

# 1 Einleitung

Nachdem die Problematik der Holzaschenverwertung im Wald wiederholt an die LWF herangetragen wurde, erschien es notwendig und sinnvoll, diese Frage unter verschiedenen fachlichen Gesichtspunkten in einer internen Arbeitsgemeinschaft der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) zur erörtern und den gegenwärtigen Kenntnisstand zusammenzustellen. Die Arbeitsgemeinschaft wurde geleitet von

**Alois Zollner Bereich: Waldernährung**

Mitglieder der Arbeitsgemeinschaft waren:

**Dr. Karl-Heinz Häberle Bereich: Bodenbiologie**

**Dr. Christian Kölling Bereich: Stoffhaushalt**

**Hans-Jürgen Gulder Bereich: Standort und Bodenschutz**

**Alfred Schubert Bereich: Bodendauerbeobachtungsflächen**

**Hans-Peter Dietrich Bereich: Immissionsschutz, Bioindikation**

**Norbert Remler Bereich: Holzenergie**

Die von der Arbeitsgemeinschaft beigetragenen Informationen waren Grundlage für den vorliegenden Bericht.

An verschiedenen deutschen Instituten werden zur Zeit Untersuchungen zum Problemkreis "Holzasche-Verwertung" durchgeführt, doch liegen hierzu noch keine Resultate vor. Der Bericht bezieht sich deshalb auf Versuchsergebnisse aus Österreich, Schweiz, Skandinavien, USA und Kanada. Darüber hinaus wurden Erfahrungen eingebracht, die bei fachlichen Stellungnahmen in Genehmigungsverfahren von Biomasseheiz(kraft)werken durch die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft gewonnen worden sind.

Die in diesen LWF-Bericht getroffenen Aussagen beziehen sich ausschließlich auf "**reine**" **Holzaschen**, die bei der Verbrennung von **unbehandeltem Holz** (z. B. Waldhackgut, Sägerestholz) anfallen. Der

Begriff "unbehandeltes Holz" ist damit enger gefaßt als der Begriff "naturbelassenes Holz" nach der Bundesimmissionsschutzverordnung (' 2 Nr. 9), der beispielsweise auch Spanplatten umfaßt. Holzaschen aus behandelten Rest- und Althölzern sind ebenfalls nicht weiter berücksichtigt; da ihre Verwertung im Wald wegen der enormen Schadstoffbelastungen von vorneherein ausscheidet.

## 2 Geschichte

Wald war bis zum Eintritt ins Industriezeitalter der wichtigste Energielieferant, und trug in großem Ausmaß auch zur Sicherung der menschlichen Lebensgrundlagen und der Ernährung der Bevölkerung bei. Die Wälder wurden dabei derart beansprucht, daß selbst in den walddreichen Gebieten - wie etwa das Beispiel des Spessarts zeigt - der Waldbestand im 18. und 19. Jahrhundert auf großen, bevorzugt siedlungsnahen Flächen gefährdet war [Kampfmann 1984].

In großem Umfang wurde Laub- oder Nadelstreu aus den Waldbeständen gereicht, teils zur Einstreu in den Ställen, häufig auch zur Gewinnung von Aschen. Durch "Laubäschern" konnte die hungernde und vielfach verarmte Landbevölkerung dann Dünger für die "Begeilung" ihrer mageren Wiesen und damit ein lebensnotwendiges Hilfsmittel bei dem täglichen Kampf ums Überleben gewinnen.

In den Haushalten gehörte der "Aschestücht" (Aschefaß) viele Jahrhunderte ebenso zum Inventar wie der "Krautstücht". Fahrende Händler zogen durchs Land und sammelten die Asche. Durch Auslaugung der Aschen konnte nämlich einer der wichtigsten chemischen Grundstoffe der früheren Jahrhunderte, die Pottasche (Kohlensaures Kali) gewonnen werden, die vielfältigst, z.B. in der Glasherstellung, bei der Seifensiederei, bei Wäschereien, Färbereien oder für pharmazeutische Produkte Verwendung fand. Da aus einer Tonne Nadel- oder Laubholz nur ca. 1 - 2 kg Pottasche gewonnen werden konnte [Meyers Konversationslexikon 1884] war der Asche- und Holzbedarf sehr hoch. Im frühen 18. Jahrhundert war Asche in einzelnen Landesteilen sogar so begehrt, daß deren Ausfuhr über hoheitliche Grenzen hinweg verboten wurde [Hönlein 1943 a u. b]. Noch im letzten Jahrhundert bestand z. B. in Lohr a. Main (Spessart) ausreichende Nachfrage und Bedarf für 5 Pottaschesiedereien. Die ebenfalls für den Spessart bekannten nahen Waldglashütten waren zu dieser Zeit bereits aufgegeben [Hönlein 1943 b].

