILDBACH 2007 zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei dem Vergleich der Ertragsparameter der verschiedenen Sorten. Von den Pappelklonen wurde bei Max 3 der höchste Ertrag mit ca. 8,4 t_{atro}/ha nach zwei Standjahren ermittelt, d.h. 4,2 $t_{atro}/ha \cdot a$. Die Sorte Tora liegt bei den Weidensorten mit einem Gesamtertrag von ca. 17,8 t_{atro}/ha bzw. 8,9 $t_{atro}/ha \cdot a$ vorn.

Die Erhebung der Triebzahl beruht auf der Zählung der Triebe pro Stichprobenfläche und ist daher nicht identisch mit der Auszählung der Gesamtfläche. Wie groß die Abweichung des geschätzten Ertrages vom tatsächlichen ist, wird sich nach der ersten Ernte 2008 zeigen.

5.2.3 Nährstoff- und Schwermetallentzüge

An Hand von Inhaltsstoffanalysen der Blätter und des Holzes werden die Entzüge an Nährstoffen und die Akkumulation von Arsen und Schwermetallen für die Baumarten und -sorten berechnet (Tabelle 51 - 53).

Im August 2006 wurden sortenweise repräsentative Stichproben der Blätter entnommen. Eine Bestimmung der Blattmasse ist nicht erfolgt. Man geht davon aus, dass die Blattmasse 30 % des Ertrages der blattfreien Stämme entspricht.

Die Entzüge an Nährstoffen (N, P, K, Mg) durch das Erntegut (blattfreie Vollbäume) sind bei schnellwachsenden Baumarten im Vergleich zu anderen landwirtschaftlichen Kulturen niedrig. Von den ertragsstärkeren Sorten (Max 3, Tora) wurden ca. 30 – 60 kg Stickstoff, 7 – 9 kg Phosphor und 12 -22 kg Kalium pro Hektar und Jahr entzogen. Dementsprechend kann der Anbau bezüglich der Düngung extensiv erfolgen (Tabelle 53).

In Wertung der Nährstoff-, Arsen- und Schwermetallgehalte der Blätter und Stämme wird deutlich, dass sowohl die Nährstoffe als auch die Kontaminanten überwiegend in der Blattmasse lokalisiert sind. Auf Grund dieser Tatsache ist das Laub wesentlich aschereicher als die Stammbiomasse. Gleichwohl wird über das Erntegut eine im Vergleich zu anderen Kulturpflanzen starke Akkumulatorwirkung durch die schnellwachsenden Baumarten erzielt (Tabelle 53). Über die je Hektar gebildete Holzbiomasse werden je nach sortenspezifischer Ertragsleistung 20 bis 140 g Cadmium/ha entzogen. Geringer ist die akkumulierende Wirkung bei Arsen und Blei ausgeprägt. Von den Mikro-nährstoffen wird vorrangig Zink aufgenommen.

Die Weidensorten zeichnen sich in den ersten beiden Standjahren durch eine stärkere Nährstoff- und Schwermetallaufnahme als die Pappelsorten aus.

Tabelle 51: Gehalte an Nährstoffen, Arsen und Schwermetallen in den Blättern verschiedener Pappel- und Weidensorten (August 2006), Krummenhennersdorf

Sorte	TS [%]	Asche	N	[% i. d. TS]					[mg/kg TS]							
				P	K	Mg	Ca	C	As	Cd	Pb	Hg	Cu	Zn	Ni	Tl
Weser 6	33,9	6,4	2,3	0,2	0,9	0,3	1,7	51,4	0,5	6,3	2,0	0,1	9,9	420,6	1,0	0,01
Max 3	31,7	8,2	2,9	0,3	1,3	0,4	1,8	48,6	0,3	9,5	2,2	0,0	13,2	530,1	0,6	0,01
Hybride 275	34,2	7,3	2,4	0,3	1,0	0,3	1,8	50,4	0,3	11,1	1,8	0,1	11,0	328,7	0,7	0,01
Jorr	33,5	7,3	3,3	0,3	1,1	0,3	1,8	50,6	0,6	15,6	2,4	0,1	11,2	790,3	0,8	0,01
Sven	36,9	8,2	3,0	0,3	0,9	0,3	2,3	49,9	0,5	25,8	3,3	0,1	11,3	880,3	1,0	0,02
Tora	36,4	10,6	3,1	0,3	0,8	0,3	3,3	48,8	0,6	37,6	4,2	0,1	11,2	993,5	1,1	0,02
Tordis	34,5	8,3	3,0	0,3	1,1	0,3	2,4	49,0	0,7	42,8	3,2	0,1	10,9	1050,4	1,5	0,02
Gudrun	36,6	0,9	2,9	0,3	0,8	0,4	2,4	49,4	0,4	31,2	2,9	0,1	9,7	939,6	1,1	0,01

Tabelle 52: Gehalte an Nährstoffen, Arsen und Schwermetallen in den blattfreien Stämmen verschiedener Pappel- und Weidensorten (Nov. 2006), Krummenhennersdorf

Sorte	TS [%]	Asche	N	[% i. d. TS]					[mg/kg TS]							
				P	K	Mg	Ca	C	As	Cd	Pb	Hg	Cu	Zn	Ni	Tl
Weser 6	96,0	2,0	0,5	0,1	0,3	0,1	0,6	49,1	0,1	1,8	1,2	0,01	4,1	71,1	0,0	0,01
Max 3	95,3	2,2	0,7	0,1	0,3	0,1	0,6	48,4	0,1	2,7	1,2	0,01	4,6	114,0	0,1	0,01
Hybride 275	96,3	2,1	0,6	0,1	0,2	0,1	0,6	48,6	0,1	3,8	1,5	0,01	4,3	93,2	0,0	0,01
Jorr	96,0	1,9	0,7	0,1	0,2	0,1	0,6	47,3	0,1	5,8	0,7	0,01	6,0	123,0	0,1	0,01
Sven	95,8	2,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,7	48,0	0,1	7,5	1,0	0,01	6,3	170,0	0,1	0,01
Tora	95,9	2,0	0,7	0,1	0,2	0,1	0,6	44,5	0,1	7,5	0,7	0,01	6,2	104,0	0,1	0,02
Tordis	95,9	1,6	0,6	0,1	0,3	0,1	0,5	48,7	0,1	8,4	0,7	0,01	5,4	140,0	0,7	0,01
Gudrun	95,7	2,6	1,0	0,1	0,3	0,1	0,9	45,9	0,1	9,9	1,3	0,01	5,6	201,0	0,3	0,01

Tabelle 53: Entzüge an Nährstoffen, Arsen und Schwermetallen durch das Ernteprodukt (blatfreie Stämme, 2. Standjahr) verschiedener Papier- und Weidensorten, Krummenhennersdorf

Sorte	geschätzter Ertrag t TM/ha	Entzüge														
		Asche	N	P	K	Mg	Ca	C	As	Cd	Pb	Hg	Cu	Zn	Ni	Tl
		kg/ha							t/ha	g/ha						
Weser 6	2,0	84	22	4	13	4	24	2081	0,4	8	5	0,1	17	301	0,1	0,0
Max 3	4,2	192	58	13	24	8	52	4302	0,6	24	10	0,1	41	1013	0,5	0,1
Hybride 275	3,0	127	38	6	14	6	36	2991	0,4	23	9	0,1	26	574	0,1	0,1
Jorr	4,0	161	57	10	20	6	47	3937	1,2	48	5	0,1	50	1024	0,7	0,1
Sven	6,9	302	105	17	42	12	98	6932	2,0	108	15	0,1	91	2455	1,3	0,1
Tora	8,9	361	120	18	43	12	105	8232	2,0	139	14	0,2	115	1924	1,7	0,4
Tordis	7,7	265	92	15	42	10	73	7859	1,9	136	12	0,1	87	2259	11,5	0,2
Gudrun	1,5	81	32	4	8	2	26	1408	0,4	30	4	0,0	17	616	0,9	0,0

5.2.4 Entwicklung der Begleitflora (pflanzensoziologische Kartierung)

Im Anpflanzjahr 2005 erfolgte die Aufnahme der Begleitflora vor allem mit dem Ziel, die Beikrautentwicklung zu beobachten und bei eventueller Unterdrückung der jungen Pappel- und Weidentriebe geeignete Bekämpfungsmaßnahmen abzuleiten.

Zur Pflanzung war die Fläche optisch fast beikrautfrei. Im Jahresverlauf entwickelten sich verschiedene Kräuter und Gräser. Die Abbildungen 58 und 59 zeigen die Entwicklung der Begleitflora der Pappel- bzw. Weidenbestände zu verschiedenen Zeitpunkten im ersten Standjahr.



Abbildung 58: Entwicklung der Begleitflora im Anpflanzjahr im Weidenbestand



Abbildung 59: Entwicklung der Begleitflora im Anpflanzjahr im Pappelbestand

Von Ende Mai (Pflanzung) bis Anfang September war das Beikrautauftreten auf der Fläche gering, was vor allem auf die Wirkung des Herbizides Flexidor zurückzuführen ist. Dieses selektive Voraufbau-Herbizid dämmt die Keimung von Samen zweikeimblättriger Unkräuter etwa drei Monate lang ein. Ab September begann der Unkrautdruck zu steigen, der Bedeckungsgrad lag bei den Pappeln bei 25 – 50 % und bei den Weiden bei 25 – 30 %. Bei den Arten der Begleitflora im 1. Standjahr handelte es sich um Gemeine Quecke, Einjähriges Rispengras, Geruchlose Kamille, Ackerstiefmütterchen, Ampferknöterich, Ackergauchheil und nesterweise auftretenden Stumpfbliättrigen Ampfer, Ackerkratzdistel und weißer Gänsefuß. Letztere drei Unkrautarten stellten durch ihr

schnelles Wachstum vor allem eine Konkurrenz zu den jungen, langsamer wachsenden Pappeltrieben dar.

In den Jahren 2006 und 2007 erfolgte die pflanzensoziologische Kartierung durch das Ingenieurbüro Landschafts-Planung Dr. Böhnert & Dr. Reichhoff GmbH.

Das Artenspektrum im Jahr 2006 spiegelte den Hochsommeraspekt nach langer Trockenperiode und im Jahr 2007 den Frühsommer- und Hochsommeraspekt nach einem milden feuchten Winter, aber trockenem Vorfrühling wider. Die Gesamtartenlisten sind in Anhang 2 zusammengestellt.

Im Jahr 2006 und 2007 wurden insgesamt je 65 Pflanzenarten in der Krautschicht festgestellt. Damit ist die Gesamtartenzahl im Vergleich zum Anpflanzjahr 2005 deutlich gestiegen. Vom 2. Standjahr (2006) zum 3. Standjahr (2007) ist zwar die Gesamtartenzahl identisch geblieben, aber die Zahl der Moose hat sich auf Kosten der Samenpflanzen leicht erhöht. Die Gesamtartenzahl beider Aufnahmejahre beträgt 85. Dabei wurden im Durchschnitt pro Sortenstreifen in beiden Standjahren ca. 31 Arten ermittelt. Die Deckung der Krautschicht schwankte, unabhängig von derjenigen der Gehölze, durchschnittlich zwischen 60 - 80 % (2006: 50 - 70 %) und hat witterungsbedingt zugenommen (2006 war ein sehr trockener Sommer). Die Höhe der Krautschicht betrug stellenweise ca. 2 m. Die Deckung der Moosschicht ist sehr gering (1 - 3 %) (2006: 1 %), hat aber stellenweise leicht zugenommen.

Auffällige, bestandsbildende Arten, die in allen acht Streifen vorkommen, sind vor allem Acker-Kratzdistel, Gemeine Quecke, Kanadisches Berufskraut, Vierkantiges Weidenröschen, Stumpfblättriger Ampfer und Große Brennnessel. Stete, weniger auffällige Begleiter sind u. a. Küsten-Kamille, Schmalblättriges Weidenröschen, Einjähriges Rispengras und Gewöhnliches Rispengras. Die genannten 10 Arten sind bioindikatorisch wichtige Pflanzenarten, für die Versuchsfläche 2006 wurden 15 Arten benannt (Tabelle 54).

Tabelle 54: Bestandsbildende Arten der Begleitflora auf der KUP Krummenhennersdorf

Art	2006	2007
<i>Apera spic-venti</i>	X	
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	X	
<i>Chenopodium album</i>	X	
<i>Cirsium arvense</i>	X	X
<i>Coryza canadensis</i>	X	X
<i>Elymus repens</i>	X	X
<i>Epilobium angustifolium</i>		X
<i>Epilobium tetragonum</i>	X	X
<i>Fallopia convolvulus</i>	X	
<i>Persicaria maculosa</i>	X	
<i>Plantago major</i>	X	
<i>Poa annua</i>	X	X
<i>Poa trivialis</i>		X
<i>Polygonum aviculare</i>	X	
<i>Rumex obtusifolius</i>	X	X
<i>Trifolium pratense</i>	X	
<i>Tripleurospermum maritimum</i>	X	X
<i>Urtica dioica</i>		X
Artensumme	15	10

Unabhängig von der kaum veränderten Samenpflanzenartenzahl zeigt sich schon von 2006 bis 2007 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 Rot-Klee. Hinzu gekommen sind beispielsweise Wiesen-Bärenklau, Zaun-Wicke und Roter Zahn-trost als Wiesenarten sowie die Ruderalarten Mutterkraut- und Rainfarn-Wucherblume und das Klebrige Greiskraut.

