

Aschen aus Biomassefeuerungen - Zusammensetzung und Verwertung

OBERNBERGER Ingwald

Institut für Verfahrenstechnik, Technische Universität Graz, A-8010 Graz, Inffeldgasse 25, Österreich

Ingenieurbüro BIOS, A-8010 Graz, Sandgasse 47, Österreich

Schlagworte

Pflanzenasche, Aschenanalysen, Nährstoffe, Schadstoffe, Aschenverwertung, Kreislaufwirtschaft, Stoffbilanzen.

Zusammenfassung

Durch die verstärkte Nutzung biogener Energieträger (Waldhackgut, Sägenebenprodukte, Stroh) zur Fern- und Prozeßwärmebereitstellung kommt der Frage nach einer sinnvollen und umweltverträglichen Verwertung der anfallenden Aschen eine stark steigende Bedeutung zu. Im Zentrum des Interesses steht dabei die Wiedereingliederung der Asche in natürliche Wachstumsprozesse im Bereich der forst- und landwirtschaftlichen Bodennutzung (Schließung des Mineralienkreislaufes der Natur), sofern es sich beim eingesetzten Brennstoff um chemisch unbehandeltes Material handelt. Im Rahmen dieser Studie sind die aus umfangreichen Forschungsarbeiten gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Art und Zusammensetzung von Pflanzenaschen sowie bezüglich deren Verwendungsmöglichkeiten dargestellt. Weiters wird auf wesentliche zu beachtende Rahmenbedingungen und zu empfehlende Richtwerte bezüglich einer umweltverträglichen Aschenverwertung eingegangen.

Aus den durchgeführten Aschenanalysen, Feldversuchen und Stoffbilanzen zeigt sich, daß normalerweise eine Mischung aus Grob- und Zyklonflugasche im heizwerksspezifischen Mengenverhältnis als Sekundärrohstoff mit Dünge- und Kalkwirkung eingesetzt werden kann. Die zweite und feinere Flugaschenfraktion, die in Elektrofiltern oder Rauchgaskondensationsanlagen anfällt, sollte aufgrund ihrer hohen Schwermetallgehalte getrennt gesammelt und deponiert bzw. industriell verwertet werden. Um eine kontrollierte Aschenausbringung zu gewährleisten, sind entsprechende Richtlinien bezüglich Kontrollanalysen und Frachtenregelungen einzuhalten und die Aschelogistik mit den Aschenverwertern (Landwirten) abzustimmen.

1) Einleitung und Problemstellung

1.1) Allgemeine Rahmenbedingungen

Der Gesamtdurchschnitt des Anteils der Biomasse an der Primärenergiebereitstellung der 15 EU-Staaten liegt derzeit bei knapp über 3,0 %, wobei in diesem Anteil auch die thermische Müllverwertung inkludiert ist [1, 2]. Erklärtes Ziel der Europäischen Union ist es, diesen Anteil bis zum Jahr 2010 auf 5,5 % und bis zum Jahr 2025 auf rund 8,0 % durch eine entsprechende Forschungs-, Entwicklungs-, Agrar- und Förderungspolitik zu steigern [1, 2, 4]. Die

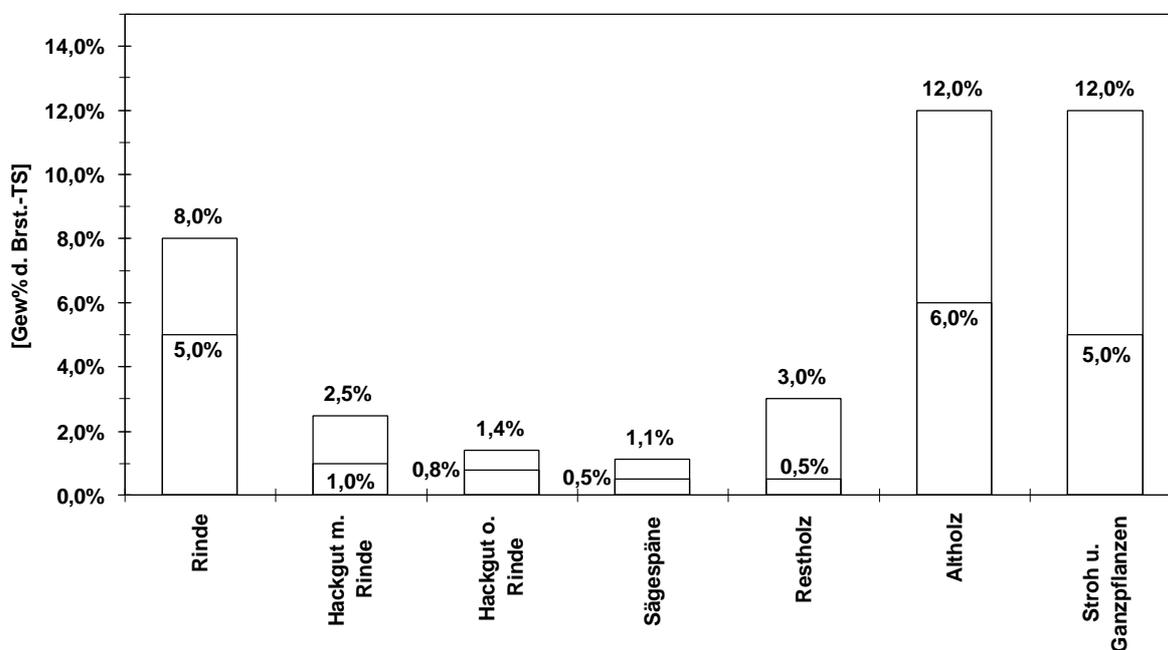
hauptsächlich verwendeten Brennstoffe sind Sägenebenprodukte (Rinde, Fräs- und Sägespäne), Wald- bzw. Industriehackgut sowie insbesondere in Dänemark Stroh [5].

Gleichzeitig sind auch die Mengen der bei der thermischen Nutzung fester Biomasse anfallenden Verbrennungsrückstände, den Pflanzenaschen, stark im Steigen begriffen, wenn man berücksichtigt, daß der Aschengehalt der einzelnen Biomasse-Brennstoffe zwischen normalerweise 0,5 Gew% d. TS (für Weichholz) und 5,0–8,0 Gew% d. TS für Rinde liegt (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Aschengehalte unterschiedlicher Biomasse-Brennstoffe

Erläuterungen: Datenquelle [5]; die angegebenen Werte stellen obere und untere Grenzen dar; bei Hackgut und Spänen gelten die unteren Werte für Weichholz, die oberen für Hartholz; Aschengehaltsbestimmung laut ISO1171-1981 bei 550°C.

Verwendete Abkürzungen: HG...Hackgut; GP...Ganzpflanzen.



Da in den nächsten Jahren mit weiteren Zuwächsen zu rechnen ist, kommt einer sinnvollen Verwertung der anfallenden Pflanzenasche große Bedeutung zu, da einerseits die Deponiemengen und -kosten ansteigen und andererseits eine umweltverträgliche und kontrollierte Vorgangsweise erreicht werden soll.

Derzeit wird die in Biomassefeuerungen anfallende Asche entweder deponiert oder (meist) unkontrolliert auf Agrarland oder im Wald ausgebracht. Es besteht also sehr dringender Handlungsbedarf.

1.2) Ökologische Rahmenbedingungen

Die Forcierung der Energiegewinnung aus Biomasse wirkt wohl positiv in Richtung der Einsparung von CO₂-Emissionen aus fossilen Quellen und trägt damit zu einer Verminderung der globalen Erwärmung bei (eine nachhaltige Waldpflege vorausgesetzt), wesentlich für eine gesamt positive Bewertung dieser Technologie ist jedoch, ob auch die bei der Verbrennung anfallende Pflanzenasche wieder in natürliche Kreisläufe einkoppelbar ist.

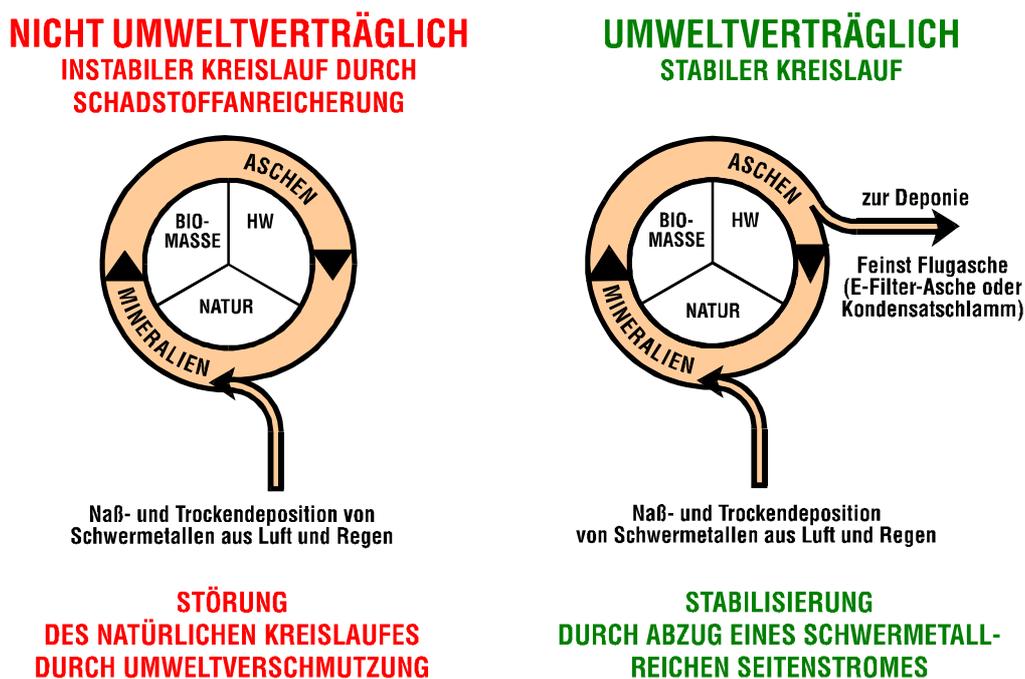
Es geht also beim Prozeß der dezentralen Energiegewinnung aus Biomasse neben der Schließung des CO₂-Kreislaufes vor allem um eine möglichst weitgehende Schließung des Mineralienkreislaufes der Natur über die bei der Verbrennung anfallenden Pflanzenaschen:

Boden/Nährstoff - Wurzel/Pflanze - Verbrennung - Asche - Boden

Nun wird dieser Aschenkreislauf jedoch, wie bereits durchgeführte Forschungsarbeiten belegen, von außen gestört [12, 13, 14]. Der Störfaktor heißt Umweltverschmutzung und zeigt sich in Form von Naß- und Trockendepositionen von Schadelemente auf Bäume und Böden. Durch diesen Schwermetalleintrag wird der Aschenkreislauf instabil. Er kann nicht mehr vollständig geschlossen werden, da es dadurch zu einer Anreicherung von Schwermetallen im Kreislauf (sprich in Böden und Biomasse) kommen würde und die über Luft und Regen eingetragenen Schadstoffe nach der Verbrennung zum größten Teil und in aufkonzentrierter Form in den anfallenden Aschen verbleiben.

Will man den Aschenkreislauf trotzdem aufrechterhalten, so muß es eine Schnittstelle geben, über die ein schadstoffreicher Seitenstrom ausgeschleust werden kann, der den Gesamtprozeß wieder stabilisiert (siehe Abbildung 2).

Abbildung 2: Stabiles und instabiles Kreislaufsystem hinsichtlich einer Rückführung von Aschen aus Biomassefeuerungen auf Böden



Je effektiver durch diesen Seitenstrom die eingetragenen Schadstoffe wieder entfernt werden können ohne den tatsächlichen Aschenkreislauf zu beschneiden, umso besser wird eine Kreislaufwirtschaft mit Aschen aus Biomassefeuerungen funktionieren. Die zentrale Frage, die sich stellt lautet also: Wo zieht man mit größter ökologischer Effizienz den angesprochenen Seitenstrom aus dem Kreislauf ab bzw. welche Aschenfraktionen sind rezyklierbar und welche nicht? In diesem Zusammenhang ist die Kenntnis der Aschenzusammensetzungen und der in der Feuerung auftretenden Stoffflüsse der aschebildenden Elemente vom Brennstoff in die einzelnen Aschenfraktionen für unterschiedliche Biomasse-Brennstoffe von wesentlicher Bedeutung.

Hinsichtlich einer nachhaltigen Aschenverwertung sollte darauf geachtet werden, daß Holz- bzw. Rindenasche primär auf Forstflächen bzw. Energieholzflächen rückgeführt wird, da nur in diesem Fall eine Kreislaufwirtschaft im eigentlichen Sinn gegeben ist. Agrarflächen sollten nur dann für eine Düngung mit Holz- bzw. Rindenasche herangezogen werden, wenn eine Aschenausbringung im Wald aufgrund der vorliegenden geografischen Randbedingungen oder aus technisch-wirtschaftlichen Gründen nicht durchgeführt werden kann bzw. wenn die Asche aus der Stroh- oder Ganzpflanzenverbrennung stammt.

1.3) Logistische Rahmenbedingungen

Um eine umweltverträgliche Aschenverwertung in der Praxis sicherzustellen, ist es notwendig den Bauern die Asche richtig gemischt, qualitätsgeprüft und in einem streufähigen Zustand zu übergeben, um eine entsprechende Akzeptanz der Landwirte für eine Aschenabnahme zu erreichen. Diese Anforderungen machen eine entsprechende Aschenaufbereitung in Abhängigkeit von der Heizwerksgröße und vom verwendeten Brennstoff erforderlich. Weiters muß die Frage der Aschenlagerung beachtet werden, da die Asche hauptsächlich im Winter anfällt, was eine sofortige Ausbringung durch den Landwirt oft unmöglich macht.

Hinsichtlich der Ausbringungstechnik sind für Pflanzenaschen geeignete Düngerstreuer zu finden, die eine zeitsparende, kostengünstige und staubarme Aschenausbringung ermöglichen. Dadurch wird den Bauern, die mit der Manipulation von Pflanzenaschen meist wenig bis keine Erfahrung haben, die Geräteauswahl vereinfacht und die Aschenausbringung optimiert.

Was die Verwendungsmöglichkeiten von Pflanzenaschen betrifft, so muß zwischen einer direkten und einer indirekten Aschennutzung (z.B. Verwendung der Pflanzenasche als Zuschlagstoff in der landwirtschaftlichen Kompostierung) unterschieden werden. Dem Vorteil der geringeren Staubentwicklung bei der Kompostausbringung steht der höhere Manipulations- und Arbeitsaufwand gegenüber. Beide Möglichkeiten sind zu berücksichtigen, es ist von vornherein nicht möglich, die eine oder andere Variante zu favorisieren, insbesondere da auch die landwirtschaftliche Infrastruktur eines bestimmten Gebietes (verfügbare Maschinen) berücksichtigt werden muß.

1.4) Technologische Rahmenbedingungen

Die in Biomassefeuerungen anfallende Asche setzt sich normalerweise aus drei unterschiedlichen Fraktionen zusammen (siehe Abbildung 3):

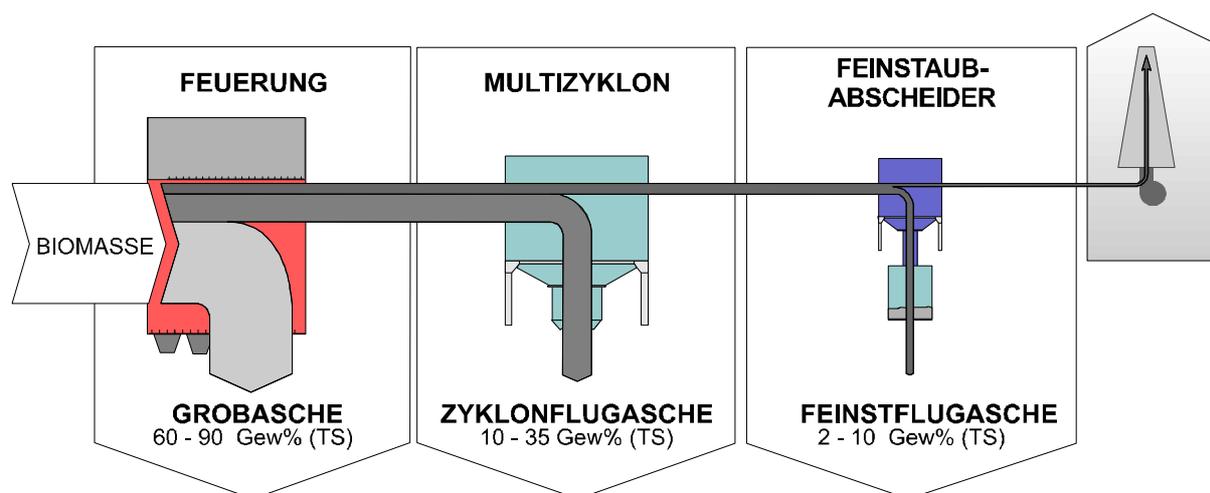
Der Grob- oder Rostasche: Im Verbrennungsteil der Feuerungsanlage anfallender, überwiegend mineralischer Rückstand der eingesetzten Biomasse. Diese Aschenfraktion ist meist mit in der Biomasse enthaltenen Verunreinigungen wie Sand, Erde und Steinen durchsetzt. Weiters sind, speziell beim Einsatz von Rinde und Stroh als Brennstoff, häufig gesinterte Aschenteile und Schlackebrocken in der Grobasche enthalten.