Die Bedeutung der Pottasche oder Holzkohle ging mit Beginn der Industrialisierung zu Gunsten von weniger aufwendigen, arbeits- und kostengünstigeren Produktionsprozessen stark zurück. Holzkohle wurde von Braun- und Steinkohle oder anderen Energieträgern verdrängt. Erzeugnisse der Kaliindustrie traten an die Stelle von Pottasche oder Aschedünger.

Erst im letzten Jahrhundert lieferten die Erkenntnisse der Naturwissenschaften umfassende Vorstellungen über die Bedeutung der Mineralstoffe für eine ausgewogene Pflanzenernährung. Zuvor basierte die Nutzung der Asche als Dünger wohl nur auf praktischen Erfahrungen. Mittlerweile, nach mehr als einhundertfünfzig Jahren Industriezeitalter, sind die Kenntnisse und das Bewußtsein über Belastungen oder Wirkungen von Spurenelementen und Schwermetallen in der Umwelt weiter fortgeschritten. Eine Wiederverwertung von Verbrennungsrückständen oder Abfällen aus der Biomassenutzung im Sinne der Kreislaufwirtschaft wird deshalb sehr sorgfältig abgewogen.

### 3 Problemstellung

Seit Inkrafttreten des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrW-/AbfG) besitzt die Verwertung von Abfall Vorrang vor der Beseitigung, woraus sich die Notwendigkeit entwickelt, geeignete Verwertungsmöglichkeiten auch für Holzaschen zu nutzen. Bereits bei der Genehmigung von Feuerungsanlagen wird der Verbleib bzw. die Verwertungsmöglichkeit für den entstehenden Abfall geprüft und festgelegt. Bislang ist die Beurteilung der Frage, ob Holzasche durch Ausbringung im Wald verwertet werden kann, und welcher Nutzen bzw. welche Gefahren damit verbunden sein können, für Betreiber, Genehmigungsbehörde und Forstbehörde mit Problemen verbunden. Die Handhabung in den verschiedenen Genehmigungsverfahren ist deshalb sehr unterschiedlich. Gleiches gilt für den Regelungsumfang in den hier bekannten Genehmigungsbescheiden.

Bei zunehmender Rohstoffverknappung wächst das Interesse an nachhaltigen Nutzungsformen. Die Grundsätze der Kreislaufwirtschaft mit der Rückgewinnung und Wiederverwertung von Rohstoffen nehmen an Bedeutung zu. Allerdings ist diese Wirtschaftsform nicht in jedem Fall und um jeden Preis sinnvoll. Eine naturverträgliche und nutzbringende Kreislaufwirtschaft ist nur dann sinnvoll, wenn weder das Allgemeinwohl beeinträchtigt noch Schutzgüter gefährdet werden.

Dies gilt auch für die Wiederverwertung von Holzasche als Düngemittel im Wald. Aus forstfachlicher Sicht ist dabei vorrangig zu klären, unter welchen Bedingungen eine Ausbringung von Nutzen ist, und ob Gefährdungen für den Wald und den Waldboden vermieden werden können.

# 4 Aufkommen und Bedeutung

## 4.1 Brennholzeinsatz

Exakte Angaben über installierte Feuerungsleistungen für feste Energieträger und damit zum Brennholzeinsatz liegen für Deutschland und Bayern nur zum Teil vor.

Feuerungsanlagen lassen sich nach den immissionsschutzrechtlichen Bestimmungen (Bundes-Immissionsschutzverordnung - 1.BImSchV- bzw. TA-Luft) in 3 Leistungsklassen einteilen:

- **Kleinst-**,

- **Klein-**,

- **Großanlagen.**

Nach dieser Einteilung decken die **Kleinstanlagen** den Leistungsbereich unter 15 kW ab und unterliegen nicht den Regelungen der o. a. Verordnung. Bei **Kleinanlagen** handelt es sich um Anlagen, die zwischen 15 kW und 1 MW liegen. Unter **Großanlagen** werden nach der TA-Luft Feuerungsanlagen mit Leistungen zwischen 1 und 50 MW verstanden.