Die Gesamtartenzahl und die durchschnittliche Artenzahl pro Sortenstreifen sind im Vergleich zu bewirtschafteten Äckern und Wiesen als relativ hoch zu bewerten. Die Ursache ist die Artenmischung auf dem ehemaligen Ackerstandort, die noch von der Sukzession bedingt wird. Das leicht vermehrte Auftreten der Moose geht einher mit der zunehmenden Beschattung durch die dichter schließenden Gehölze und der feuchteren Witterung im Jahr 2007.

Die qualitativen (ökologischen) Unterschiede im Artenbestand zwischen den Sortenstreifen sind nur gering.

Als einzige Rote Liste Art konnte das Acker-Filzkraut (*Filago arvensis*) im Streifen der Weidensorte „Gudrun“ bestätigt werden. Diese Art ist gefährdet (Rote-Liste-Status 3). Hinsichtlich der pflanzensoziologischen Klassifizierung wurden die Arten in die folgenden ökologisch-vegetationskundlichen Gruppen eingeteilt (Tabelle 55).

Tabelle 55: Einteilung der Blütenpflanzen (Phanerogamen) in ökologische Gruppen

Ökologische Gruppe	Artenzahl Phanerogamen		Anteil an Gesamtartenzahl Phanerogamen	
	2006	2007	2006 (n = 62)	2007 (n = 59)
Ackerwildkräuter	22	13	36 %	22 %
Ruderalarten	15	16	24 %	27 %
Wiesenarten	20	21	32 %	36 %
Waldarten	5	9	8 %	15 %
Artensumme	62	59	100 %	100 %

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 Stumpfbläättriger Ampfer, auch gruppenübergreifend ruderal verhalten. Im Jahr 2007 überwiegen Wiesenarten (21), gefolgt von Ruderal- und Ackerarten (16, 13). Im Vergleich zu 2006 haben die Ackerarten deutlich abgenommen, die Waldarten zugenommen.

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 können folgendermaßen zugeordnet werden:

Ökologischen Gruppe	2006	2007
Ackerarten:	8	3
Ruderalarten:	3	3
Wiesenarten:	4	3
Waldarten:	-	3
Artensumme:	15	10

Somit wird auch mittels der Indikatorarten die begonnene Artenumschichtung deutlich. Für die Auswertung der ökologischen Zeigerwerte wurden die jeweiligen Mittelwerte aller Arten berechnet (Tabelle 56). 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 beiden Aufnahmejahren treten nur minimale Unterschiede auf, die noch keine Tendenzaussagen erlauben.

Tabelle 56: Artenzusammensetzung nach ökologische Zeigerwerten

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

Den floristischen Vergleich von Erst- und Wiederholungsaufnahme zeigt Tabelle 57. Hier werden die großen floristischen Unterschiede in jedem der acht Sortenstreifen zwischen den beiden Jahren deutlich, die durch Werte unter 60 dokumentiert werden. Wie oben schon erläutert, trägt dazu wesentlich der Ausfall kurzlebiger Ackerwildpflanzen bei.

Tabelle 57: Floristischer Vergleich der Erst- und Wiederholungsaufnahmen 2006/ 2007

Sorte/Klon	Präsenz-Gemeinschaftskoeffizient 2006/2007
Pappel Weser	50,0
Pappel Max3	37,5
Pappel H. 275	46,2
Weide Jorr	41,5
Weide Sven	57,2
Weide Tora	47,9
Weide Tordis	49,3
Weide Gudrun	52,6

Unter der Annahme, dass die Weiden und Pappeln bis zur Ernte im Jahr 2008 einen höheren Kronenschlussgrad erreichen als in Aufnahmejahren 2006 und 2007, ist mit einer verstärkten Beschattung der Krautschicht zu rechnen. Weiterhin werden sich auch innerhalb der Krautschicht durch fortschreitende Sukzession die begonnenen Artenumschichtungen fortsetzen. Es wird davon ausgegangen, dass keine Bewirtschaftung (Mahd, Beweidung, Herbizideinsatz usw.) auf der Versuchsfäche erfolgt. Daraus lassen sich folgende Entwicklungen vorhersagen:

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 werden sich konkurrenzkräftige und meist ausdauernde Arten vermutlich ausdehnen (z.B. Acker-Kratzdistel, Gewöhnliche Quecke, Brombeere, Himbeere, Stumpfbältriger Ampfer, Große

Brennnessel, Berg-Ahorn, Birke, Esche, Schwarzer Holunder). Diese Arten gelten als Ruderal-, Wiesen- und Waldarten.

Gefährdete Arten werden vermutlich verschwinden (Acker-Filzkraut).

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

Die ökologischen Zeigerwerte werden im Durchschnitt der Arten etwas abnehmen. Das bedeutet, dass der Licht- und Wärmeanspruch nicht mehr so hoch sein wird – das entspricht der Zunahme von Ruderal- und Waldarten.

Da aber in regelmäßigen Abständen ein Kurzumtrieb erfolgen soll, wird die zunehmende Beschattung immer wieder auf den Ausgangswert mit hohem Lichtgenuss zurückgesetzt, so dass sich keine Waldschattenflora einstellen kann. Wegen der regelmäßigen Dynamik von Licht und Schatten nach der jeweiligen Rotation kann die Artenzahl relativ hoch sein, wird aber wahrscheinlich unter den Ausgangswert von 65 Arten sinken. Andererseits könnte eine fehlende Pflege (Mahd, Schafe) auch dazu beitragen, dass sich auf Dauer nur wenige konkurrenzkräftige Arten durchsetzen werden (Brombeeren, Brennnessel). Beispiele von Wiesen im unteren Osterzgebirge, die schon längere Zeit aufgelassen wurden, könnten diese Vorhersage der starken Artenverarmung für die Versuchsfäche stützen.

Ein Vergleich mit neu angelegten Heckenstreifen ist schwierig. Wenn Heckenstreifen in der Ackerslandschaft 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 naturschutzfachlich wertvoll sein (Krautschicht). Ob sich bei den Voraussetzungen auf der Versuchsfäche (Ackerstandort, relativ viele Ruderalarten) eine ähnliche Situation einstellen wird, kann vorläufig nicht vorhergesagt werden.

Insgesamt zeigt sich, dass es von 2006 zu 2007 in der Gesamtartenzahl bisher kaum Unterschiede gibt, dass aber in jedem Sortenstreifen schon große floristische Veränderungen stattgefunden haben. Ursachen sind die zunehmende Beschattung des ehemaligen Ackerstandortes im Zuge der beginnenden Vorwaldbildung.

Es wird empfohlen, die pflanzensoziologische Kartierung jährlich zu wiederholen. Um bessere Vergleiche zu ermöglichen, wären außerdem ähnliche Untersuchungen auf anderen Standorten wünschenswert.

5.2.5 Faunistische Untersuchungen

Schwerpunkt der Untersuchungen war es, eine Inventarisierung der epigäischen (oberirdischen) Fauna auf der Versuchsfläche (Pappel und Weide) vorzunehmen und aus landschaftsökologischer Sicht zu bewerten sowie die Ergebnisse der zwei Versuchsjahre miteinander zu vergleichen. Die Untersuchungen erfolgten auf den Flächen von je zwei Pappelklonen (Max 3, Hybride 275) und Weidensorten (Jorr, Tora).

Ein direkter Vergleich beider Untersuchungsjahre ist in diesem Fall nicht möglich, da die Untersuchungen im Jahre 2006 nur in der Herbstperiode stattfanden. Im Gegensatz dazu fanden die Untersuchungen im Jahre 2007 vom Frühjahr bis zum Herbst statt. Deshalb ergaben sich in beiden Untersuchungsjahren sehr unterschiedliche Artenspektren und Dominanzverhältnisse.

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.

In den vier untersuchten Sortenstreifen ließen sich in den Jahren 2006 und 2007 hohe Arten- und Individuenzahlen an **Webspinnen** feststellen (Anhang 3). Die Ergebnisse des Jahres 2006 geben dabei nur das Artenspektrum der Herbstperiode wieder.

In den zwei Untersuchungszeiträumen konnten mittels Barberfallen insgesamt 811 Individuen in 28 Arten (2006) bzw. 2566 Individuen in 58 Arten (2007) nachweisen werden. Die Artenzahlen in den einzelnen Sortenstreifen variierten zwischen 11 und 18 (2006) bzw. 29 und 38 (2007).

In beiden Untersuchungsjahren dominierten die Baldachinspinnen (Linyphiidae) *Oedothorax apicatus* in allen Varianten. Ihr Individuen-Anteil machte im Jahre 2007 im Vergleich zum Vorjahr (2006: 74 %) aber nur 58,9 % an der Gesamtzahl der adulten Webspinnen aus. Diese eurytope Linyphiide stellt die häufigste Art der Agrarflächen Mitteleuropas dar. Des Weiteren zählten die Baldachinspinnen (*Centromerita bicolor*, *Erigone atra* und *Oedothorax retusus*) sowie die Wolfspinnen (*Pardosa lugubris*, *Trochosa ruricola* und *Trochosa terricola*) zu den dominanten Arten. *Trochosa ruricola* und *Trochosa terricola* sind eurytop und bevorzugen ausdauernde Ruderalfluren, Frischwiesen und –weiden sowie hygrophile Therophytenfluren, Queckenfluren und subatlantische Ginsterheiden. Bemerkenswert erscheint 2007 auch der hohe Anteil an juvenilen Wolfspinnen (Gattung *Pardosa*)

in allen Versuchsgliedern. Sie machten etwa ein Drittel der erbeuteten Webspinnen aus. Sie zählen höchst wahrscheinlich zu der Artengruppe „*Pardosa lugubris*-Gruppe“. Bei juvenilen Webspinnen ist keine Bestimmung bis zur Art möglich, da die zur Determination erforderlichen Geschlechtsmerkmale noch nicht ausgebildet sind. Manche Jungspinnen lassen sich aber zumindest einer Gattung zuordnen.

Zu den **Rote-Liste-Arten** im Freistaat Sachsen gehören vier gefährdete Arten (*Arctosa perita*, *Drassyllus praeficus*, *Ozyptila claveata* und *Ozyptila simplex*) und die potenziell gefährdete Wolfspinne *Xerolycosa miniata*. Diese gefährdeten Spezies sind xerophil und kommen vorwiegend auf Sandtrockenrasen sowie ausdauernden Ruderalfluren vor.

Laufkäfer werden aufgrund ihrer teilweise sehr spezifischen ökologischen Ansprüche wie die Webspinnen z.B. im Naturschutz und in der Agrarökologie für angewandte Fragestellungen herangezogen. Sie gelten als die am besten erforschte Insektengruppe Mitteleuropas. Die große Breite ihrer Umweltansprüche zusammen mit einer weitgehenden Kenntnis ihres artspezifischen Verhaltens gegenüber wichtigen Umweltfaktoren begründet die herausragende Eignung der Laufkäfer als Indikatororganismen. So sind einige Arten regelrechte Zeigerarten für ein bestimmtes Habitat bzw. eine bestimmte Habitatsqualität. Artenzusammensetzung und Artenreichtum der Laufkäferfauna an einem Standort lassen Rückschlüsse auf dessen Qualität zu, d.h. dessen Natürlichkeit bzw. Gestörtheit.

In beiden Untersuchungsjahren erwiesen sich die Laufkäfer in allen Sortenstreifen als arten- und individuenreich, so dass sich im Jahr 2006 insgesamt 1.529 Individuen aus 33 Arten und in 2007 insgesamt 2.155 Individuen aus 56 Arten feststellen ließen (Anhang 3).

Die individuenreichsten und auch eudominanten Carabiden waren im Jahr 2007 die eurytopen und weit verbreiteten Arten *Harpalus rufipes*, *Poecilus cupreus*, *Bembidion lampros* sowie *Harpalus affinis*. Als dominante bzw. subdominante Arten konnten *Amara communis*, *Amara aenea*, *Trechus quadristriatus*, *Poecilus versicolor* und *Pterostichus melanarius* eingestuft werden. Diese häufigen Arten sind eurytop und kommen hauptsächlich auf Ackerunkrautfluren, Ruderalfluren, Feldrainen und Hecken vor.

Es wurden zwei Rote-Liste-Arten (Freistaat Sachsen), die „Körnerwarze“ *Carabus cancellatus* (RLSN Gef.Kateg. 3) und *Amara ovata* (RLSN Gef.Kat. R) sowie vier bundesweit gefährdete Arten ermittelt.

Die drei erfassten Vertreter der Gattung *Carabus* (*C. cancellatus*, *C. granulatus* und *C. nemoralis*) gehören zu den nach der Bundesartenschutzverordnung besonders geschützten Arten. Sie wurden nur mit wenigen Individuen in den Bodenfallen erbeutet. Diese eurytopen *Carabus*-Arten kommen hauptsächlich in Gehölzbeständen wie Wäldern, Parks, Hecken und auch in Kahlschlägen vor.

Insgesamt betrachtet wurden sowohl die Spinnenfauna als auch die Laufkäferfauna dieses Standorts in beiden Untersuchungsjahren durch Arten bestimmt, die Ackerunkrautfluren, ausdauernde Ruderalfluren, Gehölze bzw. Hecken und frische, wenig beschattete Offenlandbiotope mit Gräsern präferieren.