Der Zyklonflugasche: Als feine Partikel in den Rauchgasen mitgeführte feste, überwiegend anorganische Brennstoffbestandteile, die als Stäube im Wendekammer- und Wärmetauscherbereich der Feuerung sowie in - dem Kessel nachgeschalteten Fliehkraftabscheidern (Zyklonen) - anfallen.

Der Feinstflugasche: In (den Multizyklonen meist nachgeschalteten) Elektro- oder Gewebefiltern bzw. als Kondensatschlamm in Rauchgaskondensationsanlagen anfallende Flugaschenfraktion. Bei Biomassefernheizwerken ohne entsprechenden Apparaten zur Feinstflugaschenabscheidung verbleibt diese als Reststaub im Rauchgas.

Abbildung 3: Schematische Darstellung der in Biomassefeuerungen anfallenden Aschefraktionen

Erläuterungen: Datenquelle [5]; die angegebenen Gewichtsanteile der einzelnen Aschenfraktionen am Gesamtaschenanfall beruhen auf den Ergebnissen bereits durchgeführter Untersuchungen und gelten für Rostfeuerungen mit Rinde bzw. Hackgut als Brennstoff.



2) Überblick über für Pflanzenaschen geeignete Analysenverfahren

In diesem Kapitel sollen Analysenmethoden für Pflanzenaschen zusammengefaßt werden, die nachweislich einen korrekten Elementnachweis gewährleisten, über mehrere Jahre getestet, auf ihre Plausibilität geprüft wurden und sich auch im Rahmen internationaler Ringversuche bewährt haben. Die in Tabelle 1 zusammengestellten Verfahren erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und sind nicht als endgültig anzusehen, sondern repräsentieren den derzeitigen Stand der Wissenschaft auf diesem Gebiet [16, 17, 18].

Besonders hervorgehoben sollte die Anwendung der Säure-Druckaufschlußtechnik werden, da dadurch bei Einsatz einer entsprechenden Säuremischung bzw. durch einen gestuften Aufschluß sowie die Anwendung entsprechend hoher Drücke und Temperaturen eine vollständige Lösung der chemisch sehr komplexen anorganischen und organischen Aschematrix möglich ist.

Offene Säureaufschlüsse bergen bei Pflanzenaschen immer die Gefahr einer unvollständigen Lösung der Probe, einer Kontamination der Probe durch Umgebungseinflüsse und die Gefahr von Verlusten leichtflüchtiger Elemente. Diese Probleme treten bei dem erläuterten Druckaufschlußverfahren nicht auf.

Neben der Analyse kommt insbesondere einer repräsentativen Probenahme große Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang wird auf DIN 51701 Teil 2 "Probenahme und Probenvorbereitung" sowie auf [18] verwiesen. Es zeigte sich, daß eine Mahlung der Ascheproben vor der Probenteilung Vorteile hinsichtlich der Homogenität der Analysenproben bringt. Bezüglich der gewählten Mahl- bzw. Brecheinrichtungen ist darauf zu achten, daß es zu keinen Fremdeinträ-

gen von Materialien bzw. Elementen kommt und die Zerkleinerungsmaschinen selbst nicht aus Elementen bestehen, die analysiert werden sollen. Weiters ist darauf zu achten, daß durch den Zerkleinerungsschritt keine Grob- oder Feinanteile der Probe verloren gehen (keine ungewünschte Klassierungen erfolgen).

Tabelle 1: Empfohlene Methoden für den Aufschluß und die Analyse von Pflanzenaschen

Erläuterungen: Datenquellen [12, 16, 17, 18].

Verwendete Abkürzungen: ICP....Plasmaemissionspektrometrie; AAS....Atomabsorptionsspektrometrie; GAAS....Graphitrohrenatomabsorptionsspektrometrie; mmolare....millimolare.

Parameter	Methode
Wassergehalt	DIN 51718 (bei 105 °C); Dreifachanalyse
pH-Wert	in Anlehnung an ÖNORM L 1083
elektrische Leitfähigkeit	Wasserextrakt 1:10; Messung in Anlehnung an ÖNORM M 5883
$C_{\text{tot.}}$, S	Verbrennung mit nachgeschalteter gaschromatografischer Trennung; Elementaranalysator; Doppelbestimmung (in Anlehnung an ÖNORM G 1071, G 1072, G 1073)
CO ₂ (Karbonat)	in Anlehnung an ÖNORM EN 196-21.
$C_{\text{org.}}$	$C_{\text{org.}} = C_{\text{tot.}} - C_{\text{CO}_2}$
Eluatanalysen und Cl ⁻	DIN 38414 Teil 4 (DEV-S4-Verfahren)
Cl	<u>Aufschluß:</u> Eluation über 24 h mit bidestilliertem Wasser. <u>Messung:</u> Ionenchromatografie
Hg	<u>Aufschluß:</u> Säuredruckaufschluß mit HNO ₃ p.a. (subdest.) in Quarzgefäßen. <u>Messung:</u> Kaltdampftechnik und AAS.
Cr-VI	in Anlehnung an DIN 38405 Teil 24
vollständiger Nachweis von Si, Ca, Mg, K, Na, P, Al, S, Fe, Mn, Cu, Zn, Co, Mo, As, Ni, Cr, Pb, Cd, V, Ba	<u>Aufschluß:</u> mehrstufiger Säuredruckaufschluß mit HNO ₃ (65%) / HF / H ₃ BO ₃ . <u>Messung:</u> ICP, AAS bzw. GAAS (je nach Nachweisgrenzen).
PCDD und PCDF	Aufarbeitung und Analytik laut VDI-Richtlinie 3499; Bestimmung der 17 toxischen 2,3,7,8-substituierten DD/DF Kongeneren mit HRGC/HRMS (Hochauflösung: R=10.000)
PAK (Summe)	Soxleth-Extraktion mit Cyclohexan, mehrstufige Extraktaufbereitung, gaschromatografische Bestimmung laut US-EPA (16 Verbindungen)
PCB (Summe)	in Anlehnung an die US-EPA-Richtlinie, Bestimmung der sechs Kongeneren Nr. 28, 52, 101, 138 und 180

3) Physikalische Charakteristika und chemische Zusammensetzung von Pflanzenaschen

3.1) Fraktionsanteile, Korngrößen, Dichten und Schüttdichten von Pflanzenaschen

Richtwerte für die durchschnittlichen Anteile der einzelnen Aschenfraktionen an der gesamten anfallenden Asche in Abhängigkeit des eingesetzten Brennstoffes und der Anlagentechnologie sind in Tabelle 2 dargestellt. Wesentlich ist in diesem Zusammenhang, daß es sich nur um Richtwerte handelt, da die tatsächliche Mengenverteilung der Asche auf die einzelnen Fraktionen von sehr vielen Einflußfaktoren, wie der Korngröße des eingesetzten Brennstoffes, der Feuerraumgeometrie, der Feuerungstechnik, der Regelung der Luftzufuhr und der Flugstaubabscheidetechnologie abhängt.

Tabelle 2: Anteile der einzelnen Aschenfraktionen an der Gesamtasche

Erläuterungen: Datenquellen [9, 10, 12]; alle Angaben in Gew%; die Angaben für Rinde und Hackgut gelten für Rost- bzw. Unterschubfeuerungen; die Angaben für Sägespäne gelten für Unterschubfeuerungen; die Angaben für Stroh- und Getreide-Ganzpflanzenfeuerungen gelten für Zigarrenbrenner; alle Anlagen waren mit der Feuerung nachgeschalteten Zyklon- und Feinstaubabscheidern ausgestattet.

Verwendete Abkürzungen: GP....Getreide-Ganzpflanzen.

Brennstoff / Aschenfraktion	in Rinden- feuerungen	in Hackgut- Feuerungen	in Sägespäne- feuerungen	in Stroh- und GP-Feuerungen
Grobasche	65,0 - 85,0	60,0 - 90,0	20,0 - 30,0	80,0 - 90,0
Zyklonflugasche	10,0 - 25,0	10,0 - 30,0	50,0 - 70,0	2,0 - 5,0
Feinstflugasche	2,0 - 10,0	2,0 - 10,0	10,0 - 20,0	5,0 - 15,0

Hinsichtlich des zu erwartenden durchschnittlichen Gesamtaschenanfalls in Abhängigkeit vom eingesetzten Brennstoff wird auf Abbildung 1 verwiesen. Zu ergänzen wäre in diesem Zusammenhang noch, daß es bei Wirbelschichtfeuerungen durch den Austrag von Bettmaterial mit der Asche zu einer deutlichen Erhöhung des Aschenanfalls gegenüber den laut Brennstoff-Aschengehalt zu erwartenden Werten kommt. Die mit der Asche ausgetragene Menge an Bettmaterial beträgt nach durchgeführten Untersuchungen das 1,0 bis 3,0-fache des Brennstoff-Aschengehaltes [19]. Bei Altholzfeuerungen kommt es durch den hohen Anteil an mineralischen Verunreinigungen und Fremddanteilen ebenfalls zu deutlich höheren Aschenanfällen als bei Frischholzfeuerungen (siehe Abbildung 1).

Die Teilchendichten der einzelnen Aschenfraktionen (siehe Tabelle 3) nehmen von der Grobasche bis zur Feinstflugasche leicht ab, was durch die mit der Feinheit der Flugasche abnehmenden Anteile an mineralischen Verunreinigungen und zunehmenden Salzgehalte erklärt werden kann. Mineralische Verunreinigungen (Sand, Erde, Steine) besitzen relativ große Korngrößen und Teilchendichten, wodurch sie sich in der Grobasche anreichern, Salzpartikel besitzen vergleichsweise geringe Teilchendichten und bilden sich zum Teil erst bei erfolgreicher Abkühlung der Rauchgase im Kessel durch Kondensation von Salzdämpfen.

Die Schüttdichten nehmen generell mit der Feinheit der Aschenfraktionen ab. Aschen aus Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen weisen besonders geringe Schüttdichten auf, was durch

Unterschiede im mineralischen Aufbau und der Kristallstruktur im Vergleich zu Holz- und Rindenaschen begründet zu sein scheint (siehe auch Kapitel 3.2).

Tabelle 3: Mittlere Teilchen- und Schüttdichten von Biomasse-Aschen

Erläuterungen: Datenquellen [5, 9, 22, 43]; sämtlichen Ergebnissen liegen mindestens 5 Einzelmessungen zugrunde; alle Angaben beziehen sich auf Trockensubstanz; die Angaben für Rinde und Hackgut gelten für Rost- bzw. Unterschubfeuerungen; die Angaben für Sägespäne gelten für Unterschubfeuerungen; die Angaben für Stroh- und Getreide-Ganzpflanzenfeuerungen gelten für Zigarrenbrenner; alle Anlagen waren mit der Feuerung nachgeschalteten Zyklon- und Feinstaubabscheidern ausgestattet; die Bestimmung der Teilchendichten erfolgte mit einem Heliumpyknometer der Marke Autopyknometer 1320 der Fa. Micromeritics; die Bestimmung der Schüttdichten erfolgte laut DIN 51705.

Verwendete Abkürzungen: k.A.....keine Angabe.

Aschenfraktion	Teilchendichte (mittlere) [kg/m ³]	Schüttdichte	
		Mittelwert	Standardabw. [kg/m ³]
Rindenfeuerungen			
Grobasche	2.600 - 3.000	950	200
Zyklonflugasche	2.400 - 2.700	650	120
Feinstflugasche	2.300 - 2.600	350	120
Hackgutfeuerungen			
Grobasche	2.600 - 3.000	950	200
Zyklonflugasche	2.400 - 2.700	500	150
Feinstflugasche	2.300 - 2.600	k.A.	k.A.
Sägespänefeuerungen			
Grobasche	2.600 - 3.000	650	150
Zyklonflugasche	2.400 - 2.700	300	100
Feinstflugasche	2.300 - 2.600	k.A.	k.A.
Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen			
Grobasche	k.A.	300	80
Zyklonflugasche	um 2.200	150	60
Feinstflugasche	um 2.200	150	50

Die Korngrößen der anfallenden Aschen nehmen normalerweise mit der Feinheit des eingesetzten Brennstoffes, mit fallendem Aschengehalt des Brennstoffes und mit fallendem Anteil an mineralischen Verunreinigungen im Brennstoff ab. Die Korngrößenverteilung der Grobaschen ist weiters sehr stark vom Anteil und der Größe versinterter oder verschlackter Partikel abhängig. Die Korngrößen der Flugaschenfraktionen richten sich nach der Art der verwendeten Staubabscheidertechnologie.

3.2) Nährstoffgehalte von Pflanzenaschen

3.2.1) Nährstoffgehalte von Holz- Rinden-, Stroh- und Ganzpflanzenaschen

Die Tabellen 4 und 5 stellen die mittleren Nährstoffkonzentrationen der in Holz-, Rinden-Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen anfallenden Aschen gegenüber. Die Ergebnisse machen

deutlich, daß in den anfallenden Aschenfraktionen durchaus bedeutende Mengen an Nährstoffen enthalten sind, die eine Ausbringung der Aschen gerechtfertigt und interessant erscheinen lassen. Der einzige fehlende Nährstoff (er wurde auch nicht analysiert) ist der Stickstoff. Er entweicht bei der Verbrennung nahezu vollständig mit dem Rauchgas und muß bei einer Düngung mit Pflanzenasche entsprechend ergänzt werden.

Tabelle 4: Durchschnittliche Nährstoffgehalte in den einzelnen Aschefraktionen von Rinden-, Hackgut- und Spänefeuerungen

Erläuterungen: Datenquellen [9, 10, 12]; analysiert wurden rund 10 Proben pro Aschenfraktion für jeden angegebenen Brennstoff; beprobt wurden moderne österreichische Biomassefernheizwerke; Testläufe wurden mit Rinde (Fichte), Hackgut (Fichte) und Sägespänen (Fichte) über jeweils mindestens 48 h durchgeführt; verwendete Analysemethoden laut Tabelle 1; alle Angaben in Gew% d. TS.

Verwendete Abkürzungen: STABW....Standardabweichung

Nährstoff	Grobasche		Zyklonflugasche		Feinstflugasche	
	Mittelwert	STABW	Mittelwert	STABW	Mittelwert	STABW
CaO	41,7	8,7	35,2	11,8	32,2	6,9
MgO	6,0	1,2	4,4	0,9	3,6	0,7
K ₂ O	6,4	2,1	6,8	2,3	14,3	7,2
P ₂ O ₅	2,6	1,0	2,5	0,9	2,8	0,7
Na ₂ O	0,7	0,2	0,6	0,3	0,8	0,6

Tabelle 5: Durchschnittliche Nährstoffgehalte in den einzelnen Aschefraktionen von Stroh- und Getreide-Ganzpflanzenfeuerungen

Erläuterungen: Datenquelle [9]; analysiert wurden 2 Proben pro Aschenfraktion für jeden angegebenen Brennstoff; beprobt wurde eine moderne österreichische 3,15 MW_{th}-Zigarrenfeuerung; Testläufe wurden mit Stroh (Winterweizen) und Getreide-Ganzpflanzen (Triticale) über jeweils mindestens 48 h durchgeführt; verwendete Analysemethoden laut Tabelle 1; alle Angaben in Gew% d. TS.

Verwendete Abkürzungen: GP....Getreide-Ganzpflanzen.