Nach Kaltschmitt [1996] dürften in Deutschland insgesamt 1,2 bis 1,3 Mio. überwiegend handbeschickte Kleinstanlagen in Betrieb sein, in denen Holz verbrannt wird. Die installierte Feuerungsleistung dieser Anlagen wird auf insgesamt 8 bis 9 GW veranschlagt. Daraus resultiert ein Brennstoffverbrauch, der zwischen 24 und 26 PJ/a liegt. Hierbei wird unterstellt, daß nahezu ausschließlich Brennholz mit einem Wassergehalt von 20% (unterer Heizwert 4 kWh/kg) zum Einsatz kommt. Dies entspricht einem Rohholzäquivalent von 3,3 bis 3,6 Mio. m<sup>3</sup>.

Im Bereich der Kleinanlagen geht Kaltschmitt [1996] von rund 200.000 Anlagen (Industrie, Gewerbe, Private Haushalte) mit einer installierten Leistung von 8,1 GW und einem Brennstoffverbrauch von etwa 50 PJ/a aus. Eine Aufteilung nach Brennholz und Hackschnitzeln aus der Forstwirtschaft bzw. Industrieresthölzern (Hackschnitzel, Sägespäne, Sägemehl) ist hier nicht mehr möglich. Unter der oben genannten Voraussetzung ergibt sich ein

Rohholzäquivalent von etwa 6,9 Mio. m<sup>3</sup>.

Für Großanlagen liegen nur für Baden-Württemberg und Bayern verlässliche Angaben vor. Nach einer Extrapolation von Kaltschmitt [1996] gibt es in Deutschland derzeit etwa 900 - 1.100 Großanlagen mit einer Feuerungsleistung von 11 - 14 GW.

Der Brennstoffeinsatz wird mit 29 - 35 PJ/a (4 - 4,8 Mio. m<sup>3</sup> Rohholzäquivalent) veranschlagt. Diese Anlagen werden überwiegend mit Industrierestholz, aber auch mit Altholz unterschiedlicher Herkunft bzw. Beschaffenheit und in wechselnden Anteilen betrieben.

Daraus kann der Energieholzverbrauch für Deutschland abgeleitet werden, der zwischen 14,2 und 15,3 Mio. m<sup>3</sup> liegt. Eine Zuordnung dieser Mengen zu den Bereichen "Waldenergieholz", bzw. Industrierestholz oder gar Altholz (z.B. Abbruchhölzer, behandelte Hölzer, etc.) ist aus diesen Angaben nicht durchführbar.

Parallel zu diesen Angaben beziffern Frühwald et al. [1995] das Aufkommen an Energieholz auf 13,5 Mio. m<sup>3</sup>, wobei die Energieholzmengen aus der Forstwirtschaft mit 4,5 Mio. m<sup>3</sup> angegeben werden. Weitere 7 Mio. m<sup>3</sup> Industrieresthölzer und 2 Mio. m<sup>3</sup> Althölzer werden in Deutschland thermisch genutzt. Der Anteil von Altpapier und der Holzanteil im Sperrmüll findet hierbei keine Berücksichtigung.

Eine Untersuchung des Deutschen Instituts Für Wirtschaftsforschung [1996] zeigt den Brennholzeinsatz der deutschen Haushalte auf. Nach diesen Angaben beträgt der Brennholzeinsatz ca. 15,3 Mio. Raummeter (10,7 Mio. m<sup>3</sup>). Rund 70% (7,5 Mio. m<sup>3</sup>) dieser Mengen stammen aus dem Wald, 20% werden über Sägewerke und 10% über den Brennstoffhandel bezogen. Aus diesen unterschiedlichen Angaben kann abgeleitet werden, daß der exakte Brennholzverbrauch nur schwer zu ermitteln ist und in der Vergangenheit oftmals deutlich unterschätzt wurde.