Arten, die speziell auf durch Schwermetalle belasteten Flächen vorkommen, konnten in keiner Tiergruppe nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Zoozönose auf der Untersuchungsfläche in Krummenhennersdorf immer noch durch Arten der Ackerunkrautfluren geprägt ist. Der Anteil an Feuchte liebenden, Gehölzbestände oder sogar Wälder bevorzugenden Arten war sehr hoch. Auffallend waren die hohen Fangzahlen der in der Regel im Frühjahr aktiven Arten der typischen Ackerunkrautfluren, *Oedothorax apicatus* (Araneae) und *Poecilus cupreus* (Carabidae). Andererseits kommen die hier nachgewiesenen Vertreter der Gattung *Carabus* an überwiegend feuchten, bewaldeten Stellen vor. Sie sind vermutlich aus dem links neben der Anlage liegenden alten Gehölzstreifen eingewandert. Ebenso die hygrophile, in Wäldern lebende Art *Cychrus caraboides*, welche sich vorwiegend von Gehäuse-schnecken ernährt. Bemerkenswert ist auch der starke Rückgang der Dichte einiger Arten wie *Calathus fuscipes* und *Calathus ambiguus* im Untersuchungsjahr 2007. Beide Arten zählten im Jahre 2006 zu den dominanten Arten. Dies könnte auf die Veränderungen der mikroklimatischen Bedingungen in der Versuchsanlage (weniger Licht, höhere Feuchte und Beschattung etc.) zurückgeführt werden.

In der Gesamtschau verdoppelten sich im zweiten Untersuchungsjahr die Artenzahlen sowohl bei den Webspinnen als auch bei den Laufkäfern (Abbildungen 60 und 61). Die Dominanzverhältnisse waren auch im Jahre 2007 ausgeglichener als 2006.

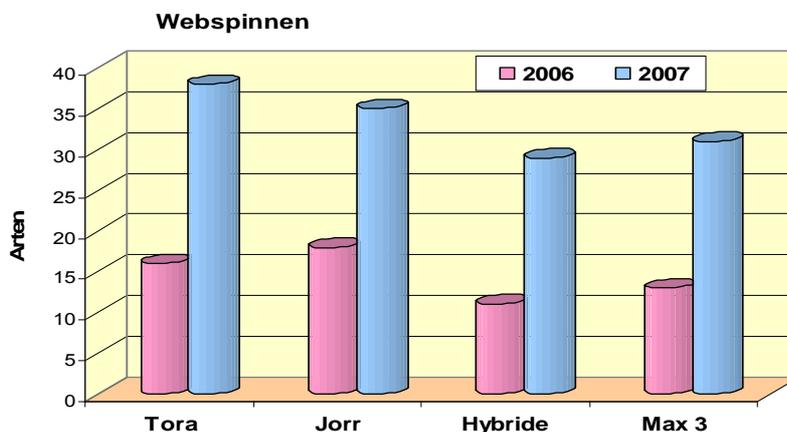


Abbildung 60: Vergleich der Artenzahlen der Webspinnen (Araneae) am Versuchsstandort Krummenhennersdorf in den Jahren 2006 und 2007

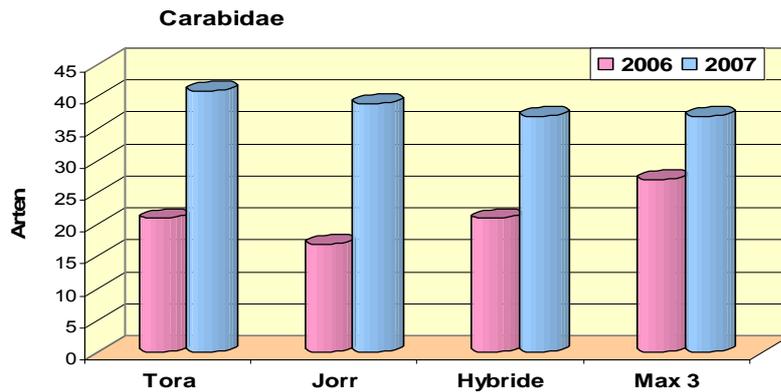


Abbildung 61: Vergleich der Artenzahlen der Laufkäfer (Carabidae) am Versuchsstandort Krummenhennersdorf in den Jahren 2006 und 2007

Nutzarthropoden

Die Ergebnisse zu den „weiteren Nützlingen“ beruhen auf Beifängen aus Bodenfallen, Kescherfängen und Handfängen (Tabelle 58). 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*). Der Siebenpunktmarientkäfer (*Coccinella septempunctata*) konnte nur vereinzelt beobachtet werden. Des Weiteren wurden in den Bodenfallen die zu den Räubern zählenden Aaskäfer (*Silphidae*), insbesondere *Silpha obscura* (sehr selten) und *Necrophorus vespilloides* (sehr häufig) sowie Ohrwürmer (Dermaptera), insbesondere der Gemeine Ohrwurm (*Forficula auricularia*), in relativ hoher Anzahl gefangen.

Schadinsekten

Gartenlaubkäfer (*Phyllopertha horticola* LINNÉ)

Der Gartenlaubkäfer aus der Familie der Blatthornkäfer (Scarabaeidae) zählt zu den wichtigsten Rasenschädlingen. Er trat Ende Mai/Juni 2007 in Massen auf den Bäumen der Versuchsanlage auf. Die Käfer sind 8 - 12 mm groß, mit dunkelgrünem, fast schwarz metallisch glänzendem Halsschild und rotbraunen, behaarten Flügeldecken. Die Adulten leben ca. 3 - 20 Tage. Die Flugzeit der Käfer liegt im Zeitraum von Ende Mai bis Anfang Juli. Der Käfer kommt in Europa, Sibirien und der Mongolei vor. Die Adulten ernähren sich vom Laub der Sommerlinde, Apfel, Birne, Hasel, Hainbuche, Robinie, Rose und anderen Bäumen, sogar von Erbsen- und Bohnenblättern (Reifungsfraß der Weibchen). Die Weibchen graben sich zur Eiablage in den Boden ein. Im jährlichen Lebenszyklus entwickelt der Käfer in der Regel eine Generation. Die Hauptschäden bei Kulturpflanzen werden durch die Larvenstadien verursacht. Die Larven ernähren sich anfangs (1. Stadium) von humosen Bodenbestandteilen. Später (2. und 3. Larvenstadium) fressen sie hauptsächlich an Wurzeln von Gräsern, aber auch an anderen Pflanzen. Befallsfördernd wirkt sich ein warmer Herbst ohne frühe

Frosteinbrüche aus, ferner allgemein warmes und feuchtes Klima sowie gut drainender Boden (RIECKMANN und STECK 1995).

Weidenbaumläuse (*Tuberolachnus salignus* (Gmelin))

Die Weidenlaus (*T. salignus*) trat in den Sommermonaten dieses Jahres in großen und dichten Kolonien an den Stämmen und Ästen der Weidenbäume auf (alle Weidensorten). Sie verursacht aber keine wirtschaftlich bedeutenden Schäden (MITTLER 1957).

Unter den Blattkäfern (Chrysomelidae) trat der leicht kenntliche Pappelblattkäfer *Melasoma populi* auf. Des Weiteren zählte zu den bekannten Pappel- und Weidenschädlingen der Erlenwürger *Cryptorhynchus lapathi* aus der Familie Rüsselkäfer (Curculionidae). Die erfassten Heuschrecken (Saltatoria) ernähren sich zwar phytophag, spielen aber als Schädlinge der Pappeln und Weiden keine Rolle.

Tabelle 58: Nutz- und Schadinsekten sowie pilzliche Schaderreger auf der KUP Krummenhennersdorf (Ergebnisse der Beifänge aus den Bodenfallen und der Kesch- und Handfänge in Krummenhennersdorf 2007)

Arten	Tora	Jorr	Hyb.275	Max 3
Nutzinsekten				
<i>Coccinella septempunctata</i> (Coccinellidae)			x	x
<i>Propylaea quatuordecimpunctata</i> (Coccinellidae)				x
<i>Thea vigintiduopunctata</i> (Coccinellidae)				x
<i>Forficula auricularia</i> (Ohrwürmer)	x	x	x	x
<i>Silpha obscura</i> (Silphidae)	x	x	x	x
<i>Necrophorus vespilloides</i> (Silphidae)	x	x	x	x
Schadinsekten				
<i>Phyllopertha horticola</i> (Gartenlaubkäfer) (Scarabaeidae)	x	x	x	x
<i>Tuberolachnus salignus</i> (Baumblattlaus) (Aphididae)	x	x		
Saltatoria (Heuschrecken)		x	x	
<i>Cryptorhynchus lapathi</i> (Erlenwürger) (Curculionidae)	x			
<i>Melasoma populi</i> (Blattkäfer)	x			x
Chrysomelidae (weitere Blattkäfer)	x	x	x	x
Pilzliche Schaderreger				
<i>Pollaccia saliciperda</i> (Weidenschorf)	x	x		
<i>Melampsora larici-populina</i> (Pappelrost)			x	x

Pilzliche Schaderreger

Weidenschorf oder Triebspitzenkrankheit

(anamorph *Pollaccia saliciperda*; telemorph *Venturia saliciperda*; Ascomycota):

Die Krankheit trat im Jahr 2007 an allen fünf Weidensorten auf. Besonders stark befallen waren die Sorten „Tordis“ und „Gudrun“. Die Infektion der Blätter und Zweige mit Pilzsporen erfolgte im Mai/Juni. Der Pilz überwintert an kranken Zweigen und befallenen Blättern, wo im folgenden Jahr wiederum neue Sporen gebildet werden, welche dann zu neuen Infektionen führen. Feuchte Früh-

jahrswitterung erhöht stark die Befallswahrscheinlichkeit. Der Pilz schädigt Blätter, Triebspitzen und dickere Zweige. Befallene Blätter werden dürr und haften noch lange Zeit an den Zweigen. Schlimmer wirkt sich die Krankheit aus, wenn die Triebspitzen befallen werden (BUTIN 1960). Dabei wandert der Pilz von den Blättern durch Blattstiele in die Triebspitzen, welche sich dann auf einer Länge von bis zu 20 cm schwarz verfärben und absterben. Diese Entwicklung dauert nur wenige Tage. Am Ende sind die Triebe vertrocknet und krümmen sich abwärts. In Versuchen wurde beobachtet, dass sich die schwarzen Zonen bis zu 2 mm pro Stunde ausdehnten (vgl. R. ENGESSER 2001). Ausgehend von Blattinfektionen können via Blattstiel auch dickere Ruten erkranken. Die Schäden reichen dann bis in mehrere Meter Höhe. Wird das Kambium befallen, so stirbt dieses ab und Holzkörper tritt hervor. Durch anschließende Wundkallusbildung können so bis zu 2 cm lange, krebsige Rindenverletzungen entstehen.

Pappelrost (*Melampsora larici-populina* u.a. *Melampsora*-Arten; Basidiomycota):

Blattroste zählen zu den wichtigsten Pappelpathogenen. Die meisten Arten benötigen einen Zwischenwirt. Unter günstigen Bedingungen kann sich der Pilz mittels Uredosporen im Sommer stark vermehren und vorzeitigen Blattfall verursachen. Bei früh einsetzendem Befall können die Auswirkungen der Krankheit erheblich sein. Die verschiedenen Pappelsorten und Klone sind unterschiedlich anfällig. Pappelrost kann auch Wegbereiter für den Rindenbrand (Pappelrindentod) sein.

Im Sommer findet man auf der Blattunterseite der Blätter gelbliche, ca. 1 mm große, in Gruppen beieinanderstehende Uredosporenlager. Uredosporen können für die explosionsartige Ausbreitung des Pilzes im Bestand verantwortlich sein. Im Herbst werden auf den Oberseiten der Blätter anfangs hellbraune, später fast schwarze Teleutosporenlager gebildet. Von hier nimmt im Frühjahr mit der Bildung von Basidiosporen die Infektion der Lärchennadeln (Zwischenwirt) ihren Ausgang (BUTIN 1957).

5.3 Ökonomische Bewertung des Anbaues von schnellwachsenden Baumarten

Im Rahmen des Projektes wurde ein Modell zur Berechnung des ökonomischen Ergebnisses der Bewirtschaftung einer Kurzumtriebsplantage erstellt. Das Modell soll Landwirten die Möglichkeit geben, Kosten, Leistungen, Gewinn & Verlust an Hand ihrer Praxisanlage zu ermitteln.

Zur ökonomischen Bewertung von Kurzumtriebsplantagen fehlen derzeit noch belastbare Daten. Dies ist vor allem dem speziellen Anbauverfahren mit langer Nutzungsdauer sowie dem Einsatz neuer, teilweise kaum erprobter Technik geschuldet. In Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Agrarökonomie, Ländlicher Raum der LfL erfolgte die Aufnahme wichtiger Kostenpositionen sowie eine ökonomische Bewertung des Anbauverfahrens über die gesamte Nutzungsdauer. Die Kalkulation der einzelnen Arbeitsgänge erfolgte an Hand von Praxisergebnissen sowie in Anlehnung an die KTBL-Datensammlung 2006/07.

Beim Anbau von schnellwachsenden Baumarten im Kurzumtrieb handelt es sich um eine Dauerkultur, welche durch jährlich unterschiedlich anfallende Kosten und Leistungen über die gesamte Nutzungsdauer gekennzeichnet ist (Abbildung 62).