Nährstoff	Grobasche		Zyklonflugasche		Feinstflugasche	
	Stroh	GP	Stroh	GP	Stroh	GP
CaO	7,8	7,0	5,9	6,0	1,2	1,0
MgO	4,3	4,2	3,4	3,2	0,7	0,4
K ₂ O	14,3	14,0	11,6	12,7	48,0	47,0
P ₂ O ₅	2,2	9,6	1,9	7,4	1,1	10,3
Na ₂ O	0,4	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3

Der direkte Vergleich der Nährstoffgehalte von Rinden-, Hackgut-, Stroh- und Ganzpflanzenaschen zeigt, daß für Ca die Konzentrationen in Rinden- und Hackgutaschen weit über jenen von Stroh- und Ganzpflanzenaschen liegen. Ca zählt zu den Hauptbestandteilen der Holzaschen und kann zur Bodenverbesserung beitragen. Bei Mg sind kaum Unterschiede in der Konzentration der Aschen gegeben. K liegt in Stroh- und Ganzpflanzenaschen deutlich konzentrierter vor. Bei P sind die Unterschiede in den Aschen von Stroh, Rinde und Hackgut ge-

ring, während die Ganzpflanzen infolge des erhöhten Gehaltes im Korn durchschnittlich eine um das 4-fache höhere Konzentration in der Asche aufweisen.

3.2.2) Nährstoffgehalte von Rest- und Altholzaschen

Die in Tabelle 6 dargestellten Analysenergebnisse für Aschen aus Restholzfeuerungen liegen in derselben Größenordnung wie bei der Verwendung von Frischholz. Auffallend ist der vergleichsweise geringe Mg- und P-Gehalt. Unter Umständen liegen diese Minderbefunde am nicht vollständigen Aufschluß der Aschenproben, da nur ein Salzsäureauszug durchgeführt wurde. Die Altholzaschen, für die Säuretotalaufschlüsse verwendet wurden, weisen einen deutlich niedrigeren Nährstoffgehalt auf. Dies dürfte durch den deutlich höheren Anteil an Fremdstoffen in der Asche begründet sein, die nicht direkt aus der Biomasse selbst stammen, sondern durch die Behandlung bzw. Nutzung des Holzes eingetragen wurden.

Tabelle 6: Durchschnittliche Nährstoffgehalte in den einzelnen Aschefractionen von Biomassefeuerungen, die Rest- bzw. Altholz einsetzen

Erläuterungen: Datenquellen [23, 24, 25]; analysiert wurden rund 7 Proben jeder Aschefraktion; Testläufe erfolgten in mehreren schweizerischen Alt- bzw. Restholzfeuerungen; verwendete Aufschlußmethode für Restholz: HCl-Mikrowellenauszug; verwendete Aufschlußmethode für Altholz: Säuretotalaufschluß mit anschließender ICP-OES-Messung; alle Angaben in Gew% d. TS.

Nährstoff	Grobasche		Zyklonflugasche		Feinstflugasche	
	Restholz	Altholz	Restholz	Altholz	Restholz	Altholz
CaO	32,6	31,1	32,3	28,5	--	16,7
MgO	3,0	2,8	3,2	3,0	--	0,5
K ₂ O	6,6	2,3	7,5	2,7	--	7,5
P ₂ O ₅	0,9	0,9	1,3	1,4	--	0,4
Na ₂ O	--	1,1	--	1,1	--	3,3

3.3) Schwermetallgehalte von Pflanzenaschen

3.3.1) Schwermetallgehalte von Holz- Rinden-, Stroh- und Ganzpflanzenaschen

Die Tabellen 7 und 8 stellen die mittleren Schwermetallkonzentrationen in den einzelnen Aschenfraktionen aus Holz-, Rinden- Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen gegenüber.

Es ist ersichtlich, daß die Gehalte der meisten umweltrelevanten Schwermetalle von der Grobasche bis hin zur Feinstflugasche deutlich zunehmen (siehe As, Cd, Pb, Zn, Hg). Die Erklärung dafür ist, daß diese Elemente bzw. deren Verbindungen durch Reaktion unter Bildung gasförmiger Produkte oder durch Verdampfung in der heißen Brennkammer in die Gasphase übergehen. Während der Abkühlung der Rauchgase im der Feuerung nachgeschalteten Kessel findet dann eine Kondensation dieser Dämpfe an schon vorhandenen Keimen, den Flugaschenteilchen oder unter Bildung von Aerosolen statt. Durch hohe Verbrennungstemperaturen, wie sie in modernen Biomassefeuerungen üblich sind (zwischen 800 und 1.100°C), fallen daher schwer-

metallarme Grobaschen an. Der Schwermetallgehalt steigt dann in den beiden Flugaschenfraktionen mit sinkender Abscheidetemperatur und zunehmender Partikelfinheit an.

Tabelle 7: Durchschnittliche Schwermetallgehalte in den einzelnen Aschefractionen von Rinden-, Hackgut- und Spänefeuerungen im Vergleich zu Grenz- und Richtwerten

Erläuterungen: Datenquellen [9, 10, 12]; analysiert wurden rund 10 Proben pro Aschenfraktion für jeden angegebenen Brennstoff; beprobt wurden moderne österreichische Biomassefernheizwerke; Testläufe wurden mit Rinde (Fichte), Hackgut (Fichte) und Sägespänen (Fichte) über jeweils mindestens 48 h durchgeführt; verwendete Analysemethoden laut Tabelle 1; alle Angaben in mg/kg TS; Bodenrichtwerte laut ÖNORM L 1075.

Verwendete Abkürzungen: STABW....Standardabweichung; RL....österreichische Richtlinien für einen sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen im Wald bzw. im Acker- und Grünland [41, 44].

Element	Grobasche		Zyklonflugasche		Feinstflugasche		Grenzwerte RL	Boden- richtwerte
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW		
Cu	164,6	85,6	143,1	46,7	389,2	246,4	250,0	100,0
Zn	432,5	305,2	1.870,4	598,5	12.980,7	12.195,9	1.500,0	300,0
Co	21,0	6,5	19,0	7,3	17,5	5,2	100,0	50,0
Mo	2,8	0,7	4,2	1,4	13,2	9,8	20,0	5,0
As	4,1	3,1	6,7	4,3	37,4	41,4	20,0	20,0
Ni	66,0	13,6	59,6	19,0	63,4	35,4	100,0	60,0
Cr	325,5	383,0	158,4	61,0	231,3	263,7	250,0	100,0
Pb	13,6	10,4	57,6	20,5	1.053,3	1.533,0	100,0	100,0
Cd	1,2	0,7	21,6	8,1	80,7	59,2	8,0	1,0
V	43,0	10,0	40,5	16,6	23,6	9,1	100,0	50,0
Hg	0,01	0,03	0,04	0,05	1,47	2,05	--	1,0

Eine wesentliche sich daraus ergebende Konsequenz für eine nachhaltige Wirtschaft ist die, daß die kleinste Aschenfraktion, die Feinstflugasche, aufgrund der hohen Schwermetallgehalte deponiert bzw. industriell verwertet werden muß. Die beiden übrigen Aschenfraktionen, die gemeinsam meist mehr als 90 % der gesamten anfallenden Asche ausmachen (siehe Tabelle 2), sollen als Mischung aus Grob- und Zyklonflugasche nach heizwerksspezifischem Anfall auf forst- bzw. landwirtschaftliche Böden rückgeführt werden.

Vergleicht man die Zusammensetzung dieser Aschengemische aus Grob- und Zyklonflugasche nach Anfall mit den Grenzwerten laut österreichischen Richtlinien für einen sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen auf Böden [41, 44] (siehe Abbildung 4), die für den Wald seit 1997 und für Acker- und Grünland seit 1998 in Kraft sind (siehe auch Kapitel 6), so ist ersichtlich, daß diese normalerweise eingehalten werden. Lediglich bei reinen Sägespänefeuerungen kann es für Cd zu Grenzwertsüberschreitungen kommen. Die Ursache dafür liegt in der Feinheit des Brennstoffes und dem damit verbundenen hohen Zyklonflugaschenanteil, wodurch deutlich größere Partikeloberflächen zur Kondensation und Desublimation leicht flüchtiger Schwermetalle zur Verfügung stehen. Der gleiche Sachverhalt gilt auch, wenn man die weniger strengen Grenzwerte der Deutschen Klärschlammverordnung als Bezugsbasis heranzieht.

Tabelle 8: Durchschnittliche Schwermetallgehalte in den einzelnen Aschefractionen von Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen im Vergleich zu Grenz- und Richtwerten

Erläuterungen: Datenquelle [9]; analysiert wurden 2 Proben pro Aschenfraktion für jeden angegebenen Brennstoff; beprobt wurde eine moderne österreichische 3,15 MW_{th}-Zigarrenfeuerung; Testläufe wurden mit Stroh (Winterweizen) und Getreide-Ganzpflanzen (Triticale) über jeweils mindestens 48 h durchgeführt; verwendete Analysemethoden laut Tabelle 1; alle Angaben in mg/kg TS; Bodenrichtwerte laut ÖNORM L 1075.

Verwendete Abkürzungen: GP...Getreideganzpflanzen; Standardabweichung; RL...österreichische Richtlinien für einen sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen im Wald bzw. im Acker- und Grünland [41, 44].

Element	Grobasche		Zyklonflugasche		Feinstflugasche		Grenzwerte RL	Boden- richtwerte
	Stroh	GP	Stroh	GP	Stroh	GP		
Cu	17,0	47,0	26,0	60,0	44,0	68,0	250,0	100,0
Zn	75,0	150,0	172,0	450,0	520,0	1.950,0	1.500,0	300,0
Co	2,0	3,1	1,0	1,6	<1,0	<1,0	100,0	50,0
Mo	<10,0	<10,0	<10,0	10,0	10,0	18,0	20,0	5,0
As	<5,0	<5,0	<5,0	5,0	22,0	16,2	20,0	20,0
Ni	4,0	10,5	<2,5	7,5	<2,5	<2,5	100,0	60,0
Cr	13,5	20,5	17,5	16,5	6,8	5,8	250,0	100,0
Pb	5,1	4,5	21,5	15,0	80,0	67,5	100,0	100,0
Cd	0,2	0,2	1,8	1,4	5,2	5,1	8,0	1,0
V	<10,0	20,5	<10,0	16,0	<10,0	<10,0	100,0	50,0
Hg	<0,1	<0,1	<0,1	0,20	0,70	0,10	--	1,0

Aufgrund der Tatsache, daß eine weitere Absenkung der Grenzwerte laut Klärschlammverordnungen in den nächsten Jahren zu erwarten ist und um eine wirklich nachhaltige Kreislaufwirtschaft mit Pflanzenaschen zu erreichen, sollte mittel- bis langfristig versucht werden die Schwermetallkonzentrationen im Aschengemisch aus Grob- und Zyklonflugasche nach Anfall durch entsprechende verfahrens- und feuerungstechnische Maßnahmen soweit zu verringern, daß die Bodenrichtwerte eingehalten werden können bzw. daß man für die Problemschwermetalle Cd und Zn möglichst nahe an sie herankommt. Forschungsarbeiten mit dieser Zielsetzung sind im Gange [5, 14].

Vergleicht man die mittleren Schwermetallkonzentrationen von Hackgut- und Rindenaschen mit denen von Stroh- und Ganzpflanzenaschen, so kann generell gesagt werden, daß Stroh- und Ganzpflanzenaschen deutlich geringere Gehalte (Faktor 3 bis Faktor 20) aufweisen. Die Schwermetallkonzentrationen in Grob- und Zyklonflugaschen aus Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen liegen generell deutlich unter den Bodenrichtwerten laut ÖNORM L 1075, lediglich für die Feinstflugaschen treten Richtwertsüberschreitungen auf. Die Schwermetallkonzentrationen in Heu-Aschen von extensiv bewirtschafteten Grünlandflächen liegen ebenfalls in den für Stroh- und Ganzpflanzenaschen festgestellten Konzentrationsbereichen [27, 28].

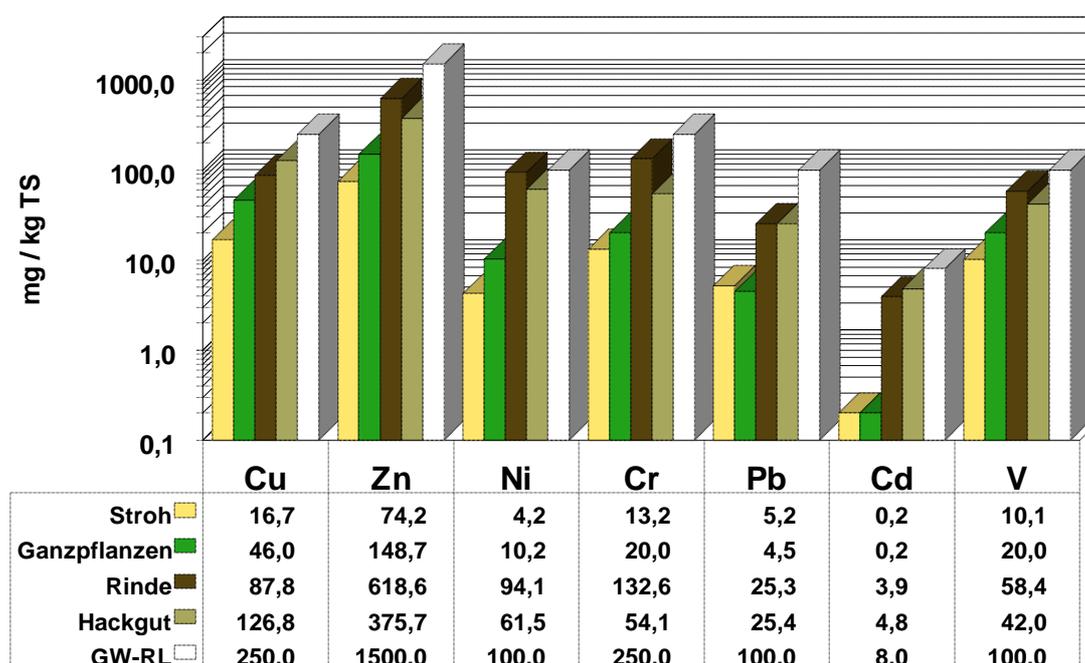
Stroh, Getreide-Ganzpflanzen und Heu sind wesentlich schwermetallärmer als holzartige Biomasse, was in den Aschenzusammensetzungen deutlich wird. Grund dafür sind erstens die höheren Schwermetalleinträge durch Naß- und Trockendepositionen auf Waldflächen, zweitens die kurze Umtriebszeit der Einjahrespflanzen im Vergleich zur 70- bis 120-jährigen von

Wald, wodurch höhere Metallakkumulationen in der Biomasse auftreten, und drittens der niedrigere pH-Wert von Waldböden, der den Großteil der Schwermetalle (insbesondere Cd und Zn) mobiler macht und dadurch die Pflanzenaufnahme begünstigt [12, 13, 26].

Abbildung 4: Durchschnittliche Schwermetallgehalte in Aschengemischen nach Anfall in Abhängigkeit vom eingesetzten Brennstoff und im Vergleich zu den Grenzwerten laut österreichischen Richtlinien für einen sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen auf Böden

Erläuterungen: Datenquellen [9, 12]; Rinde: Fichte; Hackgut: Fichte; Stroh: Winterweizen; Getreide-Ganzpflanzen: Triticale; Aschengemisch nach Anfall: Mischung aus Grob- und Zyklonflugasche im heizwerksspezifischen Mengenverhältnis.

Verwendete Abkürzungen: GW-RL...österreichische Richtlinien für einen sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen im Wald bzw. im Acker- und Grünland [41, 44].



3.3.2) Schwermetallgehalte von Rest- und Altholzaschen

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Schwermetalluntersuchungen für Aschen aus Rest- und Altholzfeuerungen dargestellt. Die Resultate zeigen, daß bereits Restholzaschen eine Anreicherung an Schwermetallen im Vergleich zu Aschen aus Frischholzfeuerungen aufweisen. Die Konzentrationen liegen, insbesondere für die Elemente Pb und Ni, über den Grenzwerten laut österreichischen Richtlinien für einen sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen auf Böden bzw. bereits im Bereich der Grenzwerte laut Deutscher Klärschlammverordnung.

Die Aschen aus Altholzfeuerungen weisen deutlich höhere Schwermetallkonzentrationen auf. Es liegen für sämtliche Aschefractionen Grenzwertsüberschreitungen in bezug auf die österreichischen Richtlinien für einen sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen auf Böden bzw. die Deutsche Klärschlammverordnung vor.

Die Anreicherung der leichtflüchtigen Schwermetalle Cd, Pb, As und Zn mit sinkender Abscheidetemperatur und zunehmender Feinheit der anfallenden Aschefraktion ist in Alt- und Restholzfeuerungen ebenso ausgeprägt wie in Frischholzfeuerungen.