In Bayern befinden sich derzeit 127 Holzheiz(kraft)werke (im Leistungsbereich der Klein- und Großanlagen) vorwiegend im Bereich der Holzindustrie in Betrieb [Lamp 1996]. Die installierte Nennleistung wird mit 565 MW<sub>th</sub> und 15 MW<sub>el</sub> angegeben. Der Biomasse-Einsatz in diesen Heiz- und Heizkraftwerken liegt bei rund 600.000 Tonnen im Jahr [C.a.r.m.e.n. 1997]. Im Rahmen des "Gesamtkonzeptes Nachwachsende Rohstoffe" der

Bayerischen Staatsregierung wurden bisher 31 Holz-(Biomasse-)heizwerke in Bayern gefördert und in Betrieb genommen. Der Verbrauch an Hackschnitzeln aus der Forstwirtschaft, bzw. der Einsatz von Sägeresthölzern liegt in diesen Werken derzeit bei ca. 60.000 t/a. Weitere 25 - 35 Heizwerke befinden sich in der Planungs- bzw. Realisierungsphase, so daß in der nahen Zukunft mit einem deutlich höheren Mengenbedarf an Hackschnitzeln gerechnet werden kann (Abb. 1).

*Abb. 1: Holzheiz(kraft)werke in Bayern*

## 4.2 Mengen und Art der anfallenden Holzaschen

### 4.2.1 Aschenmengen

Bei der Verbrennung von Holz bleibt ein bestimmter Teil an vorwiegend anorganischen Bestandteilen des Holzes als Aschen zurück (Abb. 2). Die anfallende Menge hängt dabei stark von Art und Zusammensetzung des eingesetzten Brennmaterials ab. Tabelle 1 zeigt den brennstoffspezifischen Ascheanfall in Heizwerken nach Obernberger [1994]. Aus diesen Zahlen ist zu erkennen, daß die Rückstandsmenge mit steigendem Rindenanteil deutlich zunimmt.

Unterschiede bestehen auch zwischen den verschiedenen Baumarten. So liefert ein Festmeter Buchenholz (rd. 3,8 kg) etwa dreimal soviel Asche wie ein Festmeter Fichtenholz (rd. 1,1 kg).

**Tab. 1:** Brennstoffspezifischer Ascheanfall in Biomasseheizwerken nach Obernberger [1994]

<b>Brennstoff</b>	<b>Ascheanfall [Gew% der Brennstoff-TS]</b>
Sägespäne	0,5 - 1,1
Hackgut ohne Rinde (z.B. Industriehackgut)	0,8 - 1,4
Hackgut mit Rinde (z.B. Waldhackgut)	1,0 - 2,5
Rinde	5,0 - 8,0

Die Abschätzung der in Deutschland anfallenden Aschemengen ist aus verschiedenen Gründen sehr schwierig. Zum einen kann aus den Literaturangaben nicht auf die tatsächlichen eingesetzten Energieholzmengen geschlossen werden. Zum anderen kann der Ascheanfall in einem weiten Bereich schwanken. Außerdem ist hier eine eindeutige Zuordnung zur Herkunft (Forstwirtschaft, Sägeindustrie, Recyclingunternehmen) nicht möglich.

Unterstellt man einen durchschnittlichen Ascheanfall von 2% des eingesetzten Brennstoffes, so ergeben sich bei einer geschätzten Brennholzmenge von 13 Mio. m<sup>3</sup> (= ca. 7 Mio. Tonnen) in Deutschland ca. 135.000 Tonnen Holzaschen im Jahr.