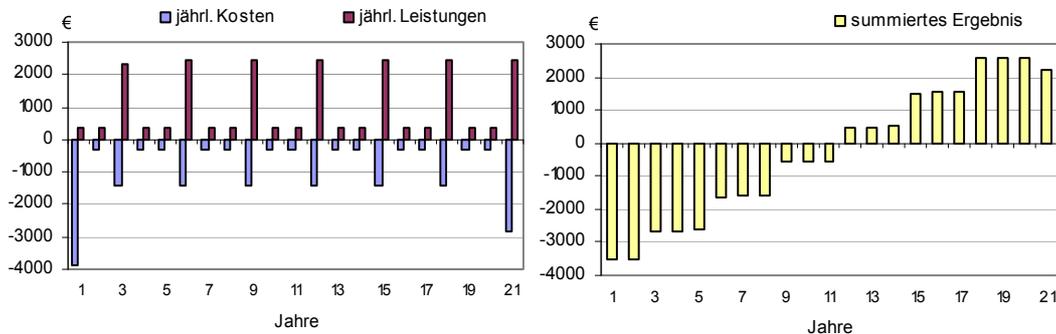


Abbildung 62: Schematischer Verlauf der Kosten und Leistungen sowie des summierten Ergebnisses über die gesamte Nutzungsdauer einer KUP

In Tabelle 59 sind die Kostenpositionen der Bewirtschaftung einer Kurzumtriebsplantage mit Pappeln und Weiden zusammengestellt. Die durchschnittlichen Kosten beziehen sich dabei auf eine Bewirtschaftungsgröße von 10 ha und die für diese Schlaggröße erforderliche Maschinenkapazität. Für die Berechnung wurden folgende Ausgangsgrößen festgelegt:

Nutzungsdauer (ND):	21 Jahre
Umtrieb (Ernteintervall):	3-jährig
Bestandesdichte:	11.800 Bäume/ha (1,5 m x 0,75 m x 0,75 m)
Ertragsniveau:	10 $t_{atro}/ha*a$
Erntefeuchte:	55 %
Zins:	6 %

Die einmaligen Anlagekosten im Pflanzjahr werden zum größten Teil durch die Stecklingskosten bestimmt. Bei Pappelstecklingen liegt der Marktpreis derzeit bei 24 Cent/Stück bei Weiden bei 8 Cent/Stück. Auf Grund der geringeren Pflanzgutkosten für Weidensteckhölzer sind die Anpflanzkosten einer Kurzumtriebsplantage mit Weiden niedriger als bei einer Pappelplantage. Die Erfahrungen bei der Etablierung der KUP Krummenhennersdorf haben gezeigt, dass in wildreichen Regionen vor allem Weidenplantagen einer Einzäunung bedürfen, da sie sonst durch Fraß- und Fege-schäden stark beeinträchtigt werden können. Daher wurden bei der Betrachtung der Kosten einer Weidenplantage die Kosten für eine Einzäunung mit berücksichtigt.

Den aufgeführten Kosten stehen Erlöse aus dem Holzverkauf sowie eventuelle Zahlungsansprüche wie die Flächenprämie (350 €/ha) oder Energiepflanzenprämie (45 €/ha) gegenüber. Seit 2007 wird zudem im Freistaat Sachsen der Anbau von Dauerkulturen wie schnellwachsende Baumarten und Miscanthus durch eine Rückerstattung von bis zu 30 % der Anlagekosten gefördert.

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Anbaues mehrjähriger Kulturen sind auch Zinskosten zu beachten, da das Kapital längerfristig über die gesamte Nutzungsdauer gebunden ist und Kosten und Leistungen diskontinuierlich während des gesamten Zeitraums anfallen. Damit müssen Zinseffekte (Investitionsrechnung), wie sie bei einer alternativen Geldanlage entstehen würden, berücksichtigt werden. Das heißt, alle Kosten und Leistungen während der gesamten Nutzungsdauer werden auf den Investitionszeitpunkt abgezinst und aufsummiert. Die Summe der Barwerte multipliziert man mit dem Wiedergewinnungsfaktor und erhält die Annuität bzw. den jährlichen durchschnittlichen Gewinn.

Tabelle 59: Kostenpositionen bei der Bewirtschaftung einer KUP mit Pappeln bzw. Weiden bei einer Nutzungsdauer von 21 Jahren

Kostenposition	Häufigkeit Anzahl / ND	PAPPEL EUR/ha	WEIDE EUR/ha
Unkrautbekämpfung (3 l Roundup/ha)	1	37	37
Pflügen	1	78	78
Saatbettkombination	1	20	20
Stecklinge (Pappeln 24 ct/Stück; Weide 8 ct/Stück)	1	2.832	944
Pflanzung maschinell (4 ct/Steckholz)	1	472	472
Unkrautbekämpfung (1 l Flexidor/ha)	1	29	29
Pflege (2 x Bodenfräse)	1	90	90
Zaunbau (5,4 €/laufender Meter)			756
Anlagekosten gesamt (1. Standjahr)	1	3.558	2.426
Düngung (nach Entzug)	7	139	139
Ernte Feldhäckler (incl. Transport zum Hof) ¹⁾	7	372	372
Trocknung ²⁾	7	453	453
Lagerung	7	153	153
Verfahrenskosten pro Rotation (3 Jahre)	7	1.118	1.118
Rekultivierung³⁾	1	1.400	1.400
Flächenkosten ⁴⁾	21	175	175
Gemeinkosten ⁵⁾	21	154	154
Flächen-Gemeinkosten pro Jahr	21	329	329
Gesamtkosten (Nutzungsdauer) ohne Verzinsung		19.695	18.563

1) angeglichen nach KTBL-Energiepflanzen (2006)

2) Kosten einer Kaltbelüftung nach KOLLOCH (1990)

3) nach KTBL-Energiepflanzen (2006)

4) Pacht, Grundsteuer, Berufsgenossenschaft, Kalkung

5) Gebäude, Versicherungen, Energie/Wasser, Pkw, Sachkosten

In den Abbildungen 63 und 64 sind die jährlichen durchschnittlichen Betriebsergebnisse dargestellt bei der Annahme, dass die Hackschnitzel nicht im eigenen Betrieb genutzt, sondern verkauft werden. Es wurden dabei unterschiedlich erzielbare Preise für die Hackschnitzel und Aufbereitungsinintensitäten (ohne/mit Trocknung und Lagerung) berücksichtigt. Zusätzlich wurde das Ergebnis ohne und mit Berücksichtigung der Zahlungsansprüche (Flächenprämie) und der Anlagenförderung (30 % der Anlagekosten) berechnet.

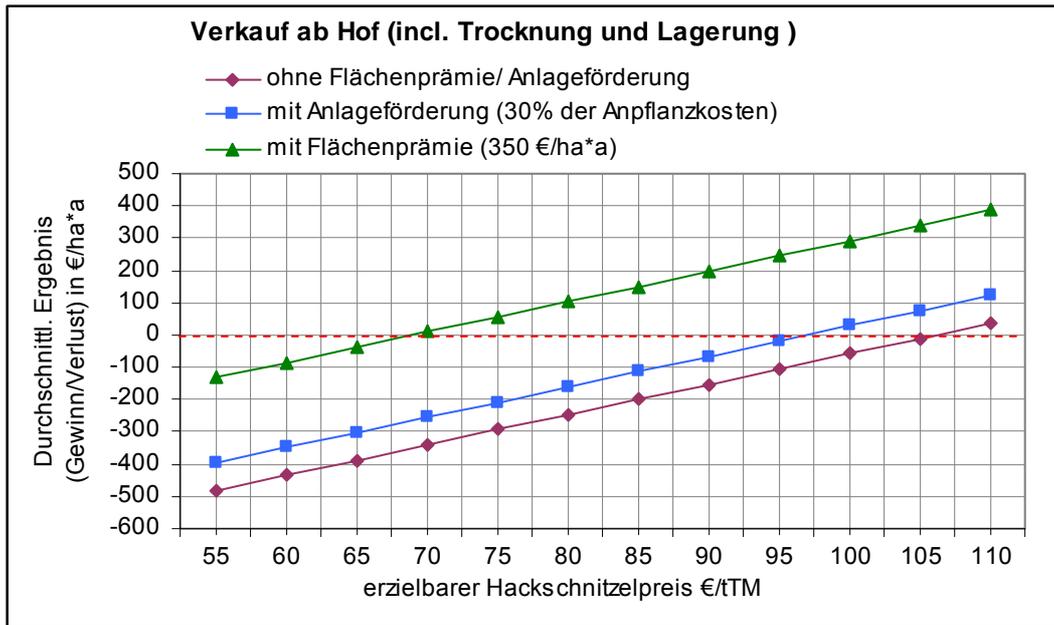


Abbildung 63: Durchschnittliches jährliches Ergebnis (Gewinn/Verlust) einer KUP mit Pappeln (Ertrag 10 t_{atro}/ha^*a , 3-jähriger Umtrieb, ND 21 Jahre) bei einem Verkauf der Hackschnitzel ab Hof (inkl. Trocknung, Lagerung) und in Abhängigkeit vom Holzpreis

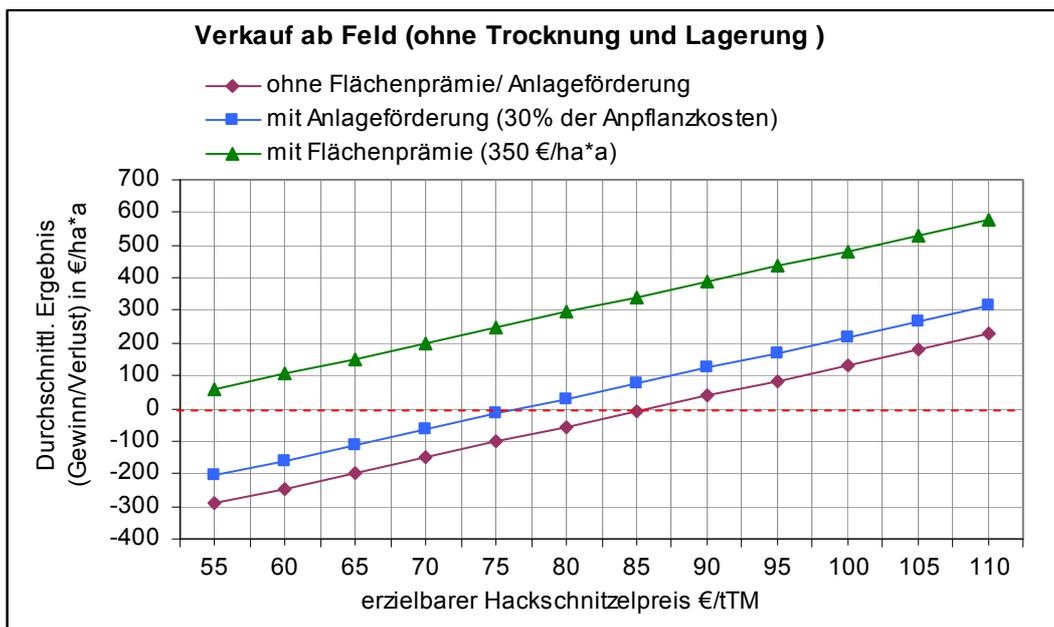


Abbildung 64: Durchschnittliches jährliches Ergebnis (Gewinn/Verlust) einer KUP mit Pappeln (Ertrag 10 t_{atro}/ha^*a , 3-jähriger Umtrieb, ND 21 Jahre) bei einem Verkauf der Hackschnitzel ab Feld (ohne Trocknung, Lagerung) und in Abhängigkeit vom Holzpreis

Derzeit liegt der durchschnittliche Marktpreis für Waldhackgut bei ca. 76 €/t (bei 35 % Feuchte, 1. Quartal 2008, Quelle: C.A.R.M.E.N. e.V.). Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen zeigen, dass der Anbau von Pappeln inkl. Trocknung und Lagerung, ohne Berücksichtigung der Flächenprämie oder Anlagenförderung, bei einem Holzpreis $\leq 80 \text{ €/t}_{\text{atro}}$ nicht wirtschaftlich ist. Erst ab einem Holzpreis von $107 \text{ €/t}_{\text{atro}}$ kann in dem Berechnungsbeispiel ein positives Ergebnis erzielt werden. Mit der neuen Förderung der Anpflanzung im Freistaat Sachsen (Rückerstattung von 30 % der Anpflanzkosten) kann bereits bei einem Preis von $97 \text{ €/t}_{\text{atro}}$ eine Kostendeckung erreicht werden.

Derzeit gibt es nur wenig Datenmaterial zu den tatsächlichen Trocknungskosten, daher sollte die Entscheidung, ob das Holz trocken oder frisch ab Feld verkauft wird, gut überlegt werden. Bei den erfolgten Kostenannahmen wäre der Verkauf ab Feld (ohne Trocknung und Lagerung) schon ab $86 \text{ €/t}_{\text{atro}}$ günstiger, jedoch bleibt fraglich, ob ein derartiger Holzpreis für erntefrisches Holz (55 % Feuchte) in der Praxis derzeit erzielbar ist. Mit Berücksichtigung der Anlageförderung von 30 % der Anlagekosten wäre schon ein Holzpreis ab Feld von $76 \text{ €/t}_{\text{atro}}$ akzeptabel.

Inwieweit Flächenprämien in die ökonomische Berechnung mit einbezogen werden müssen, wird vor dem Hintergrund der Senkung der EU-Flächenprämie kritisch diskutiert. Dennoch sind sie dem Anbauverfahren und der Kultur zuzurechnen, so lange sie für die Fläche beantragt und auch ausbezahlt werden. Mit Berücksichtigung der Flächenprämie ($350 \text{ €/ha} \cdot \text{a}$) würde ein Hackschnitzelpreis von $70 \text{ €/t}_{\text{atro}}$ ab Hof (inkl. Trocknungs- und Lagerkosten) zu einem positiven Ergebnis führen. Bei Verkauf ab Feld würde eine Kostendeckung schon bei einem Preis von $50 \text{ €/t}_{\text{atro}}$ erreicht werden.

Die Kosten des Verfahrens werden zukünftig nicht die Holzpreisentwicklung bestimmen, sondern ausschließlich Angebot und Nachfrage. Demnach werden auf Grund der gestiegenen Nachfrage und der Verknappung im stofflichen sowie energetischen Sektor die Preise steigen.

Die Anbauentscheidung wird durch den erzielbaren Holzerlös und zunehmend durch die weltweite Nachfrage- und Preissteigerung bei Lebensmittelgütern bestimmt. Mit der starken Preisentwicklung 2007 bei Weizen, Braugerste und Raps wird der Anbau von schnellwachsenden Baumarten vorerst auf ertragsschwächere Standorte erstreckt bleiben.