Tabelle 9: Durchschnittliche Schwermetallgehalte in Aschengemischen nach Anfall in Abhängigkeit vom eingesetzten Brennstoff und im Vergleich zu den Grenzwerten laut österreichischen Richtlinien für einen sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen auf Böden

Erläuterungen: Datenquellen [23, 24, 25]; analysiert wurden rund 7 Proben jeder Aschefraktion; Testläufe erfolgten in mehreren schweizerischen Alt- bzw. Restholzfeuerungen; verwendete Aufschlußmethode für Restholz: HCl-Mikrowellenauszug; verwendete Aufschlußmethode für Altholz: Säuretotalaufschluß mit anschließender ICP-OES-Messung; alle Angaben in mg/kg TS.

Verwendete Abkürzungen: RL...österreichische Richtlinien für einen sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen im Wald bzw. im Acker- und Grünland [41, 44].

Element	Grobasche		Zyklonflugasche		Feinstflugasche		Grenzwerte RL
	Restholz	Altholz	Restholz	Altholz	Restholz	Altholz	
Cu	170,0	1.234,0	226,0	437,0	--	422,0	250,0
Zn	503,0	6.914,0	3.656,0	15.667,0	--	164.000,0	1.500,0
Co	25,0	21,0	18,0	30,0	--	5,0	100,0
Mo	6,6	7,0	10,0	11,0	--	11,0	20,0
As	--	17,0	--	59,0	--	104,0	20,0
Ni	113,0	179,0	61,0	167,0	--	74,0	100,0
Cr	236,0	466,0	212,0	1.415,0	--	404,0	250,0
Pb	363,0	2.144,0	1.182,0	8.383,0	--	50.000,0	100,0
Cd	3,3	20,0	16,0	70,0	--	456,0	8,0
V	--	171,0	--	260,0	--	153,0	100,0
Hg	<0,5	<0,5	<0,7	0,7	--	<0,5	--

Die für ein Aschengemisch aus Grob- und Zyklonflugasche aus Frischholzfeuerungen mögliche kreislaufwirtschaftliche Verwertung ist für Aschen aus Altholzfeuerungen sicher nicht und für Aschen aus Restholzfeuerungen eher nicht möglich. Grund dafür sind aufgrund der Holzbehandlung bzw. aufgrund der Art der Holznutzung eingetragene Schadstoffmengen.

3.4) Organische Schadstoffe und Gehalte an organischem Kohlenstoff in untersuchten Pflanzenaschen

Die in Tabelle 10 angeführten Ergebnisse zeigen, daß die Gehalte an organischen Schadstoffen (PCDD/F, PAK) in den untersuchten Grob- und Zyklonflugaschen nach derzeitigem Wissensstand als ökologisch unbedenklich einzustufen sind. Feinstflugaschen sind mit organischen Schadstoffen deutlich angereichert, diese Aschenfraktion sollte daher generell getrennt gesammelt und nicht auf Böden ausgebracht werden. Bei Feinstflugaschen aus Strohfeuerungen ist für PCDD/F mit Überschreitungen des Grenzwertes laut österreichischen Richtlinien für einen sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen auf Böden bzw. laut Deutscher Klärschlammverordnung zu rechnen.

Tabelle 10: Konzentrationen von organischen Schadstoffen, C_{org.} und Chlorid in untersuchten Aschefractionen aus Biomassefeuerungen im Vergleich zu Grenz- und Richtwerten

Erläuterungen: Datenquellen [9, 10, 12]; Analysenmethoden laut Tabelle 1; Grenzwerte für Aschen laut österreichischen Richtlinien für einen sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen auf Böden bzw. laut Deutscher Klärschlammverordnung; Grenzwerte für Böden und vorgeschlagene Grenzwerte laut [25]; die Daten für Rinden-, Hackgut- und Sägespäneaschen stellen Ergebnisse aus drei durchgeführten Testläufen dar; die Daten für Stroh- und Ganzpflanzenaschen stellen Mittelwerte aus zwei durchgeführten Testläufen dar.

Verwendete Abkürzungen: TE....Toxizitätsäquivalent; PCDD/F....polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane; PAK....polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe; B[a]P....Benzo[a]pyren; KSCHVO....Klärschlammverordnung.

Parameter / Asche	C _{org.} [Gew% d.TS]	Cl- [Gew% d.TS]	PCDD/F [ng TE/kgTS]	PAK [mg/kgTS]	B[a]P [mg/kgTS]
Rindenaschen					
GA	0,2 - 0,9	<0,06	0,3 - 11,7	1,4 - 1,8	1,4 - 39,7
FA	0,4 - 1,1	0,1 - 0,4	2,2 - 12,0	2,0 - 5,9	4,7 - 8,4
FFA	0,6 - 4,6	0,6 - 6,0	7,7 - 12,7	137,0 - 195,0	900,0 - 4900,0
Hackgutaschen					
GA	0,2 - 1,9	<0,01	2,4 - 33,5	1,3 - 1,7	0,0 - 5,4
FA	0,3 - 3,1	0,1 - 0,5	16,3 - 23,3	27,6 - 61,0	188,0 - 880,0
FFA	--	--	--	--	--
Strohaschen					
GA	0,8 - 9,0	0,1 - 1,1	2,3 - 14,0	0,1 - 0,2	0,0
FA	2,1 - 16,6	7,4 - 13,6	19,0 - 70,8	0,1 - 15,8	10,0 - 17,0
FFA	1,3 - 16,1	20,5 - 35,1	101 - 353	0,2 - 26	10 - 500
Getreide-Ganzpflanzenaschen					
GA	2,3 - 9,4	0,3 - 1,3	1,0 - 22,0	0,1 - 0,3	0,0
FA	1,0 - 9,9	5,2 - 16,8	12,2 - 44,0	0,1 - 0,5	0,0 - 10,0
FFA	0,8 - 4,9	14,2 - 20,8	56 - 120	0,1 - 7,3	10 - 400
Grenz- und Richtwerte					
Grenzwert für Böden	--	--	5,0 (vorgeschlagen)	5,0	1000,0 (vorgeschlagen)
Grenzwert für Aschen laut RL	--	--	100,0	20,0 (vorgeschlagen)	4000,0 (vorgeschlagen)

Die Untersuchungen für Holz- und Rindenaschen ergaben weiters, daß statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen dem Restkohlenstoffgehalt der Zyklonflugaschen und den enthaltenen Mengen an PAK bestehen. Daraus läßt sich ableiten, daß ein möglichst guter Ausbrand der Holzaschen anzustreben ist. Der C_{org.}-Gehalt der Pflanzenaschen sollte 5,0 Gew% der Trockensubstanz nicht überschreiten [12]. Dieser Wert ist auch in den österreichischen Richtlinien für einen sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen auf Böden als Richtwert definiert. Wird er überschritten, so sind Analysen der betreffenden Asche auf PCDD/F und PAK vor einer Verwertung vorzunehmen.

Vergleicht man die Ergebnisse der Konzentrationen von PAK in Holz- und Rindenaschen mit denen von Stroh- und Ganzpflanzenaschen, so ist ersichtlich, daß sich diese, moderne und gut geregelte Heizwerke vorausgesetzt, nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Die Toxizitätsäquivalente für PCDD/F der untersuchten Flugaschefractionen liegen für Stroh- und Ganzpflanzenbrennstoffe generell höher, was durch die erhöhten Chlorgehalte dieser Aschen erklärbar ist, die, wie bereits erläutert, die PCDD/F-Bildung fördern [5].

Die wichtigsten für die Vermeidung der Bildung von organischen Schadstoffen wesentlichen feuerungs- und regelungstechnischen Parameter sind die Erzielung einer möglichst vollständigen Verbrennung, um den Gehalt an unverbranntem Material in der Asche gering zu halten, und die Verwendung möglichst Cl-armer Biomasse-Brennstoffe.

Für Aschen aus Rest- und Altholzfeuerungen konnten in einschlägiger Fachliteratur nur Analysenwerte für PCDD/F-Konzentrationen gefunden werden. Aschen aus Restholzfeuerungen, die keine erhöhten Chlorgehalte aufweisen, enthielten PCDD/F-Konzentrationen von durchschnittlich 3,0 - 5,0 ng TE / kg TS [24]. Die Chloridgehalte lagen bei diesen Aschen zwischen 0,01 und 0,6 Gew% d. TS.

Bei Aschen aus Altholzfeuerungen lagen die PCDD/F-Konzentrationen für Rostaschen bei zwischen 8,0 und 14,0 ng TE / kg TS, für Zyklonflugaschen bei rund 825,0 ng TE / kg TS und für Feinstflugaschen zwischen 2.650 und 3.800 ng TE / kg TS [21, 24, 29]. Die mittleren Chloridkonzentrationen betragen für Rostaschen 0,3 Gew% d. TS, für Zyklonflugaschen 3,0 Gew% d. TS und für Feinstflugaschen 13,5 Gew% d. TS. Aschen aus Altholzfeuerungen sind somit mit PCDD/F belastet und als nicht umweltverträglich einzustufen.

3.5) pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit von Pflanzenaschen

Die pH-Werte der untersuchten Pflanzenaschen liegen für Holz- und Rindenaschen generell zwischen 12,0 und 13,0. Die Grob- und Zyklonflugaschen aus Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen weisen aufgrund der niedrigeren Ca-Gehalte und der höheren S- und Cl-Konzentrationen pH-Werte zwischen 10,5 und 11,5 auf, die Feinstflugaschen sogar nur pH-Werte zwischen 6,0 und 9,5 (siehe Tabelle 11).

Dies zeigt, daß die Zusammensetzung des wasserlöslichen, leicht beweglichen Anteiles der Holz- und Rindenaschen von Hydroxiden des K, Ca und Na beherrscht wird und stark basische Wirkung besitzt. Bei Stroh- und Ganzpflanzenaschen ist aufgrund der höheren Chlorid- und Sulfatanteile die basische Wirkung geringer.

Nach Ausbringen des Materials in der Landschaft ist mit einer raschen Umwandlung der Hydroxide in Karbonate durch Reaktion mit dem Kohlendioxid der Bodenluft zu rechnen. Dadurch wird der pH-Wert aus dem hochalkalischen in den Neutralbereich gedrückt.

Durch diese Karbonatisierung ist zu erwarten, daß sich der freie Elektrolytgehalt ebenfalls drastisch verringern wird und damit auch die elektrische Leitfähigkeit der untersuchten Aschen innerhalb von Tagen auf "Bodennormalwerte" (unter 0,75 mS/cm) absinkt.

Für den Boden ist durch diese Reaktionen mit einer Säureneutralisierung, also einer Bodenverbesserung durch Hebung des pH-Wertes, zu rechnen. Negative Auswirkungen auf Böden und Pflanzen durch den hohen pH-Wert und die hohe elektrische Leitfähigkeit sind bei einer großflächigen Aschenausbringung in der Landschaft nicht zu erwarten. Die Ergebnisse von Düngeversuchen mit Holzasche auf Acker- und Grünland bestätigen dies [12].

Tabelle 11: pH-Werte und elektrische Leitfähigkeiten von Pflanzenaschen und deren ökologische Relevanz

Erläuterungen: Datenquellen [9, 10, 12]; Analysemethoden laut Tabelle 1.

Verwendete Abkürzungen: el.LF....elektrische Leitfähigkeit.

Aschenart	Grobasche		Zyklonflugasche		Feinstflugasche	
	pH-Wert in CaCl ₂	el. LF [mS/cm]	pH-Wert in CaCl ₂	el. LF [mS/cm]	pH-Wert in CaCl ₂	el. LF [mS/cm]
Rinde	12,7	8,9	12,7	10,8	12,7	35,6
Hackgut / Späne	12,8	10,2	12,7	13,1	12,6	39,5
Stroh	11,4	9,3	10,8	25,8	9,4	49,5
Ganzpflanzen	10,8	11,4	10,5	21,0	5,9	46,7

3.6) Gehalte an Si, Al, Fe, Mn, S und Karbonat in Pflanzenaschen

In Tabelle 12 sind die Mittelwerte von Analyseergebnissen für Aschengemische aus Grob- und Zyklonflugaschen nach Anfall hinsichtlich Si, Al, Fe, Mn, S und Karbonat (CO₂) in Abhängigkeit des eingesetzten Biomasse-Brennstoffes dargestellt. Nachfolgend soll die ökologische Relevanz dieser Elemente für Böden und Pflanzen in Hinblick auf eine Aschenausbringung auf Forst- bzw. Agrarflächen diskutiert werden.

Tabelle 12: Durchschnittliche Gehalte an Si, Al, Fe, Mn, S und Karbonat (CO₂) in Aschengemischen aus Grob- und Zyklonflugasche nach Anfall in Abhängigkeit des eingesetzten Brennstoffes

Erläuterungen: Analyseverfahren laut Tabelle 1; Herkunftsland der Brennstoffe: Österreich; Rinde: Fichte; Hackgut: Fichte; Späne: Fichte; Stroh: Winterweizen; Ganzpflanzen: Triticale.

Parameter [Gew% d. TS]	Aschengemische aus Grob- und Zyklonflugaschen aus				
	Rindenfeuerungen	HG-Feuerungen	Spänefeuerungen	Strohfeuerungen	GP-Feuerungen
SiO ₂	26,00	25,00	25,00	54,00	45,00
Al ₂ O ₃	7,10	4,60	2,30	1,80	3,30
Fe ₂ O ₃	3,50	2,30	3,80	0,80	3,20
MnO	1,50	1,70	2,60	0,04	0,03
SO ₃	0,60	1,90	2,40	1,20	0,80
CO ₂	4,00	3,20	7,90	1,60	1,20

Si verhält sich im Boden ökologisch gesehen neutral, ist schwer löslich und kann zu einer Verbesserung der Bodenstruktur beitragen [30]. Vergleicht man Holz- und Rindenaschen mit Stroh- und Ganzpflanzenaschen, so ist ersichtlich, daß letztgenannte deutlich höhere Si-Gehalte aufweisen, was durch die Si-Einlagerungen in den Pflanzenhalmen bedingt ist. Die Elemente Fe und Mn sind für Pflanzen essentielle Nährstoffe [30]. Der Gesamtgehalt von Al im Oberboden (0-25 cm) liegt zum Beispiel in der Steiermark zwischen 19.000 und 57.000 mg/kg TS [31]. Die Werte des in den Aschen von Hackgut-, Späne-, Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen enthaltenen Al entsprechen somit dem natürlicher Böden, die Al-Gehalte der Rindenaschen liegen um rund den Faktor 1,5 darüber. Bei Boden-pH-Werten > 5,00 ist das im Boden vorkommende Al nicht löslich. Es ist in oxidischer und hydroxidischer Form an Ton-

minerale gebunden und vollkommen neutral. Erst bei Boden-pH-Werten $< 3,8$ (nur bei Waldböden) kann es durch eine zunehmende Freisetzung von Al^{3+} -Ionen in die Bodenlösung zu Schädigungen von Pflanzen kommen. Die alkalische Wirkung der Pflanzenasche führt zu einer pH-Wert-Hebung des Bodens, beugt also einer Versauerung und möglichen Al-Freisetzung vor. Eine Gefährdung von Böden und Pflanzen durch das in den Aschen enthaltene Al ist somit bei Böden mit pH-Werten $> 3,8$ nicht zu erwarten [32]. Für Waldböden mit pH-Werten um 4,0 zeigten die Ergebnisse bereits durchgeführter Forstdüngeversuche und Sickerwasseruntersuchungen, daß bei einer Ausbringung von Holzasche keine verstärkte Al-Freisetzung zu befürchten ist, sondern im Gegenteil durch die aschebedingte pH-Wert-Anhebung die Konzentration von gelöstem Al im Sickerwasser deutlich (statistisch hoch signifikant) verringert wurde [12].

Die S-Gehalte der untersuchten Aschengemische aus Grob- und Zyklonflugasche sind gering. S ist in den vorkommenden Konzentrationen als Pflanzennährstoff zu werten [30].

Was die Verteilung der obengenannten Elemente auf die einzelnen Aschefractionen betrifft, so sind Fe und Al in den Grob- und Zyklonflugaschen gleich verteilt. S ist sehr leicht flüchtig und somit in der Zyklonflugasche angereichert. Si und Mn sind in den Grobaschen angereichert.