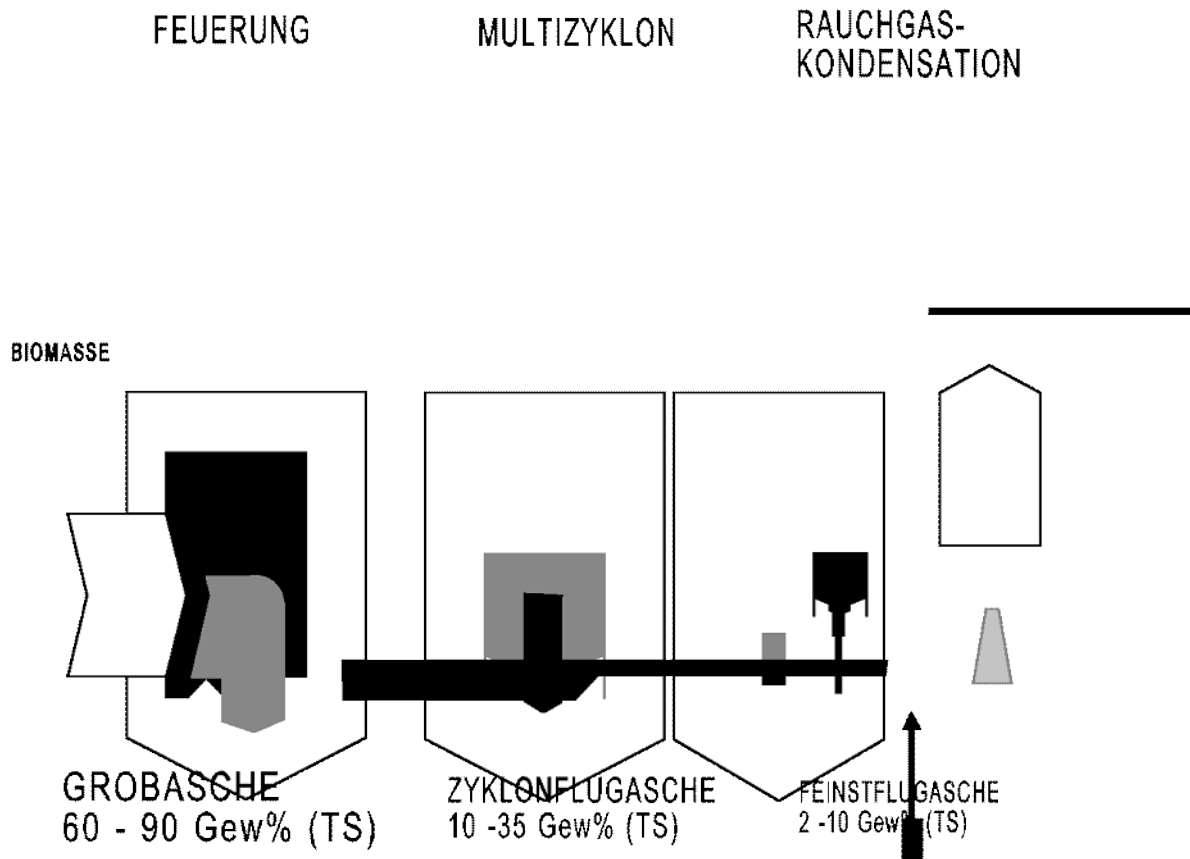
[Abb. 2: Schematische Darstellung für den Betrieb eines Biomasseheizwerkes mit Aschenaufbereitung](#) [aus Obernberger 1994]

Die in den bayerischen Heizkraft- und Heizwerken anfallenden Aschemengen liegen bei ca. 12.000 Tonnen pro Jahr [Remler 1997].

Beschränkt man die Berechnung auf die geförderten Biomasseheizwerke in Bayern, so kann der durchschnittliche Ascheanfall mit ca. 1.200 Tonnen beziffert werden. In diesen Biomasse-Heizwerken werden nur unbehandelte Hölzer eingesetzt, so daß die nachfolgenden Aussagen streng genommen auch nur für diese gelten können.

## 4.2.2 Aschenfraktionen

Bei der Verbrennung von Holz in Biomasseheizwerken mit moderner Feuerungs- und Filtertechnik unterscheidet Obernberger [1994] je nach Ort des Anfalls zwischen drei verschiedenen Aschefraktionen (Abb. 3):



*Abb. 3: Schematische Darstellung der in einer Biomassefeuerung anfallenden Aschenfraktionen  
[aus Obernberger 1995]*

Die **Grob- oder Rostasche** fällt im Verbrennungsbereich der Feuerung an. Sie besteht überwiegend aus dem mineralischen Rückstand von Holz. Daneben enthält sie die direkten Verunreinigungen wie Sand, Erde und Steine.

In den Kesseln nachgeschalteten Fliehkraftabscheidern (Zyklonen) bleibt die **Zyklonflugasche** zurück. Diese Aschefraktion besteht im wesentlichen aus festen, überwiegend anorganischen Bestandteilen.