5.4 Fazit der Etablierung der Kurzumtriebsplantage Krummenhennersdorf

In Krummenhennersdorf erfolgte die Etablierung einer ca. 2 ha großen Versuchs- und Demonstrationsanlage mit acht verschiedenen Pappel- und Weidensorten.

Die Anwuchsraten waren auf Grund der Handpflanzung bei den meisten Sorten sehr gut. Größere Ausfallraten bei zwei Sorten/Klone (Pappelklon Weser 6, Weidenklon Gudrun) waren vor allem durch ungünstige Bodenverhältnisse zur Pflanzung (Staunässe) bedingt.

Durch ein geeignetes Voraufbauherbizid (Flexidor) konnte der Unkrautdruck im ersten Standjahr erfolgreich reduziert werden.

Auf Grund des hohen Rehwildaufkommens in der Region und des beginnenden starken Verbisses der Triebspitzen und Blätter, vor allem bei den Weidensorten, wurde zwei Monate nach der Pflanzung ein Wildschutzzaun errichtet.

Die Weidensorten Jorr, Sven, Tora und Tordis zeigten im ersten Standjahr ein enormes Wachstum während die Pappelsorten Weser 6, Max 3 und Hybrid 275 verhaltener wuchsen. Im zweiten Standjahr holten die Pappeln jedoch sichtbar auf, so dass ein beeindruckender Flächenbestand zu verzeichnen war. Die Weidensorte Gudrun zeigte in beiden Standjahren ein schwaches Wuchsverhalten.

Da nach dem zweiten Standjahr noch keine eindeutige Ertragsprognose für die Fläche gestellt werden kann, sondern lediglich eine Ertragsschätzung an Hand der ertragsrelevanten Parameter erfolgte, sind detaillierte Aussagen zur Sorteneignung noch nicht möglich. Im optischen Vergleich zu anderen Versuchsflächen in Brandenburg und Sachsen kann man jedoch auf Grund der guten Standortbedingungen von einem hohen Ertragsniveau auf dieser Kurzumtriebsplantage ausgehen. Die Weidensorten Tora, Tordis und Sven sowie die Pappelsorte Max 3 scheinen derzeit besonders aussichtsreich.

Bei der pflanzensoziologischen Kartierung der Kurzumtriebsplantage wurden im 2. und 3. Versuchsjahr 65 Pflanzenarten in der Krautschicht erfasst. Die Gesamtartenzahl und die durchschnittliche Artenzahl pro Sortenstreifen sind damit im Vergleich zu bewirtschafteten Äckern und Wiesen als relativ hoch zu bewerten. Wie sich die Begleitflora unter der zunehmenden Beschattung durch die Gehölze entwickelt, ist schwer abzuschätzen.

Bei den faunistischen Erhebungen konnte im Jahr 2007 eine Verdopplung der Artenzahlen sowohl bei den Webspinnen als auch bei den Laufkäfern im Vergleich zum Vorjahr festgestellt werden.

6 Zusammenfassung

Im der Region Freiberg sind ca. 10.000 ha der landwirtschaftlichen Fläche geogen und anthropogen mit Arsen und Schwermetallen belastet.

Ziel des Projektes war es, Wege aufzuzeigen, kontaminierte Flächen ökonomisch und ökologisch sinnvoll unter Beachtung der gesetzlichen und umweltrechtlichen Belange zu bewirtschaften. Es wurden drei grundlegende Lösungsansätze untersucht. Zum einen galt es, die Schwermetallgehalte im Erntegut durch spezielle Bewirtschaftungsmaßnahmen zu reduzieren, zum anderen wurden die Aufwüchse alternativen Verwertungslinien (Biogas, Verbrennung) zugeführt bzw. Energiepflanzen auf diesen Flächen angebaut.

Aufbauend auf vorangegangenen Untersuchungen der LfL wurden in der Region Freiberg (Hilbersdorf) **Kalkdüngungsversuche** auf belasteten Acker- und Grünlandstandorten zur Reduzierung des Schwermetalltransfers Boden-Pflanze durchgeführt.

In den ein- bis zweijährigen Kalkdüngungsversuchen konnte bereits nachgewiesen werden, dass durch die Kalkung der Flächen und der daraus folgenden pH-Wert-Erhöhung der mobile pflanzenverfügbare Anteil an Cadmium und Blei im Oberboden signifikant abnimmt. Tendenziell konnte auch ein Rückgang des mobilen Arsengehaltes festgestellt werden, jedoch war der Zusammenhang zwischen dem Arsengehalt im Boden und dem pH-Wert nicht signifikant.

Die Gehalte an Arsen, Cadmium und Blei in den Grünlandaufwüchsen nahmen im zweijährigen Versuchszeitraum mit steigendem pH-Wert im Boden ab. Ein starker Zusammenhang zwischen dem mobilen Anteil an bodenbelastenden Elementen und deren Gehalt in der Biomasse konnte jedoch in dem kurzen zweijährigen Versuchszeitraum nur bei Blei statistisch nachgewiesen werden.

Bei den Grünlandaufwüchsen zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit des Arsengehaltes im Erntegut vom Schnitttermin. Der Aufwuchs des 1. Schnittes (April/Juni) war stets um mind. 60 % niedriger belastet als der 2. Schnitt (August).

In den ein- bis zweijährigen Kalkdüngungsversuch kam die Kalkwirkung noch nicht voll zum Tragen. Die anvisierten Ziel-pH-Werte (pH-Klasse C und E) des Oberbodens wurde zum Teil noch nicht erreicht.

Bei den Untersuchungen zur **energetischen Nutzung** der belasteten Aufwüchse erfolgte zum einen der Einsatz als Kosubstrat zur Biogaserzeugung und zum anderen als Brennstoff/-pellets in verschiedenen Kleinfeuerungsanlagen (< 100 kW FWL).

In den **diskontinuierlichen (Batch) und kontinuierlichen Gärtests** mit kontaminierten Gras-, Roggenganzpflanzensilage und Roggenkorn konnte keine negative Wirkung der Arsen- und Schwermetallbelastung der Biomasse auf die Biogasproduktion beobachtet werden. Die Gaserträ-

ge lagen in den für die eingesetzten Substrate typischen Größenordnungen. Es wurden keine Unterschiede in den erfassten Gasausbeuten und Methangehalten in Abhängigkeit vom Belastungsgrad festgestellt.

In den Batch-Versuchen (Monovergärung) betrug die Gaserträge bei den Grünschnitt- und Roggenganzpflanzensilagen ca. $420 \text{ m}^3/t_{\text{oTS}}$ und bei den Roggenschroten ca. $620 \text{ m}^3/t_{\text{oTS}}$. Der Methan-gehalt lag bei 55 und 58 %.

Bei den kontinuierlichen Gärtests (> 90 Tage) mit 30 % oTS Kosubstrat/70 % oTS Rindergülle und Steigerung der Faulraumbelastung (2, 3, 4 $\text{kg oTS/m}^3\text{*d}$) erzielten die Roggenschrote mit $420\text{-}480 \text{ m}^3/t_{\text{oTS}}$ ebenfalls die höchsten Gaserträge. Mit den Grünschnitt- und Roggenganzpflanzensilagen wurden $290\text{ - }360 \text{ m}^3/t_{\text{oTS}}$ erreicht. Die höchsten Gaserträge wurden bei allen Substraten bei einer Faulraumbelastung von $3 \text{ kg oTS/m}^3_{\text{FV}}\text{*d}$ nachgewiesen.

Die Bilanzierung der Stoffströme in den Biogasversuchen zeigte, dass die in den Substraten enthaltenen Mineralstoffe sowie Arsen und Schwermetalle vollständig in den Gärrückständen vorliegen. Bei erhöhter Zufuhr von kontaminierter Biomasse als Kosubstrat im Verhältnis 50 : 50 % oTS Rindergülle lagen die Cadmiumgehalte in den Gärrückständen über dem Grenzwert der Düngemittelverordnung. Bei einer niedrigeren Konzentration (30 % oTS Kosubstrat) war keine Grenzwertüberschreitung bei Cadmium im Gärrückstand festzustellen.

Ein spezielles Problem bildet die hohe aus der Rindergülle stammende Kupferbelastung im Gärrückstand. Bezüglich der weiteren Schwermetalle (Pb, Hg, Ni, Zn) in den Gärrückständen konnten die Grenzwerte der Düngemittelverordnung eingehalten werden.

Grundsätzlich bietet die Biogasproduktion eine gute Möglichkeit, Aufwüchse von kontaminierten Landwirtschaftsflächen außerhalb der Nahrungs- und Futtermittelkette zu verwerten. Hierbei sind die gesetzlichen Vorgaben für die Verwertung der Gärrückstände jedoch unbedingt zu berücksichtigen.

Bei den Untersuchungen zur **Verbrennung in Kleinf Feuerungsanlagen** (< 100 kW FWL) kamen neben den belasteten Aufwüchsen der Kalkdüngungsversuche (Grünschnitt, Roggenstroh, Roggenkorn) auch unbelastete Biomassen (Holz, Weizenstroh, Miscanthus, Rapskuchen) zum Einsatz. Für die Nutzung in den Kleinf Feuerungsanlagen erfolgte die Pelletierung der Biomassen sowie verschiedener Mischvarianten mit Holzspänen oder Kalkzusätzen (Talkum, Kohlensaurer Kalk). Die Abbrandversuche wurden an sechs verschiedenen Kleinf Feuerungsanlagen (FERRO BIOMAT 23 kW und 90 kW, BAXI MULTI HEAT 25 kW, REKA HKSR 30/3, Guntamatic PowerCorn 30, KSM 20 kW) durchgeführt.

Beim Abbrand der genannten Biobrennstoffe entsteht im Vergleich zu Holzpellets (0,4 % Asche) deutlich mehr Asche (Roggenkorn 2 %, Miscanthus 3 %, Weizen-/Roggenstroh ≥ 6 %, Rapskuchen

7%, Heu ≥ 8 %). Kalkzugaben von 3 – 5 % im Herstellungsprozess erhöhen den Aschegehalt um den prozentual zugesetzten nichtbrennbaren mineralischen Anteil.

Das Ascheschmelzverhalten der geprüften Pelletchargen unterstreicht, dass die Erweichungstemperatur der von Halmgutpellets stammenden Asche bereits bei niedrigen Ausbrandtemperaturen im Bereich von 860 °C (Roggenkorn, Miscanthus) bis 1.100 °C (Roggenstroh) einsetzt. Heu, Weizenstroh und Rapskuchen nahmen mit Erweichungstemperaturen von 930 – 1.000 °C eine Mittelstellung ein.

Das Ascheschmelzverhalten wird maßgeblich durch den Gehalt an Kalium und Kalzium im Brennstoff bestimmt. Mit der Zugabe von Kalk konnte das ungünstige K-/Ca-Verhältnis bei Weizenstroh und Heu von ca. 1 : 0,4 ausgeglichen und der Ascheerweichungspunkt deutlich erhöht werden. Bei Brennstoffen mit engem K/Ca-Verhältnis 1 : 1 bzw. höherem Kalziumanteil (Holz 1 : 1,5) kann von hohen Erweichungstemperaturen ausgegangen werden, während die Asche von Brennstoffen mit höherem Kaliumgehalt und einem K-/Ca-Verhältnis von 1 : 0,1 - 0,5 schon bei niedrigen Temperaturen beginnt zu verschlacken.

Der untere Heizwert (wasserfrei) lag bei Roggenkorn, Stroh- und Heupellets bei 17,0 bzw. 17,2 - 17,5 MJ/kg und damit ca. 10 % unter dem von Holzpellets (19 MJ/kg). Miscanthuspellets (18,2 MJ/kg) und Rapskuchenpellets (20,9 MJ/kg) sind hingegen energiereicher.

Im Durchschnitt weisen die Halmgutpellets eine mit Holzpellets vergleichbare Dichte von 1,0-1,4 kg/dm³ auf. Die Festigkeit der Halmgutpellets schwankte bei den Monopellets, je nach Biomasse, zwischen 1,0 - 9,4 % Abrieb.

Aus den Abbrandversuchen in den verschiedenen Kleinfeuerungsanlagen geht insgesamt hervor, dass halmgutartige Biomasse ein aus Sicht der umweltbelasteten Rauchgasemissionen kritischer Brennstoff ist. Insbesondere betrifft dies die Konzentrationen an Staub, Chlorwasserstoff (HCl) und Stickoxiden (NO_x) im Rauchgasstrom.

Zwischen den einzelnen Pelletvarianten zeichnete sich jedoch eine gewisse Differenzierung der Messergebnisse ab. Danach sind beim Abbrand von Heupellets besonders hohe Staubemissionen von durchschnittlich 250 – 340 mg Staub/Nm³ (1,7-fache Grenzwertüberschreitung nach 1.BImSchV) zu erwarten. Die Weizenstropellets erzeugten in Abhängigkeit von der eingesetzten Strohcharge mittlere bis sehr hohe Emissionen von ≤ 150 bzw. ≥ 480 mg Staub/Nm³. Miscanthuspellets überschritten mit 200 - 250 mg Staub/Nm³ ebenfalls den Grenzwert der 1.BImSchV von 150 mg/Nm³. Auch bei Roggenkorn und Rapskuchenpellets ist von erhöhten Staubemissionen (120-180 mg Staub/Nm³) auszugehen. Ein sehr niedriger Staubemissionswert (ca. 60 mg Staub/Nm³) war mit dem Abbrand von Roggenstropellets verbunden.

Diese Ergebnisse erfordern zwingend den Einbau von Filtern in Kleinfeuerungsanlagen.