Die in Grob- und Zyklonflugaschen aus Biomassefeuerungen enthaltenen Elemente liegen hauptsächlich in oxidischer Form vor. Daneben ist mit Hydroxiden, Karbonaten, Sulfaten und Chloriden zu rechnen. Der mittlere Karbonatanteil (als CO_2 gerechnet) der einzelnen Aschefractionen ist sehr stark davon abhängig, wie lange die Pflanzenasche einer feuchten und CO_2 -reichen Atmosphäre ausgesetzt ist (im Rauchgaskanal oder an offener Luft) und bei welcher Brennkammertemperatur die Biomassefeuerung arbeitet. Mit steigender Temperatur nimmt der Karbonatgehalt in der Asche stark ab. Als Referenzprozeß kann in diesem Zusammenhang der Prozeß des Kalkbrennens angesehen werden ($CaO - CaCO_3$ - Gleichgewicht), nach dem bei Temperaturen über $900^\circ C$ praktisch kein Karbonat mehr vorliegt. In die Praxis umgelegt bedeutet dies, daß bei hohen Feuerraumtemperaturen und kurzen Verweilzeiten der Asche in den Rauchgaskanälen (hoher Anlagenauslastung) mit geringen Karbonatgehalten in den anfallenden Aschen zu rechnen ist. Der Hauptbestandteil von Holz- und Rindenaschen, Ca, liegt somit vorwiegend als Brandkalk in der Asche vor. Ein zweiter wesentlicher Faktor für die Karbonatbildung sind die vorhandenen Konzentrationen an Ca und Mg in den Aschen. Dies ist der Grund wieso in Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen wo, wegen der niedrigen Ascheschmelzpunkte deutlich geringere Feuerraumtemperaturen herrschen, dennoch kaum Karbonatbildung erfolgt (Si bildet hauptsächlich Oxide, K bevorzugt Oxide, Chloride und Sulfate).

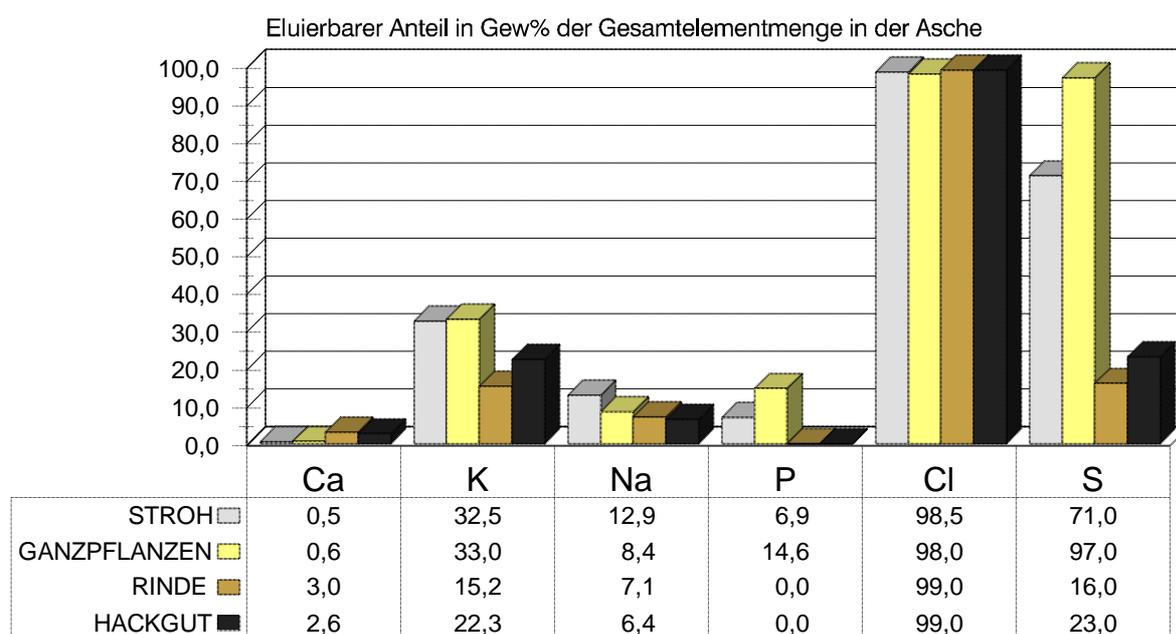
3.7) Das Eluatverhalten von Pflanzenaschen

Abbildung 5 zeigt das Eluatverhalten von Pflanzenaschen in Abhängigkeit des eingesetzten Brennstoffes auf. Es ist ersichtlich, daß über 30,0% des Nährstoffes K aus den Aschen von Stroh und Ganzpflanzen wasserlöslich sind - nahezu doppelt so viel wie für Rinden- und Hackgutaschen. Die Eluierbarkeit von Ca beträgt für Stroh und Ganzpflanzen unter 1,0% und liegt somit niedriger als für Rinde und Hackgut. Bei Na liegen beide Vergleichsgruppen mit jeweils 6,0 bis 13,0% Auswaschung im selben Bereich. Neben K ist P einer der Hauptnährstoffe im verwertbaren Aschengemisch. Sein eluierbarer Anteil liegt in Stroh- (ca. 7,0%) und in Ganzpflanzenaschen (über 14,0%) im Vergleich zu den Rinden- und Hackgutaschen (unter 0,1%) deutlich höher. Es ist somit anzunehmen, daß die kurzfristige Nährstoffverfügbarkeit von

Stroh- und Ganzpflanzenaschen über jener von Rinden- und Hackgutaschen liegt. Cl liegt erwartungsgemäß zum Großteil in wasserlöslicher Form vor. Dasselbe gilt bei Stroh- und Ganzpflanzenaschen auch für S, wogegen der S in den Hackgut- und Rindenaschen schwerlöslichere Verbindungen eingeht und nur zu rund 20% in wasserlöslicher Form vorliegt.

Abbildung 5: Durchschnittlich eluierbare Anteile von Aschengemischen aus Grob- und Zyklonflugasche nach Anfall in Abhängigkeit des eingesetzten Biomasse-Brennstoffes

Erläuterungen: Datenquellen [9, 12]; Analysenverfahren laut Tabelle 1; Herkunftsland der Brennstoffe: Österreich; Rinde: Fichte; Hackgut: Fichte; Späne: Fichte; Stroh: Winterweizen; Ganzpflanzen: Triticale.



Bezüglich der Schwermetalleluierbarkeit sind Grob- und Zyklonflugaschen aus Biomassefeuerungen bei großflächiger Ausbringung in kleinen Mengen als ökologisch unbedenklich einzustufen [9, 12].

Hinsichtlich einer Deponierung sind Aschengemische aus Grob- und Zyklonflugasche aus Rinden-, Hackgut-, Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen der Eluatklasse III gemäß ÖNORM S 2072 zuzuordnen. Als limitierender Parameter tritt bei Rinden-, Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen die elektrische Leitfähigkeit, bei Hackgutfeuerungen zusätzlich Cr-VI und bei Spänefeuerungen zusätzlich Cr-VI und B auf. Feinstflugaschen unterliegen generell der Eluatklasse III, wobei Zn, Cd, Cr-VI, As und B als limitierende Parameter von Bedeutung sind [9, 12].

4) Auftretende Stoff-Flüsse von aschebildenden Elementen in Biomassefeuerungen und daraus resultierende Schlußfolgerungen

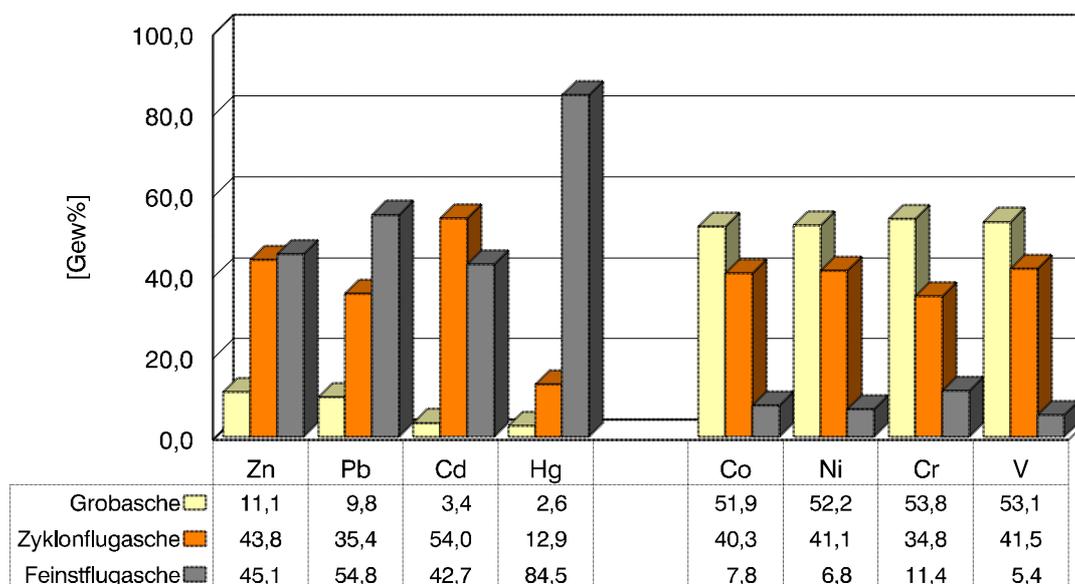
4.1) Auftretende Stoff-Flüsse von aschebildenden Elementen in Biomassefeuerungen

Die aus durchgeführten Stoff-Flußberechnung folgende Elementverteilung der Nährstoffe und Schwermetalle auf die einzelnen Aschenfraktionen macht deutlich, welche unterschiedlichen Elementbindungspotentiale die einzelnen Aschenfraktionen besitzen. In den Abbildungen 6 und 7 sind beispielhaft die mittleren in den untersuchten Rinden- und Hackgutfeuerungen auftretenden Elementverteilungen auf die einzelnen Aschefraktionen dargestellt. Die in Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen auftretenden Elementverteilungen verhalten sich ähnlich. Daraus lassen sich folgende allgemein für Biomassefeuerungen gültige Grundsätze ableiten:

- 1.) Nicht nur die Schwermetallkonzentration (siehe Kapitel 3.3) sondern auch die gebundenen Schwermetallgesamtmenge nehmen für fast alle umweltrelevanten Elemente (Zn, Pb, Cd, Hg) mit der Feinheit der Aschenfraktionen deutlich zu. Die Feinstflugaschenfraktion besitzt somit das größte Schwermetallbindungspotential.

Abbildung 6: Mittlere Elementverteilung von leicht- und schwerflüchtigen Schwermetallen auf die einzelnen Aschenfraktionen für Hackgut- und Rindenfeuerungen

Erläuterungen: Datenquellen [5, 10]; gemittelte Ergebnisse aus 11 durchgeführten Versuchsläufen in einer 4 MW_{th}-Vorschubrostfeuerungsanlage mit nachgeschaltetem Multizyklon und einer Rauchgaskondensationsanlage; 5 Versuchsläufe wurden mit Rinde (Fichte) und 6 Versuchsläufe mit Hackgut (Fichte) als Brennstoff bei Voll- und Teillastbetriebszuständen (75-100% bzw. 35-60% Anlagenauslastung) durchgeführt; durchschnittliche Zusammensetzung der einzelnen Aschefraktionen: siehe Kapitel 3.3, Tabelle 7.



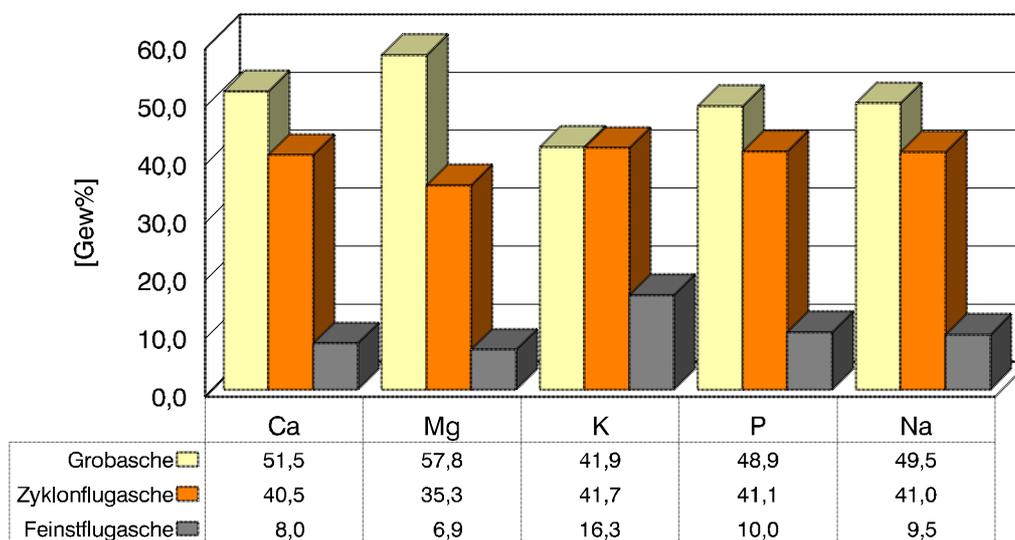
- 2.) Die durchgeführten Aschenanalysen (siehe Kapitel 3.3) zeigen, daß primär Cd und sekundär Zn die wesentlichen Problemschwermetalle in Aschen aus Biomassefeuerungen darstellen. In der Feinstflugaschenfraktion, die nur rund 5,0 bis 10,0 Gew% der Gesamtasche ausmacht, werden in Feuerungen, die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen,

durchschnittlich 35,0 bis 65,0 Gew% der gesamten mit dem Brennstoff der Feuerung zugeführten Cd-Menge und rund 35,0 bis 55,0 Gew% der gesamten Zn-Menge gebunden.

- 3.) Was die Pflanzenhauptnährstoffe (Ca, Mg, K, P) betrifft, so sind in einer Mischung aus Grob- und Zyklonflugasche nach heizwerksspezifischem Anfall durchschnittlich rund 80 bis 95 Gew% der gesamten durch den Brennstoff zugeführten Menge enthalten.

Abbildung 7: Mittlere Elementverteilung von Nährstoffen auf die einzelnen Aschenfraktionen für Hackgut- und Rindenfeuerungen

Erläuterungen: Datenquellen [5, 10]; gemittelte Ergebnisse aus 11 durchgeführten Versuchsläufen in einer 4 MW_{th}-Vorschubrostfeuerung mit nachgeschaltetem Multizyklon und einer Rauchgaskondensationsanlage; 5 Versuchsläufe wurden mit Rinde (Fichte) und 6 Versuchsläufe mit Hackgut (Fichte) als Brennstoff bei Voll- und Teillastbetriebszuständen (75-100% bzw. 35-60% Anlagenauslastung) durchgeführt; durchschnittliche Zusammensetzung der einzelnen Aschefraktionen: siehe Kapitel 3.2, Tabelle 4.