Weiterhin ist festzustellen, dass mit dem Abbrand von stickstoffreicheren Biomassen (Heu, Roggenkorn, Rapskuchen) erhöhte NO_x-Emissionen in Konzentrationen von 360 – 700 mg/Nm³ gegenüber Holzpellets (104 mg NO_x/Nm³) verbunden sind.

Bei den Abbrandversuchen mit den sechs verschiedenen Heizkesseln konnte nachgewiesen werden, dass die thermische Nutzung der Biomassen bei einer hohen Verbrennungsgüte möglich ist. Im Bezug auf die gesetzlichen Bestimmungen der 1.BImSchV sowie der derzeit in Bearbeitung befindlichen Novelle konnte festgestellt werden, dass die Einhaltung der CO-Emissionen kein Problem darstellt. Die Höhe der Staubemissionen ist maßgeblich vom Brennstoff sowie der Verbrennungstechnik abhängig. Bei den meisten getesteten Brennstoffen konnte der derzeitige Staubgrenzwert von 150 mg/Nm³ nicht eingehalten werden. Mit der geplanten Verschärfung des Grenzwertes auf 100 mg/Nm³ bzw. 20 mg/Nm³ (ab 2015) kann der Abbrand von Halmgut nur mit geeigneter Filtertechnik erfolgen.

Die bei der Verbrennung entstehenden Aschen enthalten hohe Anteile wichtiger Pflanzennährstoffe wie Kalium, Phosphor, Magnesium und Kalzium, aber auch Arsen und Schwermetalle. Laut DÜMV dürften die meisten der in den Versuchen erfassten Verbrennungsaschen auf Grund hoher Gehalte an Kupfer, Nickel, teilweise auch Arsen und Chrom (VI) nicht als Düngemittel in Verkehr gebracht bzw. eingesetzt werden.

Die Untersuchungen zeigten, dass ein großer Anteil der in den belasteten Chargen enthaltenen Elemente Arsen, Cadmium und Blei als Bestandteile der staubförmigen Emissionen mit dem Abgas emittiert werden. Es lagen ca. 25 % des Arsens, 28 % des Cadmiums und 37 % des Bleies in den Stäuben vor. In diesem Zusammenhang erhalten eine wirksame Abscheidetechnik sowie Konzepte zur umweltfreundlichen Staubentsorgung einen noch höheren Stellenwert. Die Verbrennung von kontaminierten Aufwüchsen in Kleinf Feuerungsanlagen kann nur bei Einsatz geeigneter Rauchgasreinigungsanlagen empfohlen werden.

Auf einer 2 ha großen schwermetallbelasteten Praxisfläche wurde eine **Kurzumtriebsplantage** mit drei verschiedenen Pappel- und fünf Weidensorten mit dem Ziel etabliert, die Anbaueignung und das Ertragspotenzial unter den gegebenen Standortbedingungen sowie die Schwermetallakkumulation der Baumarten zu prüfen. Zudem erfolgten faunistische und pflanzensoziologische Aufnahmen auf der Fläche.

In den ersten beiden Standjahren konnten sehr gute Anwuchsraten und eine starke Wuchsleistung bei den meisten Sorten ermittelt werden. Hierbei zeichneten sich besonders die Weidensorten durch einen raschen Austrieb aus, während die Pappeln einen langsameren Wuchs in den ersten zwei Standjahren aufwiesen und somit stärker dem Konkurrenzdruck der Begleitfora ausgesetzt sind.

Eine besonders gute Wuchsleistung entwickelten die Weidensorten Tora und Tordis. Sie erreichten im 2. Standjahr bereits Wuchshöhen von 4,5 m und einen geschätzten durchschnittlichen Biomasseertrag von 8-9 $t_{TM}/ha \cdot a$. Bei den Pappeln zeigte der Klon Max 3 den höchsten Zuwachs mit einer Wuchshöhe von 3,6 m und einem geschätzten Ertrag von 4,2 $t_{TM}/ha \cdot a$.

Aussagen zur Ertragsleistung und Sorteneignung lassen sich jedoch erst nach mehreren Umtrieben bzw. langjährigeren Untersuchungen treffen.

Die ökologischen Untersuchungen zeigten eine im Vergleich zu üblichen Ackerkulturen hohe Biodiversität auf der Kurzumtriebsplantage. In der Begleitflora konnten in den zwei Standjahren insgesamt 85 verschiedene Pflanzenarten bestimmt werden. Die Fauna (Spinnen, Laufkäfer) war vor allem durch Arten bestimmt, die Ackerunkrautfluren, ausdauernde Ruderalfluren, Gehölze bzw. Hecken und frische, wenig beschattete Offenlandbiotope mit Gräsern präferieren. Die Artenzahl nahm vom 1. Standjahr zum 2. Standjahr deutlich zu. Detaillierte Aussagen zur Entwicklung der Fauna und Flore lassen sich auch hier erst nach mehreren Umtrieben treffen, da vor allem der Wechsel von Licht und Schatten durch die Umtriebe das Artenspektrum stark beeinflussen.

An Hand von Blattanalysen sowie der Ernte und Analyse einzelner Bäume konnten erste Daten zur Schwermetallakkumulation erhoben werden. Danach werden vor allem Cadmium und Zink verstärkt durch die Pappeln und Weiden aufgenommen. Bei den Weiden wurden insgesamt höhere Arsen- und Schwermetallgehalte in den blattfreien Trieben (2. Standjahr) ermittelt als bei den Pappelklonen.

Die ersten Ergebnisse zum Anbau von schnellwachsenden Baumarten auf kontaminierten landwirtschaftlichen Böden bringen zum Ausdruck, dass dies eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Alternative der Nutzung dieser Flächen sein kann. In den folgenden Versuchsjahren sind die gefundenen positiven Ansätze weiter abzusichern.

7 Literatur

- ARNDT, E. & K. RICHTER (1995): Rote Liste Laufkäfer – Stand 1995. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Radebeul.
- AUERMAN, E. et al. (Jahrgang??): Anbau- und Verzehrempfehlungen für schwermetallbelastete Klein- und Hausgärten im Freiburger Raum. Informationsschrift des Landkreises Freiberg
- 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. 2002, Heft 25 – 29, S. 511 – 605
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2003): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV), vom 26. Nov.2003. BGBl. I S. 2373; zuletzt geändert durch Artikel 3 V. v. 22.10.2007 BGBl. I S. 2494
- BUNGART, R. (1999): Erzeugung von Biomasse zur energetischen Nutzung durch den Anbau schnellwachsender Baumarten auf Kippsubstraten des Lausitzer Braunkohlereviere. Cottbuser Schriften, Band 7
- 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, Staubingen
- 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.
- 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 2005, Band 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 LfL Heft 2
- 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: 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): 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): 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.
- BUND-/LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ (2004): Maßnahmenkonzept zur verschmutzungsarmen Nutzpflanzenernte, Projekt-Nr. B 4.03 (Projektnehmer: LVVG Aulendorf, Ingenieurbüro Feldwisch)
- MÖNICKE, R.; KLOSE, R.; KURZER, H.- J. (1996): Schwermetalltransfer auf Praxis schlägen und Schlußfolgerungen für die landwirtschaftliche Abfallverwertung- dargestellt am Beispiel Cd und Pb. Mitt. Dt. Bodenkundl. Ges. (80): 77 - 79
- MUNZERT, M., FRAHM, J. (HRSG. 2006): Die Landwirtschaft - 1. Pflanzliche Erzeugung. BLV Buchverlag GmbH Co.KG, München
- OBERNBERGER, J. (1998): Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen, Verlag für die Technische Universität Graz
- PLATEN, R., BLICK, T., SACHER, P. & A. MALTEN (1996): Rote Liste der Webspinnen Deutschlands (Arachnida: Araneae). Arachnol. Mitt. 11: 5-31

- PLATEN, R., MORITZ, M., BROEN, B. V., BOTHMANN, I., BRUHN, K. & U. SIMON (1991): Liste der Webspin-
nen- 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: 169-205.
- PLATNICK, N. I. (1993): Advances in spider taxonomy 1988-1991. Entomol. Soc. & am. Mus. Nat. Hist.,
New York, 846 S.
- RICHTLINIE 2002/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Mai 2002 über uner-
wünschte Stoffe in der Tierernährung, ABI140 vom 30.5.2002, S. 10
- ROBERTS, J. M. (1985): The Spiders of Great Britain and Ireland. Vol. 1, Atypidae to Theridiosomatidae.
Harley Books, Martins, Great Horkesley, Colchester, 229 S.
- ROBERTS, J. M. (1987): The Spiders of Great Britain and Ireland. Vol. 2, Linyphiidae. Harley Books,
Martins, Great Horkesley, Colchester, 204 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 Untersu-
chungen zum Anbau ein- und mehrjähriger Energiepflanzen im Freistaat Sachsen. Schriften-
reihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft 7 (4), Dresden
- RÖHRICHT, CHR., KIESEWALTER, S. (2007): Biomasseanbau und -verwertung als Energieträger von
Flächen mit unterschiedlichem Schwermetallbelastungsgrad. In: 13. Internationale Fachta-
gung Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Freiberg, 6. und 7. September 2007
- RÖHRICHT, CHR., RUSCHER, K. (2004): Anbauempfehlungen für Schnellwachsende Baumarten.
Fachmaterial der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Leipzig.
<http://www.landwirtschaft.sachsen.de/LfL>
- SCHILDBACH, M. (2002): Untersuchung der Biomasseentwicklung von Pappelklonen im Kurzumtrieb
und Fortschreibung der Biomassefunktionen über dem Alter. Diplomarbeit TU Tharandt
- SCHILDBACH, M. (2007): Ertragsschätzung der Kurzumtriebsplantage Krummenhennersdorf. Inter-
nes Papier
- SCHULZ, D. (1999): Rote Liste Farn- und Samenpflanzen. - Materialien zu Naturschutz und Land-
schaftspflege. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.). Dresden. 35 S.
- SCHULZE, D. (2002): Charakterisierung von mineralischen Rückständen aus der Verbrennung nach-
wachsender Rohstoffe. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben, Fraunhofer Institut für
Holzforschung – Wilhelm-Klauditz-Institut, Braunschweig
- SCHWÄBE, L. (2007): persönliches Gespräch mit Herrn Dr. Schwäbe, Mitarbeiter des Staatlichen
Amtes für Landwirtschaft mit Lehranstalt Freiberg-Zug, vom 19.03.2007
- TRAUTNER, J.; MÜLLER-MOTZFELD, G. & M. BRÄUNICKE (1997): Rote Liste der Sandlaufkäfer und Lauf-
käfer Deutschlands (Coleoptera: Cicindelidae et Carabidae), 2. Fassung, Stand Dezember
1996. Naturschutz u. Landschaftsplanung 29: 261-273.
- VERORDNUNG (EG) Nr. 466/2001 der Kommission vom 8. März 2001 zur Festsetzung der Höchstge-
halte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln, ABI. Nr. L 77/1

- VERORDNUNG über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung-DüMV); vom 26. November 2003 (BGBl. I S. 2373), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 27. Juli 2006 (BGBl. I S. 1818)
- 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.
- ZEHNER & MANN (1993): Untersuchungen und Bewertung der Bodenbelastung mit Arsen im Raum Ehrenfriedersdorf. Ber. BiLaCon GmbH, Stollberg (Archiv LfUG)

Anhang 1: Methoden der Analytik

Analysemethoden der Bodenproben

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

Analysemethoden der Pflanzenproben

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

Anhang 2: Artenlisten der Begleitflora der KUP Krummenhennersdorf (2005 – 2007)

Begleitflora 2005

Datum der Bonitur Flächendeckungsgrad Bearbeiter		Pappeln	Weiden
		02.09.2005	
Lateinischer Namen		25-50 %	25-30 %
Deutsche Namen		Dietrich/ Kiesevalter	
Achillea millefolium	Gewöhnliche Schafgabe	r	r
Elymus repens	Gewöhnliche Quecke	2	2
Anagallis arvensis	Ackergauchheil	1	1
Atriplex patula	spreizende Melde	1	+
Capsella bursa-pastoris	Gewöhnliches Hirtentäschel	r	r
Matricaria recutita	Echte Kamille	+	+
Chenopodium album	Weißer Gänsefuß	1	+
Cirsium arvense	Ackerkratzdistel	+	+
Epilobium angustifolium	Schmallblättriges Weidenröschen	r	r
Euphorbia helioscopia	Sonnenwend-Wolfsmilch	+	+
Fallopia convolvulus	Gemeiner Windenknöterich	1 (2)	1 (2)
Galinsoga ciliata	Behaartes Franzosenkraut	+	+
Geranium pusillum	Zwerg-Storchschnabel	r	r
Tripleurospermum maritima	Geruchlose Kamille	1	+
Plantago major	Breitwegerich	r	r
Poa annua	Einjähriges Rispengras	2	2
Polygonum lapathifolium	Ampfer-Knöterich	2	1 (2)
Persicaria maculosa	Flohknöterich	+	+
Rumex obtusifolius	Stumpfbältriger Ampfer	1 (2)*	+ (1)*
Stellaria media	Vogelmiere	+	+
Trifolium repens	Weißklee	+	+
Viola tricolor	Wildes Stiefmütterchen	1	1
Artenzahl		23	23

Artenliste nach pflanzensoziologische Klassifizierung der Begleitflora der KUP Krummenhennersdorf, 2. und 3. Standjahr (2006/2007)

Kulturart	Sorte/Klon	Datum	Weiden										Pappeln					
			Gudrun		Tordis		Tora		Sven		Jorr		Hybr.275		Max 3		Weser 6	
Bearbeiter			27.06.2006	04.06. u. 08.08. 2007														
Höhe_S_m			2	3	3	5	3	5	3	4	3	4	2	4	3	4	2,5	3,5
Deckung_S_%			40	65	60	65	60	70	70	60	75	50	85	65	85	50	60	
Deckung_K_%			75	75	75	50	75	60	60	75	75	60	80	40	75	40	80	
Deckung_M_%			1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	3	1	1	1	1	
Artenzahl_Moose			1	4	0	3	1	3	1	1	3	1	1	1	1	1	1	
Artenzahl_Kräuter			39	32	0	29	32	35	29	32	26	23	23	27	26	20	32	34
Gesamtartenzahl			40	36	36	32	33	38	30	33	27	26	24	28	27	21	33	35
ART	Deutsch	R																
Ackerwildkräuter																		
<i>Aphanes arvensis</i>	Gewöhnlicher Ackerfrauenmantel							r										
<i>Apera spica-venti</i>	Acker-Windhalm		2a		2a		2m		2m									
<i>Brassica napus</i>	Raps		+		1		1		1		1		2m		1		1	
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	Gewöhnliches Hirtentäschel		2m	r	2m		2m		+		+		2m		2m		+	
<i>Centaurea cyanus</i>	Kornblume		+		+													
<i>Chenopodium album</i>	Weißer Gänsefuß		2m		2m		2m		+		+		2m		2m		2m	
<i>Chenopodium polyspermum</i>	Vielsamiger Gänsefuß						+											
<i>Cirsium arvense</i>	Acker-Kratzdistel		2m	2a	2m	2m	2a	2a	2m	2a	2m	2a	2m	2m	2m	2m	2a	2a
<i>Fallopia convolvulus</i>	Acker-Windenknöterich		2m		2m		2a		2m		+		+		+		+	
<i>Filago arvensis</i>	Acker-Filzkraut	3	r	r														
<i>Geranium pusillum</i>	Zwerg-Storchnabel			+		2m	+	2m	+	+	+	+		+		+	+	2m
<i>Gnaphalium uliginosum</i>	Sumpf-Ruhrkraut		+															
<i>Myosotis arvensis</i>	Acker-Vergißmei nicht			2m	+	2m		2m		2m	+	2m		2m			+	2m
<i>Papaver dubium</i>	Saat-Mohn		+	r	+			+										
<i>Persicaria maculosa</i>	Floh-Knöterich		+		2m		2m		+		+		+		+		+	
<i>Poa annua</i>	Einjähriges Rispengras		2a	2m	2m	2a	2m	2a	2m	2a	2m	2b	2m	2m	2m		2m	2a
<i>Stachys palustris</i>	Sumpf-Ziest			+	+	+												
<i>Stellaria media</i>	Vogel-Sternmiere			+														
<i>Sonchus arvensis</i>	Acker-Gänsedistel				+		+									r		
<i>Sonchus asper</i>	Rauhe Gänsedistel		+		+		+		+		+				1			

Kulturart	Sorte/Klon	Weiden										Pappeln						
		Gudrun		Tordis		Tora		Sven		Jorr		Hybr.275		Max 3		Weser 6		
	<i>Thlaspi arvense</i>	Acker-Hellerkraut																
	<i>Tripleurospermum maritimum</i>	Küsten-Kamille	3	2m	2a	+	2b	+	2a	+	2b		2b	+	2a		3	2m
	<i>Veronica arvensis</i>	Feld-Ehrenpreis			+													
	<i>Viola tricolor</i>	Wildes Stiefmütterchen	+		+			r	+	+	+		+		+	+	+	
	Ruderalarten																	
	<i>Artemisia vulgaris</i>	Gewöhnlicher Beifuß		+					+			r		+				r
	<i>Cirsium vulgare</i>	Lanzett-Kratzdistel		+		+	+	+		+		+		r				+
	<i>Convolvulus arvensis</i>	Acker-Winde		+														
	<i>Conyza canadensis</i>	Kanadisches Berufkraut	2m	3	2m	3	2m	3	2a	2a	2a	2a	2m	2m	2m	+	2m	2m
	<i>Epilobium hirsutum</i>	Zottiges Weidenröschen	r			r		r									+	r
	<i>Epilobium tetragonum</i>	Vierkantiges Weidenröschen	2m	2a	2m	2a	2m	2m	2m	2a	2m	2a	2m	2b	2m	2a	2m	2m
	<i>Equisetum arvense</i>	Acker-Schachtelhalm	+															
	<i>Galeopsis tetrahit</i>	Gewöhnlicher Hohlzahn	+		+	r	+	r									+	
	<i>Galium aparine</i>	Kletten-Labkraut		1		+		2m		+		+		2m	+	2m	+	2a
	<i>Lactuca serriola</i>	Kompaß-Lattich	+	+	+	+		+	+	+	+		+		+		+	+
	<i>Polygonum aviculare</i>	Gewöhnlicher Vogelknöterich	1		2m		2m		2m		2m				2m		2m	
	<i>Sagina procumbens</i>	Liegendes Mastkraut				+		2m	+	2m								+
	<i>Senecio viscosus</i>	Klebriges Greiskraut																r
	<i>Solidago canadensis</i>	Kanadische Goldrute		+				r		r	+	+		+				+
	<i>Solidago gigantea</i>	Riesen-Goldrute								r		+		+		+		+
	<i>Tanacetum parthenium</i>	Mutterkraut-Wucherblume				r								r				
	<i>Tanacetum vulgare</i>	Rainfarn-Wucherblume						r										
	<i>Tussilago farfara</i>	Hufplattich					+	r	+			r		+		+	2m	
	<i>Urtica dioica</i>	Große Brennessel	+	2m	+	2m	+	2m	+	2m		2m	+	2a		2m	+	2m
	Wiesenarten																	
	<i>Achillea millefolium</i>	Gewöhnliche Schafgarbe	+	+	2m	+		+	2m	+								2m
	<i>Agrostis capillaris</i>	Rot-Straußgras	2m	+		+	2m	+										
	<i>Campanula patula</i>	Wiesen-Glockenblume	+		+			r		+								
	<i>Cerastium holosteoides</i>	Gewöhnliches Hornkraut	2a	+	2a	2m	2m	2m	2m	2m		+	2m	2m	2m		2m	
	<i>Dactylis glomerata</i>	Wiesen-Knäuelgras		+		+						+		+	+			+
	<i>Daucus carota</i>	Wilde Möhre						r										
	<i>Elymus repens</i>	Gewöhnliche Quecke	2a	2a	2a	2a	2m	2a	2b	2a	2b	2a	3	2a	3	2m	2b	3
	<i>Festuca rubra</i>	Rot-Schwingel								r		r						
	<i>Galium album</i>	Großblütig. Wiesen-Labkraut															+	+
	<i>Heracleum sphondylium</i>	Wiesen-Bärenklau																r
	<i>Holcus lanatus</i>	Wolliges Honiggras								r				+				
	<i>Hieracium laevigatum</i>	Glattes Habichtskraut					r											
	<i>Odontites vulgaris</i>	Roter Zahntrost	2											+				

Kulturart	Sorte/Klon	Weiden										Pappeln						
		Gudrun		Tordis		Tora		Sven		Jorr		Hybr.275		Max 3		Weser 6		
<i>Lolium perenne</i>	Deutsches Weidelgras																	
<i>Leontodon autumnalis</i>	Herbst-Löwenzahn	+		+		+									1			
<i>Lythrum salicaria</i>	Blut-Weiderich			r		+												
<i>Phleum pratense</i>	Wiesen-Lieschgras	+	+	+	+													+
<i>Plantago lanceolata</i>	Spitz-Wegerich					r					+		+					
<i>Plantago major</i>	Breit-Wegerich	2a		2m		2a		2a		2a		2a		2a		2a		
<i>Poa trivialis</i>	Gewöhnliches Rispengras		2m		2m		2m		2m		2m		2m	+	+	+	+	2m
<i>Ranunculus repens</i>	Kriechender Hahnenfuß										+		+		+			+
<i>Rumex obtusifolius</i>	Stumpfblätriger Ampfer	2a	2b	2m	2b	2a	2a	2a	2a	2m	2a	2m	2a	2a	2a	2a	2a	2a
<i>Taraxacum officinale agg.</i>	Gewöhnlicher Löwenzahn	1	r	2m	+				+	+	+				1		+	
<i>Trifolium pratense</i>	Rot-Klee	2m		+		+			+		2m				2m		+	
<i>Veronica serpyllifolia</i>	Quendel-Ehrenpreis	+	+		+	+	+	+	+	+	+				r			
<i>Vicia cracca</i>	Vogel-Wicke			+														+
<i>Vicia sepium</i>	Zaun-Wicke							r										r
Waldarten																		
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Berg-Ahorn	+	+		+	+			+	+	+		+		+		+	+
<i>Betula pendula</i>	Hänge-Birke		2m		+				+		+				+		+	r
<i>Fraxinus excelsior</i>	Gewöhnliche Esche														r			+
<i>Epilobium angustifolium</i>	Schmalblättriges Weidenröschen	+	+		+	+	+	+	+	+	+	r	+		+	+	+	+
<i>Epilobium montanum</i>	Berg-Weidenröschen		+					+		+	+		2m		+			+
<i>Quercus robur</i>	Stiel-Eiche																	r
<i>Rubus fruticosus</i>	Echte Brombeere				+													+
<i>Rubus idaeus</i>	Himbeere							r		+					+			
<i>Sambucus nigra</i>	Schwarzer Holunder												r					+
sonstige Arten																		
<i>Brachythecium albicans</i>	Weißli. Kurzbüchsenmoos		2m		2m	2m	2m				2m	2m	2m	2m	2m			
<i>Brachythecium rutabulum</i>	Krückenförmiges Kurzbüchsenmoos				2m	2m		2m	2m	2m		2a					2m	2m
<i>Bryum argenteum</i>	Silber-Birnenmoos		2m															
<i>Bryum caespitium</i>	Rasiges Birnenmoos	2m	2m															
<i>Bryum rubens</i>	Rotfrüchtiges Birnenmoos				2m													
<i>Ceratodon purpureus</i>	Gemeines Hornzahnmoos		2m					2m					2m					
Gemeinsame Artenzahl 2006 und 2007:		c		20	17	17	18	11	12	9	17							
Summe der Arten 2006 und 2007:		(A + B)		76	69	71	63	52	52	48	66							
Präsenz-Gemeinschaftskoeffizient:		G_s = ((2*c)/(A+B))*100		52,63	49,28	47,88	57,14	41,50	46,16	37,50	50,00							

R = Rote Liste

**Anhang 3: Artenlisten der epigäischen Fauna auf der KUP Krummenhennersdorf
2006 - 2007**

Artenliste der Webspinnen (2006)

Webspinnen (Araneae)	RL (D)	RL (SN)	Tora	Jorr	Hybride	Max 3	Summe
Spezies							
<i>Alopecosa pulverulenta</i> (CLERCK)			2	2			4
<i>Bathyphantes gracilis</i> (BLACKWELL)			1	1	2		4
<i>Centromerita bicolor</i> (BLACKWELL)			8	20	1	6	35
<i>Coelotes terrestris</i> (WIDER)			1	1			2
<i>Dicymbium nigrum</i> f. <i>brevisetosum</i> LOCKET				2			2
<i>Diplostyla concolor</i> (WIDER)			11	1	5	2	19
<i>Drassyllus praeficus</i> (L.KOCH)		3				1	1
<i>Drassyllus pusillus</i> (C.L.KOCH)			1	2	1	1	5
<i>Erigone atra</i> BLACKWALL				4	5	2	11
<i>Erigone dentipalpis</i> (WIDER)				1			1
<i>Euophrys frontalis</i> (WALCKENAER)			1				1
<i>Lepthyphantes tenuis</i> (BLACKWALL)				5	1	1	7
<i>Meioneta rurestris</i> (C.L.KOCH)				1		1	2
<i>Micaria pulicaria</i> (SUNDEVALL)			1		1	1	3
<i>Mioxena blanda</i> (SIMON)				1			1
<i>Oedothorax apicatus</i> (BLACKWALL)			183	122	120	122	547
<i>Pachygnatha degeeri</i> SUNDEVALL			2	1			3
<i>Pardosa palustris</i> (LINNAEUS)					2		2
<i>Porrhomma microphthalmum</i> (O.P.-CAMBRIDGE)			1	1		1	3
<i>Robertus neglectus</i> (O.P.-CAMBRIDGE)						1	1
<i>Tallusia experta</i> (O.P.-CAMBRIDGE)			1				1
<i>Trochosa ruricola</i> (DE GEER)			17	10	5	21	53
<i>Trochosa terricola</i> THORELL			2			2	4
<i>Xerolycosa miniata</i> (C.L.KOCH)		4			1		1
<i>Xysticus kochi</i> THORELL				1			1
<i>Zelotes latreillei</i> (SIMON)			1				1
<i>Zelotes subterraneus</i> (C.L.KOCH)			1				1
<i>Zora spinimana</i> (SUNDEVALL)				1			1
juvenile Lycosidae			17	13	15	24	69
juvenile Gnaphosidae						3	3
juvenile Thomisidae			9	6	6	1	22
Summe gesamt			302	230	202	221	811
Artenzahl gesamt			16	18	11	13	28
Weberknechte (Opiliones)			47	39	39	35	160

Artenliste der Webspinnen (2007)