4.2) **Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen der Stoff-Flußberechnungen für aschebildende Elemente hinsichtlich Aschenverwertung und Umweltverträglichkeit**

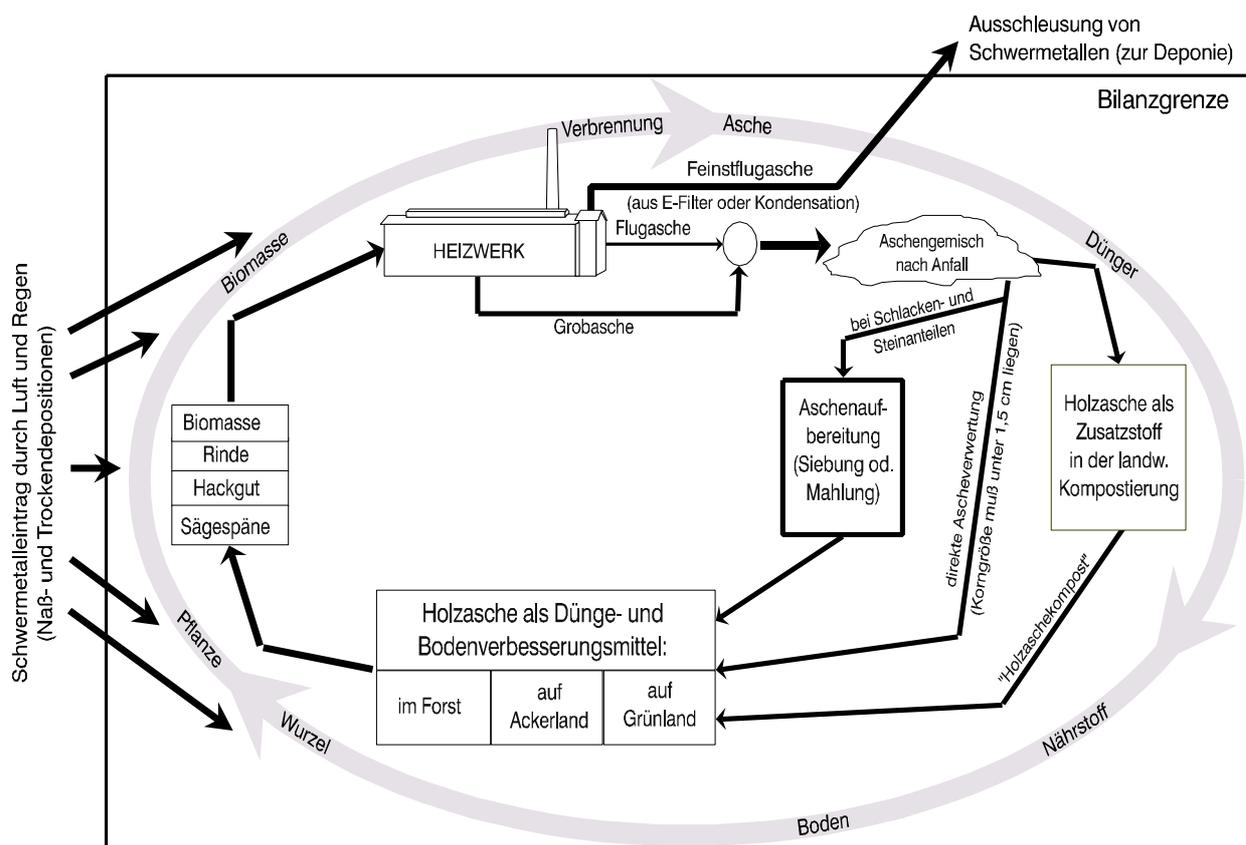
Der ideale Mineralienkreislauf der Natur über die Holzasche wird, wie bereits erläutert, auch bei der reinen Verwendung von Frisch-Biomasse (nach der Ernte chemisch unbehandelter Biomasse) von außen, in Form von Naß- und Trockendepositionen von Schadstoffen auf Bäume und Böden, gestört. Diese These hat sich durch die Ergebnisse der durchgeführten Stoff-Flußberechnungen für aschebildende Elemente in Biomassefeuerungen sowie durch die Resultate von Schwermetallstoffbilanzen um das Ökosystem Wald bestätigt [13, 15]. Die notwendigen Vorgaben für eine umweltverträgliche Kreislaufwirtschaft mit Pflanzenasche aus Biomasse-Feuerungen, die nur chemisch unbehandeltes Material einsetzen (kein Rest- und Altholz), sind folgende:

- A) Um den Mineralienkreislauf der Natur im Zuge der thermischen Biomassenutzung weitgehend stabil zu halten, ist ein möglichst kleiner und schadstoffreicher Teilstrom aus dem Prozeß auszuschleusen (siehe auch Kapitel 1.2, Abbildung 2).

B) Der über die Rückführung der anfallenden Pflanzenasche laufende Nährstoffkreislauf soll durch diesen Trennschnitt möglichst wenig gestört werden.

Wendet man diese Forderungen auf die aus den durchgeführten Stoffbilanzen erhaltenen Resultate an, so ergeben sich folgende Schlußfolgerungen für eine umweltverträgliche Kreislaufwirtschaft mit Pflanzenasche aus Frisch-Biomasse-Feuerungen (siehe auch Abbildung 8):

Abbildung 8: Prinzip einer umweltverträglichen Kreislaufwirtschaft mit Asche aus Frisch-Biomasse-Feuerungen



- I) Eine Mischung aus Grob- und Zyklonflugasche im heizwerksspezifischen Mengenverhältnis sollte auf Forst- bzw. Agrarflächen rückgeführt werden (zur weitgehenden Schließung des Mineralien- bzw. Nährstoffkreislaufes).
- II) Die Feinstflugasche, die die kleinste und schwermetallreichste Aschenfraktion darstellt, ist aus dem Kreislauf auszuschleusen und zu deponieren (als Beitrag zur Kreislaufstabilisierung).
- III) Der Trennschnitt zwischen Multizyklon und Feinststaubabscheider ist der ökologisch effizienteste. Daraus folgt gleichzeitig, daß Biomassefernheizwerke zukünftig verstärkt auf eine Feinstaubabscheidung achten sollten und diese immer dem Multizyklon nachgeschaltet zu erfolgen hat, um eine separate Sammlung der beiden Flugaschenfraktionen zu ermöglichen.
- IV) Für künftige Anlagenentwicklungen sollte die Forderung nach einer optimalen fraktionierten Schwermetallabscheidung, also einer noch stärkeren und effizienteren Einbindung der Schwermetall-Stoff-Flüsse in die Feinstflugasche, eine wesentliche Aufgabe darstellen, um die Schwermetallkonzentrationen im verwertbaren Aschenanteil weiter zu senken. Damit

wird dem Ziel, eine Kreislaufwirtschaft mit Holzasche langfristig zu sichern und somit nachhaltig zu gestalten, Rechnung getragen (siehe auch Kapitel 3.3).

Aschen aus Altholzfeuerungen können aufgrund des Schwermetalleintrages durch die der Verbrennung vorgelagerte Holzbehandlung bzw. Holznutzung nicht ohne vorherige Aufbereitung kreislaufwirtschaftlich verwertet werden. Neben dem, in Abbildung 8 dargestellten, Schadstoffeintrag in die Biomasse durch Umweltverschmutzung kommt es bei Rest- und insbesondere bei Altholz durch Vermischung des Frischholzes mit artfremden Materialien im Zuge der Be- und Verarbeitung sowie im Zuge der stofflichen Nutzung zu noch deutlich höheren Schadstoffeinträgen. Dieser Umstand bedingt, daß Primärmaßnahmen, wie die Schwermetallfraktionierung zwar eine verbesserte Schadstoffselektierung in den einzelnen Aschenfraktionen bewirken, aber nicht ausreichen, um eine effiziente Entfrachtung des größten anfallenden Aschenanteils, der Grobasche, zu erreichen. Dies ist einerseits dadurch begründet, daß ein Teil der leichtflüchtigen Schwermetalle, wie bereits erläutert, in oxidischen und somit schwer flüchtigen Bindungsformen im Brennstoff vorliegt bzw. in anderen metallischen oder mineralischen Matrices eingeschlossen ist (Störstoffanteil). Zusätzlich ist der Anteil an schwerflüchtigen Schwermetallen wie Ni, Cr, Cu und Co durch den Anteil an artfremden Materialien im Brennstoff deutlich erhöht. Aus den angeführten Gründen ist eine sinnvolle Verwertung von Aschen aus Altholzfeuerungen erst nach einer Abtrennung der Schwermetalle durch entsprechende Sekundärmaßnahmen (z.B. Säure-Leaching bzw. thermische Behandlung) möglich.

Aschen aus Restholzfeuerungen liegen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Schadstoffgehalte zwischen denen aus Frisch-Biomasse- und Altholzfeuerungen. Je nach dem Grad der Kontamination des Brennstoffes muß hier von Fall zu Fall entschieden werden, welche Maßnahmen und Verwertungsmöglichkeiten in Frage kommen.

5) Logistische Aspekte hinsichtlich der Aufbereitung und Verwertung von Aschen aus Biomassefeuerungen

5.1) Logistische Aspekte im Bereich Feuerungs- und Anlagentechnik

Prinzipiell muß zwischen zwei Möglichkeiten der Beeinflussung der Aschenzusammensetzung und Aschencharakteristik unterschieden werden (siehe Tabelle 13). Beide haben zum Ziel die notwendigen Randbedingungen zu schaffen, um einen möglichst großen Teil der gesamten anfallenden Asche auf langfristig umweltverträgliche Weise verwerten zu können.

Tabelle 13: Möglichkeiten der Beeinflussung der Zusammensetzung und Charakteristik von Aschen aus Biomassefeuerungen

Während der Verbrennung (Feuerungs- und Abscheidetechnologie) Primärmaßnahmen	Nachträgliche Eingriffe Sekundärmaßnahmen
Gute Ausbrandqualität	Chemische Aschenaufbereitung
Produktion geringer Flugaschenmengen	Biochemische Aschenaufbereitung
Gezielte Flugaschenfraktionierung	Thermische Aschenaufbereitung
Kontrollierte Aschenabscheidetemperatur	Kombinierte Verfahren

Es existieren Möglichkeiten, die Aschenzusammensetzung bereits während der Verbrennung, durch eine entsprechende Feuerungs- und Abscheidetechnologie zu beeinflussen. Diese zielen neben der Grundvorgabe, eine möglichst vollständige Verbrennung zu erreichen, insbesondere auf die Technologie einer fraktionierten Schwermetallabscheidung ab. Das heißt, daß aufgrund des bereits vorhandenen Wissens um die Einflußparameter auf die während der Verbrennung ablaufenden Stoffflüsse der aschebildenden Elemente vom Brennstoff in die einzelnen anfallenden Aschefractionen, versucht wird, die Schwermetalle gezielt in der Feinstflugaschenfraktion anzureichern [5].

Der große Vorteil einer Beeinflussung der Aschenzusammensetzung während der Verbrennung, also direkt im Moment des Entstehens der Asche, liegt darin, daß dadurch, ein gut funktionierendes Verfahren vorausgesetzt, eine nachträgliche Aschenaufbereitung zur Schwermetallabtrennung (chemische oder thermische Verfahren) entfallen kann. Die Asche steht somit dezentral für eine umweltverträgliche Verwertung zur Verfügung, was dem Grundprinzip der regionalen Energiegewinnung aus Biomasse entspricht.

Eine nachträgliche Aschenbehandlung zur Schwermetallabtrennung könnte aufgrund des großen technologischen Aufwandes nur zentral durchgeführt werden und wäre mit hohem Rohstoff- und Energieeinsätzen verbunden. Außerdem ist bei derartigen Verfahren sehr genau darauf zu achten, ob nicht durch die Aschenbehandlung größere Abfallmengen entstehen als ursprünglich vorhanden waren. Nachträgliche Verfahren zur Schwermetallabtrennung widersprechen dem Prinzip einer dezentralen Kreislaufwirtschaft mit Pflanzenasche und sollten grundsätzlich nur dann in Betracht gezogen werden, wenn direkte Verfahren, wie eine fraktionierte Schwermetallabscheidung, nicht zum gewünschten Ziel führen.

Hinsichtlich des nicht rezyklierbaren Aschenanteiles stellt sich die Frage, ob dieser nicht auf sinnvolle Weise industriell verwertet werden kann, indem die in der Feinstflugasche angereicherten Schwermetalle wieder rückgewonnen und als Rohstoffe eingesetzt werden. Die Wirtschaftlichkeit einer derartigen Vorgangsweise ergebe sich dabei nicht durch die Rückgewinnung der Schwermetalle aus der belasteten Asche, sondern aus einem Aufbereitungsbeitrag pro Aschenmenge, der lediglich unter den aktuellen Deponiekosten liegen müßte. Eine fraktionierte Schwermetallabscheidung während der Verbrennung macht diese Überlegungen aufgrund der höheren zu erwartenden Schwermetallkonzentrationen in der Feinstflugasche noch interessanter. Verfahren, die für eine industrielle Schwermetallrückgewinnung aus belasteten Aschen von Interesse sein könnten sind einerseits thermische Verfahren (Nachverbrennung, Glühung der Aschen) andererseits biochemische Prozesse ("Bio-Leaching") oder Kombinationen beider Varianten [5, 45]. Neben Feinstflugaschen aus Frisch-Biomasse-Feuerungen sind solche Sekundärmaßnahmen auch für Aschen aus Altholzfeuerungen von Interesse.

5.2) Logistische Aspekte im Bereich Downstream-Prozeßtechnik - Aschenaufbereitung, Art der Aschenverwertung, Aschenausbringung

Tabelle 14 stellt die wesentlichsten allgemein zu beachtenden Punkte dar, wenn man eine funktionierende Kreislaufwirtschaft mit Pflanzenasche in der Praxis erreichen will. Prinzipiell sollten Aschen aus Biomassefeuerungen, bevor sie verwertet werden, auf ihre Nährstoff- und Schwermetallgehalte untersucht werden. Derartige Untersuchungen sind in periodischen Abständen zu wiederholen. Aufgrund der Analysenergebnisse kann dann beurteilt werden, ob die betrachtete Asche die vorgeschriebenen Grenzwerte einhält oder nicht und welche Aschegaben

ökologisch sinnvoll erscheinen. Um eine wirklich kontrollierte Ascherückführung auf Böden sicherzustellen, sollten diese, wie in den österreichischen Richtlinien für einen sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen vorgesehen, die Böden vor einer Aschenausbringung auf ihre Eignung geprüft werden. Die entsprechenden Grenzwerte, Untersuchungsparameter, Analysemethoden und Frachtenregelungen sollten in einer Verordnung bzw. Richtlinie verankert werden, die für die Betreiber von Biomasseheizwerken bindend ist, wenn sie die anfallende Asche verwerten wollen (siehe entsprechende österreichische Richtlinien als Beispiel [41, 44]). Wesentlich erscheint dabei, daß als Grundvoraussetzung für eine Kreislaufwirtschaft mit Pflanzenasche der Einsatz chemisch unbehandelter Biomasse hervorgehoben wird und, dem Prinzip eines nachhaltigen Prozesses entsprechend, für Holz- und Rindenasche primär eine Aschenausbringung im Wald und für Stroh- und Ganzpflanzenasche bzw. Asche von Energieholzflächen primär eine landwirtschaftliche Verwertung angestrebt werden sollte.

Tabelle 14: Notwendige Randbedingungen, um eine kontrollierte und umweltverträgliche Aschenverwertung sicherzustellen

-
- Der ausschließliche Einsatz chemisch unbehandelter Biomasse im Heizwerk
 - Periodische Analysen des verwertbaren Ascheanteils auf Nährstoff- und Schwermetallgehalte
 - Wiederkehrende Untersuchungen der Böden auf deren Eignung für eine Pflanzenaschenausbringung
 - Festlegung der Untersuchungsparameter, der Schadstoffgrenzwerte und geeigneter Analysemethoden
 - Frachtenregelungen für eine Aschenausbringung
 - Aufzeichnungspflicht des Betreibers
 - Der Hinweis, dem Prinzip einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft nach Möglichkeit Rechnung zu tragen (die Asche soll auf den gleichen Bodentyp rückgeführt werden, von dem der Biomasse-Brennstoff stammt)
-

Hinsichtlich der notwendigen Logistik um eine praxisgerechte Kreislaufwirtschaft mit Pflanzenaschen zu erreichen geht es, betrachtet man den Aschenkreislauf *Boden/Nährstoff - Wurzel/Pflanze - Verbrennung - Asche/Dünger - Boden* etwas näher, vor allem um das Funktionieren der Bindeglieder *Verbrennung - Asche/Dünger* oder auch *Heizwerk - Bauer* (Aschenaufbereitung) und *Asche/Dünger - Boden* bzw. *Bauer - Natur* (Art der Aschenverwendung und Ausbringungstechnik).

Tabelle 15 gibt einen Überblick über die in diesem Zusammenhang relevanten Aspekte. Die zu optimierenden Bereiche betreffen die Aschenausbringung aus dem Heizwerk, die Mischung der verwertbaren Aschenfraktionen im richtigen Verhältnis, die Überführung des verwertbaren Aschengemisches in einen streufähigen Zustand, die Aschenlagerung vor der Übernahme durch die Landwirte, die Frage ob die Asche direkt oder indirekt (z.B. über einen zwischengeschalteten Kompostierungsschritt) rückgeführt werden soll, sowie die richtige Ausbringungstechnik und den besten Ausbringungszeitpunkt auf land- und forstwirtschaftliche Flächen.

Um hinsichtlich der angeführten Aspekte wirtschaftlich und nachhaltig sinnvolle Lösungen zu finden ist es notwendig in Bezug auf die Downstream-Prozeßtechnik zwischen verschiedenen Anlagengrößen und der Art der eingesetzten Brennstoffe zu differenzieren. Hinsichtlich der

Ausbringungstechnik ist es unbedingt notwendig entsprechende Modelle und Methoden in der Praxis zu testen und zu bewerten, bevor allgemeine Empfehlungen abgegeben werden können.

Tabelle 15: Wesentliche logistische Aspekte für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft mit Aschen aus Biomassefeuerungen

Erläuterungen: Datenquelle [33].