Webspinnen (Araneae)	RL (D)	RL (SN)	Tora	Jorr	Hybride	Max 3	Summe
Spezies							
<i>Alopecosa cuneata</i> (CLERCK)			1				1
<i>Alopecosa pulverulenta</i> (CLERCK)			1	2	2	1	6
<i>Arctosa perita</i> (LATREILLE)	3	3	2				2
<i>Aulonia albimana</i> (WALCKENAER)				1			1
<i>Bathyphantes gracilis</i> (BLACKWALL)				2		4	6
<i>Centromerita bicolor</i> (BLACKWALL)			11	6	8	12	37
<i>Centromerus sylvaticus</i> (BLACKWALL)			2		1	2	5
<i>Clubiona terrestris</i> WESTRING			1	1			2
<i>Coelotes terrestris</i> (WIDER)				2			2

Webspinnen (Araneae)	RL (D)	RL (SN)	Tora	Jorr	Hybride	Max 3	Summe
Crustulina guttata (WIDER)				1			1
Diplostyla concolor (WIDER)			40	15	25	14	94
Diplocephalus cristatus (BLACKWALL)			2	3	9	4	16
Diplocephalus picinis (O.P.-CAMBRIDGE)				1	1		2
Drassyllus lutetianus (L.KOCH)			7	4	4	2	17
Drassyllus praeficus (L.KOCH)	3		1				1
Drassyllus pusillus (C.L.KOCH)			6	3	2	2	13
Enoplognatha ovata (CLERCK)			2				2
Erigone atra BLACKWALL			23	12	10	14	59
Erigone dentipalpis (WIDER)					3	5	8
Euophrys frontalis (WALCKENAER)					1	1	2
Larinioides cornutus (CLERCK)				1	1		2
Lepthyphantes tenuis (BLACKWALL)			4	3	7	14	28
Leptorhoptrum robustum (WESTRING)					3	1	4
Linyphia hortensis SUNDEVALL						1	1
Meioneta rurestris (C.L.KOCH)			14	6	5	4	29
Mioxena blanda (SIMON)			1				1
Micaria pulicaria (SUNDEVALL)			2	2	2	1	7
Micrargus herbigradus (BLACKWALL)			2	2			4
Microlinyphia pusilla (SUNDEVALL)						3	3
Oedothorax apicatus (BLACKWALL)			183	349	225	238	995
Oedothorax agrestis (BLACKWALL)			4	3			7
Oedothorax retusus (WESTRING)			11	36	7	7	61
Oedothorax fuscus (BLACKWALL)			12			2	14
Ozyptila claveata (WALCKENAER)	3	3		1		1	2
Ozyptila simplex (O.P.-CAMBRIDGE)	3				1		1
Pachygnatha clercki SUNDEVALL				2			2
Pachygnatha degeeri SUNDEVALL			1				1
Panamomops sulcifrons (WIDER)				1			1
Pardosa agrestis (WESTRING)					2		2
Pardosa hortensis (THORELL)				2	4		6
Pardosa lugubris (WALCKENAER)			36	11	10	2	59
Pardosa palustris (LINNAEUS)			4	3			7
Pardosa prativaga (L.KOCH)			15	5	7	3	30
Pardosa pullata (CLERCK)			2		1	1	4
Philodromus cespitum (WALCKENAER)			1	1	2	1	5
Phrurolithus festivus (C.L.KOCH)					1	1	2
Pisaura mirabilis (CLERCK)			1				1
Porrhomma microphthalmum (O.P.-CAMBRIDGE)			1	2	1	3	7
Robertus neglectus (O.P.-CAMBRIDGE)			1			1	2
Tetragnatha extensa (LINNAEUS)			1		1		2
Trochosa ruricola (DE GEER)			27	12	10	6	55
Trochosa terricola THORELL			31	15			46
Walckenaeria atrotibialis (O.P.-CAMBRIDGE)			6	2		2	10
Walckenaeria dysderoides (WIDER)				2			2
Xerolycosa miniata (C.L.KOCH)	4		2				2
Xysticus kochi THORELL			1				1
Zelotes subterraneus (C.L.KOCH)			2			1	3
Zora spinimana (SUNDEVALL)			1	1			2
Summe (adulte Spinnen)			469	515	356	354	1694
juvenile Lycosidae (Pardosa)			454	147	164	63	828
juvenile Linyphiidae			5	8	3	6	22
juvenile Gnaphosidae			10	4	3	4	21
juvenile Thomisidae (Xysticus)			1				1
Individuenzahlen gesamt (adulte + juvenile)			935	674	526	427	2566
Artenzahl gesamt	5	2	38	35	29	31	58
Weberknechte (Opiliones)			49	25	29	14	117

Artenliste der Laufkäfer (2006)

Laufkäfer (Carabidae)	BartSchV	RL (D)	RL (SN)	Tora	Jorr	Hybride	Max 3	Summe
Spezies								
<i>Amara aenea</i> (DE GEER)				8	1	5	5	19
<i>Amara apricaria</i> (PAYKULL)							1	1
<i>Amara bifrons</i> (GYLLENHAL)							1	1
<i>Amara communis</i> (PANZER)					4		7	11
<i>Amara consularis</i> (DUFTSCHMID)						2	1	3
<i>Amara convexior</i> STEPHENS				1				1
<i>Amara familiaris</i> (DUFTSCHMID)				8	4	3	2	17
<i>Amara lunicollis</i> SCHIÖDTE							1	1
<i>Amara plebeja</i> (GYLLENHAL)				4	2	1	3	10
<i>Amara similata</i> (GYLLENHAL)				2	11	25	10	48
<i>Anchomenus dorsalis</i> (PONTOPPIDAN)				1				1
<i>Anisodactylus binotatus</i> (FABRICIUS)				1		1		2
<i>Bembidion lampros</i> (HERBST)				1		2	7	10
<i>Blemus discus</i> (FABRICIUS)							1	1
<i>Calathus ambiguus</i> (PAYKULL)				12	9	6	12	39
<i>Calathus fuscipes</i> (GOEZE)				88	21	37	40	186
<i>Calathus melanocephalus</i> (LINNÉ)				3	5	1	2	11
<i>Carabus cancellatus</i> ILLIGER	§	V	3			1	1	2
<i>Carabus hortensis</i> LINNÉ	§						1	1
<i>Carabus nemoralis</i> O.F.MÜLLER	§			1			1	2
<i>Cychrus caraboides</i> (LINNÉ)					1	1		2
<i>Harpalus affinis</i> (SCHRANK)				1	6	4	4	15
<i>Harpalus distinguendus</i> (DUFTSCHMID)				5	4	7	2	18
<i>Harpalus rufipes</i> (DE GEER)				80	97	147	129	453
<i>Harpalus tardus</i> (PANZER)							5	5
<i>Nebria brevicollis</i> (FABRICIUS)				6	6	17	13	42
<i>Notiophilus biguttatus</i> (FABRICIUS)							1	1
<i>Poecilus cupreus</i> (LINNÉ)				15	12	93	114	234
<i>Poecilus versicolor</i> (STURM)					5	12		17
<i>Pterostichus melanarius</i> (ILLIGER)				73	38	93	127	331
<i>Pterostichus strenuus</i> (PANZER)				1				1
<i>Synuchus vivalis</i> (ILLIGER)				1		3	2	6
<i>Trechus quadristriatus</i> (SCHRANK)				10	9	9	9	37
Gesamt				322	235	470	502	1529
Artenzahl				21	17	21	27	33

Artenliste der Laufkäfer (2007)

Laufkäfer (Carabidae)	BartSchV	RL (D)	RL (SN)	Tora	Jorr	Hybride	Max 3	Summe
Spezies								
Agonum mülleri (HERBST)				1				1
Amara aenea (DE GEER)				35	26	30	10	101
Amara apricaria (PAYK.)							1	1
Amara aulica (PANZER)				1	2	1		4
Amara bifrons (GYLLENHAL)				1		1	3	5
Amara communis (PANZER)				15	17	67	20	119
Amara convexior STEPHENS				1		2	5	8
Amara eurynota (PANZER)			V		1	2	1	4
Amara familiaris (DUFTSCHMID)				3	3	1		7
Amara lunicollis SCHIÖDTE					1			1
Amara ovata (FABR.)		R			1			1
Amara plebeja (GYLLENHAL)					1			1
Amara similata (GYLLENHAL)				5	8	3	3	19
Anchomenus dorsalis (PONT.)				2		4		6
Anisodactylus binotatus (FABR.)				11	5	5	4	25
Asaphidion flavipes (LINNÉ)							2	2
Bembidion lampros (HERBST)				38	39	35	53	165
Bembidion properans STEPH.				9	7	5	6	27
Bembidion quadrimaculatum (LINNÉ)				2		1		3
Calathus ambiguus (PAYK.)				6	3	3	1	13
Calathus fuscipes (GOEZE)				15	8	5	1	29
Calathus melanocephalus (LINNÉ)				14	8	13	5	40
Carabus cancellatus ILLIGER	§	3	v		2	1	1	4
Carabus granulatus LINNÉ	§			1	2	2		5
Carabus nemoralis O.F.MÜLLER	§			2		1	1	4
Clivina collaris HERBST			V*				1	1
Clivina fossor (LINNÉ)				1	1	1	1	4
Cychrus caraboides (LINNÉ)				1	3	4		8
Dyschirius globosus (HERBST)				6	7		10	23
Harpalus affinis (SCHRANK)				53	25	37	37	152
Harpalus distinguendus (DUFTSCHMID)				22	5	2	8	37
Harpalus latus (LINNÉ)				6				6
Harpalus rubripes (DUFT.)				1	1			2
Harpalus rufipes (DE GEER)				240	169	152	89	650
Harpalus signaticornis (DUFT.)				1		1	1	3
Harpalus tardus (PANZER)				2	2	3	2	9
Lasiotrechus discus (FABR.)					1			1
Leistus ferrugineus (LINNÉ)					4		4	8
Limodromus assimilis (PAYK.)				2				2
Loricera pilicornis (FABR.)					2	1	1	4
Microlestus maurus (STURM)				2				2
Nebria brevicollis (FABR.)				5	1	2	3	11
Notiophilus biguttatus (FABR.)				3	1		3	7
Notiophilus germinyi FAUVEL			3				1	1
Ophonus rufibarbis (FABR.)					2	1		3
Panagaeus bipustulatus (FABR.)				2				2
Poecilus cupreus (LINNÉ)				137	74	38	12	261
Poecilus versicolor (STURM)				61	13	15		89
Pterostichus melanarius (ILLIGER)				16	17	24	17	74
Pterostichus niger (SCHALL.)				10	6	9	14	39
Pterostichus oblongopunctatus (FABR.)							2	2
Pterostichus strenuus (PANZER)				1	1	4	1	7
Stomis pumicatus (PANZER)				4	2	5	3	14
Synuchus vivalis (ILLIGER)				14	13	10	9	46
Trechus quadristriatus (SCHRANK)				13	21	34	24	92
Individuenzahlen gesamt				764	505	525	360	2155
Artenzahlen gesamt		2	4	41	39	37	36	56

Beifänge aus den Bodenfallen auf der KUP Krummenhennersdorf 2006

Arten	Tora	Jorr	Hybride	Max 3
Nutzinsekten				
<i>Coccinella septempunctata</i> (Coccinellidae)			x	x
<i>Propylaea quatuordecimpunctata</i> (Coccinellidae)				x
<i>Thea vigintiduopunctata</i> (Coccinellidae)				x
<i>Forficula auricularia</i> (Ohrwürmer)	x	x	x	x
<i>Silpha obscura</i> (Silphidae)	x	x	x	x
<i>Necrophorus vespilloides</i> (Silphidae)	x	x	x	x
Schadinsekten				
<i>Saltatoria</i> (Heuschrecken)		x	x	
<i>Cryptorhynchus lapathi</i> (Erlenwürger) (Curculionidae)	x			
<i>Melasma populi</i> (Blattkäfer)	x			x
Chrysomelidae (weitere Blattkäfer)	x	x	x	x

Ergebnisse der Beifänge aus den Bodenfallen und der Kescher- und Handfänge auf der KUP Krummenhennersdorf 2007

Arten	Tora	Jorr	Hybride	Max 3
Nutzinsekten				
<i>Coccinella septempunctata</i> (Coccinellidae)			x	x
<i>Propylaea quatuordecimpunctata</i> (Coccinellidae)				x
<i>Thea vigintiduopunctata</i> (Coccinellidae)				x
<i>Forficula auricularia</i> (Ohrwürmer)	x	x	x	x
<i>Silpha obscura</i> (Silphidae)	x	x	x	x
<i>Necrophorus vespilloides</i> (Silphidae)	x	x	x	x
Schadinsekten				
<i>Phyllopertha horticola</i> (Gartenlaubkäfer) (Scarabaeidae)	x	x	x	x
<i>Tuberolachnus salignus</i> (Baumblattlaus) (Aphididae)	x	x		
<i>Saltatoria</i> (Heuschrecken)		x	x	
<i>Cryptorhynchus lapathi</i> (Erlenwürger) (Curculionidae)	x			
<i>Melasma populi</i> (Blattkäfer)	x			x
Chrysomelidae (weitere Blattkäfer)	x	x	x	x
Pilzliche Schaderreger				
<i>Pollaccia saliciperda</i> (Weidenschorf)	x	x		
<i>Melampsora larici-populina</i> (Pappelrost)			x	x

Impressum

Herausgeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren: Dr. Christian Röhrich, Sophia Kiesevalter
Abteilung Pflanzliche Erzeugung
Gustav-Kühn-Str. 8
04159 Leipzig
Telefon: 0341 9174-284
Telefax: 0341 9174-189
E-Mail: christian.roehricht@smul.sachsen.de

Redaktion: siehe Autoren

Endredaktion: Öffentlichkeitsarbeit
Präsidialabteilung

ISSN: 1867-2868

Redaktionsschluss: November 2008

Für alle angegebenen E-Mail-Adressen gilt:

Kein Zugang für elektronisch signierte sowie für verschlüsselte elektronische Dokumente

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.