DOWNSTREAM PROZESS- TECHNIK	<ul style="list-style-type: none"> • Mischung der verwertbaren Aschefraktionen im richtigen Verhältnis • Bereitstellung der Asche in einem streufähigen Zustand • Möglichst staubfreie Aschenmanipulation • Zwischenlagerungsmöglichkeit der Asche im Heizwerk
ART DER ASCHEN- VERWENDUNG UND AUSBRINGUNGS- TECHNIK	<ul style="list-style-type: none"> • Entscheidung zwischen direkter oder indirekter Aschenverwertung (in Abhängigkeit von der regionalen landwirtschaftlichen Infrastruktur) • Wahl der für Pflanzenasche und die jeweilige Fläche richtigen Ausbringungstechnik (staubarm, zeit- und kostensparend) • Wahl des richtigen Ausbringungszeitpunktes

5.2.1) Aschenausstragung und Aschenaufbereitung im Biomasseheizwerk : Das Bindeglied Heizwerk - Bauer

Um das Bindeglied zwischen Heizwerk und Land- bzw. Forstwirtschaft herzustellen bzw. zu sichern ist es notwendig, daß die bei der Verbrennung anfallende Pflanzenasche den Bauern in geeigneter Form zur Verfügung gestellt wird. Das heißt konkret:

- a) Die im Heizwerk produzierten Aschefraktionen Grob- und Zyklonflugasche sind ihrem mengenmäßigen Anfall entsprechend zu vermischen. Dadurch wird ein sog. "Aschengemisch nach Anfall" hergestellt. Die Feinstflugasche ist getrennt zu sammeln und ordnungsgemäß zu deponieren bzw. industriell zu verwerten (Schwermetallrückgewinnung).
- b) Die Asche muß den Bauern in streufähigem Zustand zur Verfügung gestellt werden, also frei von Schlacken- und Steinanteilen mit Korngrößen über 1,5 - 2,0 cm.
- c) Eventuell in der Asche enthaltene Eisenteile wie Nägel, Draht usw. sind ebenfalls vor einer Weitergabe der Asche an die Bauern abzutrennen.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist es notwendig für Biomasseheizwerke entsprechende Aschenausstrags- und eventuell auch Aufbereitungsanlagen vorzusehen.

Anlagen mit einer Kesselnennleistung kleiner 1,0 MW_{th} und Hackgut oder Sägespänen als Brennstoff benötigen keine mechanischen Aschenausstragungsrichtungen, eine Kübelentaschung ist aufgrund des geringen Aschenaufkommens und der meist feinen Korngröße der Asche ausreichend. Bei Heizwerken mit einer Kesselleistung größer 1,0 MW_{th} ist eine mechanische Aschenausstragung generell empfehlenswert. Beträgt der Rindenanteil am Brennstoff mehr als 30,0 Gew% d. TS, so ist meist eine Aschenaufbereitung (Siebung oder Mahlung) notwendig, da die in der Rinde enthaltenen mineralischen Verunreinigungen (Sand, Erde, Steine) zu Schmelzpunktserniedrigungen führen können und somit zu lokalen Schlackebildungen am Rost beitragen. Auch für Stroh- und Ganzpflanzenfeuerungen sind aufgrund der durch die niedrigen Ascheschmelzpunkte häufig vorkommenden Verschlackungen Aschenaufbereitungsanlagen empfehlenswert. Weiters empfiehlt es sich zur Abtrennung von in der

Asche befindlichen Eisenteilen (Metallstücke, Nägel) einen Permanentmagneten im Asche-förderkanal zu installieren.

5.2.2) Ausbringungstechniken für Pflanzenasche: Das Bindeglied Bauer - Natur

Um ein stabiles Bindeglied Bauer - Natur (Asche / Dünger - Boden) zu gewährleisten, ist es notwendig für Pflanzenasche geeignete Düngerstreuer zu finden und so eine kostengünstige, zeitsparende, gleichmäßige und möglichst staubfreie Aschenausbringung zu ermöglichen.

Für eine Aschenausbringung auf Acker- und Grünland erscheinen die normalerweise für Kalkungen verwendeten Streuer mit Staubschürzen geeignet. Von den Düngerstreuern ohne Staubschutz ist nur der Schneckenstreuer für Pflanzenasche wirklich gut geeignet. Dieser Gerätetyp hat weiters den Vorteil, daß er auch bei feuchter Asche, die gerne zur Klumpenbildung neigt, problemlos und sehr gleichmäßig arbeitet, da durch die Förderschnecken verfestigte Aschenbrocken wieder zerrieben werden.

Für eine Aschenausbringung im Wald erscheinen Verblasegeräte am besten geeignet. Sie sind von Forststraßen aus einsetzbar und erzielen im horizontalen Gelände gleichmäßige Streuweiten von bis zu 50 m.

Eine Schädigung von Baumrinden und Jungbäumen, die aus kurzer Entfernung mit einem für die Waldkalkung konzipierten kleinen Gebläsestreuer (Fassungsvolumen 2,0 m³) direkt mit Pflanzenasche angestrahlt wurden, konnte nicht festgestellt werden. Weiters waren auch keinerlei Nadelverätzungen von Jungpflanzen durch die stark basisch wirkende Pflanzenasche zu beobachten [34]. Nachteilig dürfte sich bei Gebläsestreuern, die zur Kalkdüngung gefertigt wurden, mittelfristig der Materialverschleiß durch die kleinen Schlacken- und Steinanteile beim Einsatz von Pflanzenaschen bemerkbar machen (Strahlwirkung). Um eine entsprechende Gerätelebensdauer zu gewährleisten, sollte der Gebläseteil des Streuers für den Pflanzenascheneinsatz aus gehärtetem Stahl hergestellt werden.

Als Zusatzstoff in der landwirtschaftlichen Kompostierung ist Pflanzenasche ebenfalls geeignet. Eine Kompostierung von Pflanzenasche hat gegenüber einer Direktausbringung der Asche den Vorteil, daß sie staubarm ist und beim Kompostieren auch Schlacken- und Steinanteile in der Asche wenig stören, da sie während des Kompostiervorganges durch das Umsetzen der Miete zerkleinert bzw. aussortiert werden. Voraussetzung ist, daß der jeweilige Landwirt die Verfahrenstechnik der Kompostierung beherrscht und in der Region eine entsprechende maschinelle Infrastruktur (Kompostwendemaschinen und Kompoststreuer) vorhanden ist. Als Richtwert sollen dem Kompostausgangsmaterial nicht mehr als maximal 5,0 Vol% Pflanzenasche beige-mischt werden [35].

6) Derzeitige gesetzliche Rahmenbedingungen und Richtlinien hinsichtlich einer Verwertung von Pflanzenaschen in Österreich

In diesem Kapitel wird konkret auf Österreich bezug genommen, da Österreich derzeit das einzige europäische Land ist, wo eine Verwendung von Pflanzenaschen klar geregelt ist. Diese Regelung erfolgte basierend auf den umfangreichen durchgeführten Forschungsarbeiten zu diesem Thema.

Unter Holzasche versteht man Aschen aus der thermischen Nutzung von holzartiger Biomasse wie Holz, Hackgut, Rinde, Säge- und Frässpänen. Unter dem erweiterten Begriff Pflanzenaschen sind auch Aschen aus der thermischen Nutzung von Stroh, Ganzpflanzen, Heu und anderen landwirtschaftlichen Reststoffen mit berücksichtigt.

Nach ÖNORM S 2100 wird der Grob- oder Rostasche aus Biomassefeuerungen die Schlüsselnummer 31306, der Zyklonflug- und Feinstflugasche (Elektrofilterasche oder Kondensatschlamm) die Schlüsselnummer 31301 zugewiesen. Sowohl Grobasche als auch Zyklonflug- und Feinstflugasche sind laut entsprechendem Bundesgesetz keine gefährlichen Abfälle [36]. Laut den Abfallwirtschaftsgesetzen der einzelnen Bundesländer sind alle 3 Aschenfraktionen als gewerblicher Abfall anzusehen.

Weiters besagen die Abfallwirtschaftsgesetze der Bundesländer, daß es sich bei Abfällen, die einer sinnvollen stofflichen Verwertung zugeführt werden können, um Altstoffe bzw. Sekundärrohstoffe handelt. Dabei muß die Sinnhaftigkeit und Umweltverträglichkeit der Verwendung klar hervorgehen und ein Verwendungsnachweis erbracht werden. Im Zweifelsfall ist ein Feststellungsverfahren bei der Landesregierung zu beantragen. Weiters schreiben die Abfallwirtschaftsgesetze eine getrennte Sammlung der Abfälle vor, wodurch Grobasche und Zyklonflugasche solange nicht vermischt werden dürfen, als sie nicht vom Abfallbegriff befreit werden und als Sekundärrohstoff deklariert sind.

Wesentlich bei der Definition des Begriffes Altstoff bzw. Sekundärrohstoff in den Abfallwirtschaftsgesetzen der einzelnen Länder, daß auch ein Altstoff bzw. Sekundärrohstoff solange Abfall bleibt, bis er einer zulässigen Verwertung zugeführt werden kann und diese Verwertung auch durch entsprechende Richtlinien bzw. Gesetze legitimiert ist. Erst dann ist eine Befreiung des jeweiligen Sekundärrohstoffes vom Abfallbegriff gegeben.

Durch die schwankende Aschenzusammensetzung ist eine Zulassung als Düngemittel entsprechend dem österreichischen Düngemittelgesetz [37] nicht möglich. Aus diesem Grund wurden Pflanzenaschen aus dem Düngemittelgesetz definitiv ausgenommen, mit dem Verweis, daß deren Verwendung auf landwirtschaftlichen Flächen in den jeweiligen Bodenschutzgesetzen der Länder bzw. durch eigene Verordnungen oder Richtlinien zu regeln ist. Aus diesem Grund wurde in Österreich für den sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen im Acker- und Grünland vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft eine entsprechende Richtlinie ausgearbeitet [44]. Diese ist seit 1.1.1998 in Kraft. Sie legt fest, welche Pflanzenaschen auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht werden dürfen (hinsichtlich deren Schadstoffgehalte), wie und wann die Art der Ausbringung zu erfolgen hat (Streuertyp, Witterung), welche maximalen jährlichen Aufwandsmengen zulässig sind und wie der Boden, auf dem die Aufbringung erfolgt, beschaffen sein muß (Festlegung von geeigneten Bodentypen und notwendigen Bodenanalysen).

Eine Ausbringung von Pflanzenaschen im Forst ist laut österreichischem Forstgesetz [39] prinzipiell nur dann möglich, wenn Pflanzenasche kein Abfall ist, da jegliche Abfallausbringung im Forst verboten ist. Laut Mitteilung des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft bestehen aus forstfachlicher wie auch aus rechtspolitischer Sicht gegen die Verwendung von Aschen aus Biomassefeuerungen zur sachgerechten Düngung im Wald aufgrund der bereits vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse keine Einwände, wenn es sich um Verbrennungsrückstände von nach der Ernte chemisch unbehandelter Biomasse handelt und die Aschenrückführung in kontrollierter Weise erfolgt [40]. Für die Ausbringung von Pflanzenasche im Forst wurde daher im Auftrag des Bundesministers durch den Fachbeirat für Bo-

denfruchtbarkeit und Bodenschutz, Fachgruppe Forst, eine Richtlinie zum sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen im Wald erarbeitet, die ab 1.1.1997 bundesweit Geltung hat [41].

Hinsichtlich einer Pflanzenaschenverwendung (von chemisch unbehandelter Biomasse) innerhalb der Europäischen Union ist anzumerken, daß diese per Verordnung als zugelassener Bodenverbesserer im ökologischen Landbau gilt [38]. Somit ist auch in Österreich eine Verwendung von Aschen aus Biomassefeuerungen für Biobauern erlaubt, wenn die Einhaltung der entsprechenden Schadstoffgrenzwerte und eine kontrollierte Ausbringung im Sinne der angesprochenen Richtlinienentwürfe gegeben ist.

Die Verwendung von Feinstflugasche auf Böden ist laut den geltenden österreichischen Richtlinien generell nicht erlaubt. Feinstflugasche gilt daher als gewerblicher Abfall. Bei einer Deponierung ohne Vorbehandlung muß sie laut ÖNORM S 2072 einer Deponie der Eluatklasse III zugeführt werden [20, 26].

7) Empfohlene Vorgangsweise und sinnvolle Aufwandsmengen bezüglich einer Rückführung von Pflanzenaschen auf Böden

Diese nachfolgend angeführten Empfehlungen basieren auf durchgeführten Aschenanalysen, Feldversuchen und darauf aufbauenden Stoffbilanzen Asche-Boden/Grundwasser-Pflanze für die Ökosysteme Ackerland, Grünland und Forst [9, 11, 12] und stellen die Basis für die in Österreich geltenden Richtlinien für einen sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen auf Böden dar [41, 44].

Von den in einem Biomasseheizwerk anfallenden Aschenfraktionen (Grobasche, Zyklonflugasche, Feinstflugasche) ist normalerweise die Verwendung einer Mischung aus Grob- und Zyklonflugasche nach heizwerksspezifischem Mengenanfall (verwertbarer Aschenanteil) als Sekundärrohstoff mit düngender und bodenverbessernder Wirkung möglich.

Bei der Rückführung von Aschen aus Biomasseheizwerken auf Böden sollte zur Vermeidung von ökologischen Schäden beachtet werden, daß

- a) nur Asche aus der Verbrennung chemisch unbehandelter Biomasse verwendet wird,
- b) die Zyklon- und Feinstflugaschenfraktion getrennt gesammelt und die Feinstflugasche deponiert bzw. industriell verwertet wird,
- c) der verwertbare Aschenanteil einer Biomassefeuerung vor der erstmaligen Ausbringung auf Nährstoff- und Schwermetallgehalte analysiert wird und derartige Analysen in regelmäßigen Abständen wiederholt werden (siehe entsprechende Richtlinien),
- d) für den verwertbaren Anteil aus Rinden-, Hackgut- und Späneaschen folgende Aufwandsmengen nicht überschritten werden [41, 44]:
 - 1.000 kg je ha und Jahr für Ackerland
 - 750 kg je ha und Jahr für Grünland
 - 3.000 kg je ha einmalig in 50 Jahren für Waldflächen,
- e) für den verwertbaren Anteil aus Stroh- und Ganzpflanzenaschen die Aufwandsmengen am Nährstoffbedarf der jeweiligen Kultur gemäß den landespezifischen Richtlinien für die sachgerechte Düngung ausgerichtet werden.

Die Mengenlimitierungen für eine Aschenausbringung im Acker- und Grünland basieren auf Frachtenlimitierungen für die mit der Asche ausgebrachten Schwermetalle. Die angegebenen jährlichen maximalen Aufwandsmengen gelten daher bezogen auf eine Pflanzenasche, die für zumindest ein Schwermetall den entsprechenden Grenzwert laut Richtlinie erreicht. Werden die Schwermetallgrenzwerte unterschritten, so kann entsprechend mehr Asche ausgebracht werden [44].

Die strenge Mengenlimitierung für eine Aschenausbringung im Forst ist auf der Basis des am ehesten limitierenden Schwermetalls Cd errechnet. Sie gewährleistet, daß der Schwermetalleintrag in das Ökosystem Wald durch eine Aschenrückführung den Entzug durch die Holzernte für Cd nicht übersteigt und für alle anderen Schwermetalle unerheblich bleibt bzw. diesen Entzug sogar unterschreitet [13, 15, 41].

Die Einhaltung dieser Empfehlungen sollte zusammen mit neuen Technologien zur fraktionierten Schwermetallabscheidung (Reduktion leichtflüchtiger Schwermetalle wie Zn und Cd in den verwertbaren Aschenfraktionen bei deren gleichzeitiger Anreicherung in der Feinstflugasche) eine dezentrale Kreislaufwirtschaft mit der in Biomasseheizwerken anfallenden Aschen langfristig sicherstellen [10, 14].

Hinsichtlich einer nachhaltigen Aschenverwertung sollte darauf geachtet werden, daß Holz- bzw. Rindenasche primär auf Forstflächen bzw. Energieholzflächen rückgeführt wird, da nur in diesem Fall eine Kreislaufwirtschaft im eigentlichen Sinn gegeben ist. Agrarflächen sollten nur dann für eine Düngung mit Holz- bzw. Rindenasche herangezogen werden, wenn eine Aschenausbringung im Wald aufgrund der vorliegenden geografischen Randbedingungen oder aus technisch-wirtschaftlichen Gründen nicht durchgeführt werden kann bzw. wenn die Asche aus der Stroh- oder Ganzpflanzenverbrennung stammt.

Für eine Ausbringung von Holz- und Rindenaschen im Wald ist weiters zu berücksichtigen:

Aufgrund des hohen Anteiles an Ca und Mg in Holz- und Rindenaschen sind ähnliche Wirkungen wie bei Kalkungen zu erwarten. Für die Ausbringung auf Forstflächen gelten daher ähnliche Kriterien. Bezüglich des CaO-/CaCO₃-Verhältnisses und des hohen pH-Wertes kommt Holzasche einem Mischkalk nahe, wobei die gröbere Körnung allerdings die Aggressivität mildert.

Holzasche kann daher überall dort eingesetzt werden, wo eine Aufbasung und Erhöhung des pH-Wertes erwünscht ist oder der Milieuwechsel zumindest keine nachteiligen Folgen erwarten läßt. Entsprechende Hinweise gibt die Broschüre „Düngung im Wald II. Teil“ des Beirates für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz [42].

Für eine Ausbringung von Pflanzenaschen auf Agrarflächen ist weiters zu berücksichtigen:

Generell sollte die Aufwandsmenge an Pflanzenasche auf den Nährstoffbedarf der jeweiligen Kultur, den Boden und die weiteren verwendeten Düngemittel abgestimmt werden [6, 7]. Die durchschnittlich in Pflanzenaschen enthaltenen Nährstoffmengen sind in Kapitel 3.2 angeführt und entsprechend zu berücksichtigen.

Hinsichtlich ihrer K-Verfügbarkeit sind Pflanzenaschen den Handelsdüngern als ebenbürtig anzusehen. Pflanzenaschen sind damit vor allem für den Einsatz zu chloridempfindlichen Kulturen (z.B. Bäume, Sträucher, verschiedene Gemüsearten) geeignet, wenn diese eine pH-Wert-Erhöhung vertragen. Weiters bietet sich Holzasche zur Düngung von Einjahrespflanzen an, die

thermisch genutzt werden sollen, da dadurch Cl-haltige Dünger substituiert werden können und die Cl-Aufnahme der Pflanzen vermindert wird [8, 12].

Als Phosphatdünger sind Holz- und Rindenaschen nur zur „Erhaltungsdüngung“ geeignet, da keine besonders rasche Wirkung erwartet werden darf. Bei Stroh- und Ganzpflanzenaschen ist mit einer besseren P-Verfügbarkeit zu rechnen. Besteht Phosphatmangel, dann sollte aber auf rascher wirksame P-Dünger zurückgegriffen werden [8, 12].

Literatur

1. EUROPEAN COMMISSION, 1996: TERES II - Interim Report; DG XVII (ed.), Brussels, Belgium
2. EUROPEAN COMMISSION, 1996: The European Renewable Energy Study, main report, ISBN 92-826-6450-3, DG XVII (ed.), Brussels, Belgium
3. AEBIOM, 1996: Biomasse-Strategien, Bericht; Österreichischer Biomasseverband Wien (Hrsg.), Österreich
4. EUROPEAN COMMISSION, 1996: An Energy Policy for the European Union, White Paper of the European Commission, ISBN 92-827-5222-4, DG XVII (ed.), Brussels, Belgium
5. OBERNBERGER Ingwald, 1997: Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente, Schriftenreihe "Thermische Biomassenutzung", Band 1, ISBN 3-7041-0241-5, dbv-Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, Österreich
6. BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, 1993: Richtlinien für die sachgerechte Düngung, 3.Auflage 1993, Wien, Österreich
7. BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, 1995: Richtlinien für die sachgerechte Düngung, 4.Auflage, 1995, Wien, Österreich
8. HOLZNER Heinrich, RUCKENBAUER Peter, 1994: Pflanzenbauliche Aspekte einer Holzascheausbringung auf Acker- und Grünland; In: Tagungsband zum internationalen Symposium „Sekundärrohstoff Holzasche“, Sept. 1994, Graz; Institut für Verfahrenstechnik (Hrsg.), Technische Universität Graz, Österreich
9. OBERNBERGER Ingwald, WIDMANN Walter, WURST Friedrich, WÖRGETTER Manfred, 1995 a: Beurteilung der Umweltverträglichkeit des Einsatzes von Einjahresganzpflanzen und Stroh zur Fernwärmeerzeugung, Jahresbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt, Institut für Verfahrenstechnik (Hrsg.), Technische Universität Graz, Österreich
10. OBERNBERGER Ingwald, BIEDERMANN Friedrich, KOHLBACH Walter, 1995 b: FRACTIO - Fraktionierte Schwermetallabscheidung in Biomasseheizwerken, Jahresbericht zum gleichnamigen ITF-Projekt mit Unterstützung der Bund-Bundesländerkooperation, Institut für Verfahrenstechnik (Hrsg.), Technische Universität Graz, Österreich
11. RUCKENBAUER Peter, OBERNBERGER Ingwald, HOLZNER Heinrich, 1993: Erforschung der Verwendungsmöglichkeiten von Aschen aus Hackgut- und Rindenfeuerungen, Endbericht der Projektphase I, Forschungsprojekt StU 48 der Bund-Bundesländerkooperation, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (Hrsg.), Universität für Bodenkultur Wien, Österreich
12. RUCKENBAUER Peter, OBERNBERGER Ingwald, HOLZNER Heinrich, 1996: Erforschung der Verwendungsmöglichkeiten von Aschen aus Hackgut- und Rindenfeuerungen, Endbericht der Projektphase II, Forschungsprojekt StU 48 der Bund-Bundesländerkooperation, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (Hrsg.), Universität für Bodenkultur Wien, Österreich
13. NARODOSLAWSKY Michael, OBERNBERGER Ingwald, 1996: From Waste to Raw Material - The Way of Cadmium and Other Heavy Metals from Biomass to Wood Ash; In: Journal of Hazardous Materials, Vol 50/2-3 (1996), pp. 157-168
14. OBERNBERGER Ingwald, BIEDERMANN Friedrich, 1996: Fractionated Heavy Metal Separation in Biomass Combustion Plants as a Primary Measure for a Sustainable Ash Utilization; In: Proceedings of the International Conference "Developments in Thermochemical Biomass Conversion", May 1996, Banff, Canada; Blackie, Blackie Academic and Professional (ed.), London, United Kingdom

15. OBERNBERGER Ingwald, 1994: Sekundärrohstoff Holzasche - Nachhaltiges Wirtschaften im Zuge der Energiegewinnung aus Biomasse, Dissertation, Institut für Verfahrenstechnik, Technische Universität Graz, Österreich
16. PANHOLZER Franz, 1995: Homogenization, Digestion and Analysis of Biomass Fuels and Ashes; In: Minutes of the IEA Activity Meeting of TASK XIII, Activity 6, Sept 1995, Graz, Austria, New Zealand Forest Research Institute (ed.), Rotorua, New Zealand
17. OBERNBERGER Ingwald, PÖLT Peter, PANHOLZER Franz, 1995: Charakterisierung von Holzasche aus Biomasseheizwerken, Teil II: Auftretende Verunreinigungen, Schütt- und Teilchendichten, Korngrößen und Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Aschefractionen; In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung - Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie, Heft 1 (1995)
18. OBERNBERGER Ingwald, DAHL Jonas, ARICH Anton, 1996: Biomass fuel and ash analysis, report of the European Commission, ISBN 92-828-3257-0, European Commission DG XII (ed), Brussels, Belgium
19. GADERER Mathias, 1996: Ash behaviour in Biomass Combustion Plants, MS-thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden and Institute of Chemical Engineering, University of Technology Graz, Austria
20. OBERNBERGER Ingwald, 1995: Aschenbehandlung und Verwertung bei Frisch- und Restholzfeuerungen; In: Handbuch zum VDI-Seminar "Alt- und Restholz - Thermische Nutzung und Entsorgung, Anlagenplanung, Energienutzung"; Okt. 1995, Salzburg; VDI-Bildungswerk (Hrsg.), Düsseldorf, Deutschland
21. HASLER Philipp, 1994: Rückstände aus der Altholzverbrennung, Charakterisierung und Entsorgungsmöglichkeiten, Teilbericht des DIANE 8 Forschungsprogrammes Energie aus Altholz und Papier, Bundesamt für Energiewirtschaft (Hrsg.), Bern, Schweiz
22. OBERNBERGER Ingwald, PÖLT Peter, PANHOLZER Franz, 1995: Charakterisierung von Holzasche aus Biomasseheizwerken, Teil II: Auftretende Verunreinigungen, Schütt- und Teilchendichten, Korngrößen und Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Aschefractionen; In: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung - Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie, Heft 1 (1995)
23. TOBLER H., NOGER N., 1993: Brennstoff und Holzverbrennungsrückstände von Altholzfeuerungen: 1. Teilbericht zum Projekt HARVE, EMPA St. Gallen, Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.), Bern, Schweiz
24. NOGER Dominik, FELBER Helene, PLETSCHER Ernst, 1995: Holzasche und Rückstände, deren Verwertung oder Entsorgung, provisorische Fassung des Schlußberichtes zum Projekt HARVE, EMPA St. Gallen, Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.), Bern, Schweiz
25. NOGER D., FELBER H., PLETSCHER E., 1994: Zusatzanalysen zum Projekt HARVE, Untersuchungsbericht Nr. 22'032 C, EMPA St. Gallen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.), Bern, Schweiz
26. OBERNBERGER Ingwald, PANHOLZER Franz, ARICH Anton, 1996: System- und pH-Wert-abhängige Schwermetalllöslichkeit im Kondensatwasser von Biomasseheizwerken, Endbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt des Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur und des Amtes der Salzburger Landesregierung; Institut für Verfahrenstechnik (Hrsg.), Technische Universität Graz, Österreich
27. NUSSBAUMER Thomas, 1995, Verbrennung und Vergasung von Energiegras und Feldholz, Jahresbericht 1994 zum gleichnamigen Forschungsprojekt, Bundesamt für Energiewirtschaft (Hrsg.), Bern, Schweiz
28. OBERNBERGER Ingwald, 1996: Durchführung und verbrennungstechnische Begutachtung von Biomasseanalysen (Heuproben) als Basis für die Vorplanung des Dampferzeugungsprozesses auf Biomassebasis in Neuburg/Donau, Ergebnisbericht, Ingenieurbüro BIOS (Hrsg.), Graz, Österreich
29. HASLER Philipp, NUSSBAUMER Thomas, 1994: Dioxin -und Furanmessungen bei Altholzfeuerungen, Teilbericht des DIANE 8 Forschungsprogrammes Energie aus Altholz und Papier, Bundesamt für Energiewirtschaft (Hrsg.), Bern, Schweiz
30. SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, 1992: Lehrbuch der Bodenkunde, 13. Auflage, ENKE Verlag Stuttgart (Hrsg.), Deutschland
31. STEIERMÄRKISCHE LANDESREGIERUNG, 1991: Steiermärkischer Bodenschutzbericht 1991; Steiermärkische Landesregierung (Hrsg.), Graz, Österreich

32. FORSTLICHE BUNDESVERSUCHSANSTALT (FBVA), 1992: Österreichische Waldboden-Zustandsinventur - Ergebnisse, FBVA-Bericht Nr.168 / Band II, ISSN 0374-9037, Österreichischer Agrarverlag (Hrsg.), Wien, Österreich
33. OBERNBERGER Ingwald, 1995: Logistik der Aschenaufbereitung und Aschenverwertung; In: Tagungsband zur internat. Tagung "Logistik bei der Nutzung biogener Festbrennstoffe", Mai 1995, Stuttgart, Deutschland; Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), Bonn, Deutschland
34. OBERNBERGER Ingwald, NARODOSLAWSKY Michael, 1993: Aschenaustrags- und Aufbereitungsanlagen für Biomasseheizwerke, Endbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt des Landesenergievereins des Landes Steiermark; Institut für Verfahrenstechnik (Hrsg.), Technische Universität Graz, Österreich
35. NARODOSLAWSKY Michael, OBERNBERGER Ingwald, 1995: Verwendung von Holzaschen zur Kompostierung, Endbericht zum Forschungsprojekt Nr. 4159 des Jubiläumsfonds der Österreichischen Nationalbank; Institut für Verfahrenstechnik (Hrsg.), Technische Universität Graz, Österreich
36. ÖSTERREICHISCHE BUNDESREGIERUNG, 1991: Verordnung über die Festsetzung gefährlicher Abfälle, BGBl Nr. 49 (1991), Österreichische Staatsdruckerei, Wien, Österreich
37. ÖSTERREICHISCHE BUNDESREGIERUNG, 1994: Düngemittelgesetz (DMG 1994), Österreichische Staatsdruckerei, Wien, Österreich
38. KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN, 1994: Verordnung (EG) Nr. 2381/94 vom 30.9.1994, Brüssel, Belgien
39. ÖSTERREICHISCHE BUNDESREGIERUNG, 1975: Forstgesetz, Österreichische Staatsdruckerei, Wien, Österreich
40. BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, 1994b: Sachgerechte Düngung mit Pflanzenaschen, Schreiben des Bundesministers an die Präsidentenkonferenz der Landwirtschaftskammern Österreichs vom 7.12.1994, Geschäftszahl 52.100/07-VB5/94, Wien, Österreich
41. BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, 1997: Der sachgerechte Einsatz von Pflanzenaschen im Wald, Richtlinie; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (Hrsg.), Wien, Österreich
42. BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, 1994a: Die Düngung im Wald, II. Teil, 1. Auflage (1994), Wien, Österreich
43. CHRISTENSEN Kurt Agerbaek, 1995: The Formation of Submicron Particles from the Combustion of Straw, Ph.D. Thesis, ISBN 87-90142-04-7, Department of Chemical Engineering (ed.), Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark
44. BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, 1998: Der sachgerechte Einsatz von Pflanzenaschen im Acker- und Grünland, Richtlinie; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (Hrsg.), Wien, Österreich (in Druck)
45. DAHL JONAS, OBERNBERGER Ingwald, 1998: Thermodynamic and Experimental Investigations on the Possibilities of Heavy Metal Recovery from Contaminated Biomass Ashes by Thermal Treatment. In: Proceedings of the 10th European Bioenergy Conference, June 1998, Würzburg, Germany, C.A.R.M.E.N. (ed), Rimpfing, Germany

Verwendete Abkürzungen

BaP.....	Benzo[a]pyren
Brst.....	Brennstoff
FFA	Feinstflugasche
FS.....	Frischsubstanz
GA.....	Grobasche
HG.....	Hackgut
H _u	unterer Heizwert
ICP	induktiv gekoppelter Plasmaemissionsspektrometer
MW	Mittelwert
Nm ³	Normkubikmeter (bei 0°C und 1,013 bar)
p	Druck
PAK.....	polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	polychlorierte Biphenyle
PCDD.....	polychlorierte Dibenzo-p-dioxine
PCDF.....	polychlorierte Dibenzofurane
R.....	Rinde
RG	Rauchgas
SP.....	Sägespäne
STABW	Standardabweichung
Stmk. KSCHVO...	Steiermärkische Klärschlammverordnung
TE	Toxizitätsäquivalent
TM	Trockenmasse
TS.....	Trockensubstanz
WK-FA.....	im Wendekammer- und Wärmetauscherbereich anfallende Flugasche
Z-FA.....	Zyklonflugasche

Verwendete chemische Formelzeichen

Al	Aluminium
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
As	Arsen
B	Bor
C _{org.}	organisch gebundener Kohlenstoff
Ca	Calcium
CaCO ₃	Calciumkarbonat
CaO	Calciumoxid
Cd	Cadmium
Cl	Chlor bzw. Chlorid
Co	Kobalt
CO ₂	Kohlendioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
Fe	Eisen
Fe ₂ O ₃	Eisenoxid
H	Wasserstoff
H ₃ BO ₃	Borsäure
HCl	Salzsäure
HF	Flußsäure
Hg	Quecksilber
HNO ₃	Salpetersäure
H ₂ O	Wasser
K	Kalium
K ₂ O	Kaliumoxid
Mg	Magnesium
MgO	Magnesiumoxid
Mn	Mangan
MnO	Manganoxid
Mo	Molybdän
N	Stickstoff
Na	Natrium
Na ₂ O	Natriumoxid
Ni	Nickel
NO _x	Stickoxide
O	Sauerstoff

P	Phosphor
Pb	Blei
P ₂ O ₅	Phosphorpentoxid
S	Schwefel
Si	Silizium
SiO ₂	Siliziumdioxid
V	Vanadium
Zn	Zink