Falls darüber hinaus Elektro- oder Gewebefilter installiert sind, fällt zusätzlich die dritte Fraktion

**Feinstflugasche** an. Der bei einer Rauchgaskondensation zurückbleibende Kondensatschlamm weist etwa die gleiche Zusammensetzung auf wie die vorher beschriebene Feinstflugasche. Im folgenden wird deshalb nicht mehr weiter unterschieden.

Die Anteile der einzelnen Fraktionen an der Gesamtasche schwanken je nach Feuerungsanlage in einem nicht unerheblichen Rahmen und zeigen, wie unscharf der Begriff Holzasche ist. In Tabelle 2 sind die wichtigsten Ergebnisse beispielhaft zusammengestellt.

Bei der Verbrennung von Rinden- und Hackgut bleibt vor allem Grobasche zurück. Lediglich beim Einsatz von Sägespänen als Brennstoff fallen Zyklonflugaschen in größeren Mengen an.

**Tab. 2:** *Anteile einzelner Aschenfraktionen an der Gesamtasche in Gew.-% [nach Obernberger 1994]*

<b>Aschefraktion</b>	<b>Rindenfeuerung</b>	<b>Hackgutfeuerung</b>	<b>Sägespänefeuerung</b>
<b>Grobasche</b>	75 - 85	70 - 90	20 - 30
<b>Zyklonflugasche</b>	15 - 25	10 - 30	55 - 65
<b>Feinstflugasche</b>	1 - 4	3 - 6	10 - 15

# 5 Rechtliche Situation

## 5.1 Rechtliche Einordnung

Im Vordergrund steht zunächst die Frage: Was ist Holzasche im rechtlichen Sinn? Ist Holzasche Abfall, Wertstoff, Wirtschaftsgut oder Sekundärrohstoff?

### 5.1.1 Begriffsdefinition

Seit in Kraft treten des **Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes** (KrW-/AbfG v. 27. Sept. 1994, zuletzt geändert am 1. Nov. 1996) ist die teilweise verwirrende Begriffsvielfalt im Abfallrecht (Abfall, Wertstoff, Reststoff, Wirtschaftsgut usw.) einer konsequenteren Nomenklatur gewichen. Unabhängig von der Zusammensetzung, der Herkunft oder der weiteren Verwertung der Holzasche gilt:

*Die bei der Verbrennung anfallenden Holzaschen sind Abfall.*

Hierzu besagt der ' 3 Abs. 1 KrW-/AbfG, daß Abfälle alle "beweglichen Sachen" sind, "die unter die in Anhang I des Gesetzes aufgeführten Gruppen fallen **und** deren sich der Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muß". Im Falle der Holzasche ist der Wille zur Entledigung bereits vom Gesetzgeber definiert, zumal dieser immer dann angenommen wird, wenn bewegliche Sachen z. B. bei der Energieumwandlung anfallen, "ohne daß der Zweck der jeweiligen Handlung hierauf gerichtet ist" (' 3 Abs. 3 Satz 1 KrW-/AbfG).

Über den Umgang mit dem Abfall und dessen Verbleib trifft das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz verschiedene Regelungen wobei es unterscheidet nach:

- Abfällen zur Verwertung
- Abfällen zur Beseitigung

### 5.1.2 Vorrang der Verwertung, Verwertungspflicht

Erzeuger oder Besitzer von Abfällen sind verpflichtet, diese nach Maßgabe des ' 6 KrW-/AbfG stofflich oder energetisch zu verwerten, soweit dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist (' 5 Abs.2 und 4 KrW-/AbfG). Verwertung hat somit immer Vorrang vor Beseitigung. Diese gesetzliche Verpflichtung ist dabei sehr weitgehend: Technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist die Verwertung selbst dann, wenn ein Absatzmarkt erst geschaffen werden muß oder eine Vorbehandlung nötig wäre. Auch kann sie teurer als die Beseitigung sein, sofern die Kosten nicht unverhältnismäßig höher sind.

*Ob Abfall verwertet werden kann, hängt zunächst also entscheidend von einer verfügbaren Verwertungsmöglichkeit (-verfahren) ab.*

Der Vorrang der Verwertung entfällt aber (' 5 Abs. 5 KrW-/AbfG), wenn die Beseitigung die umweltverträglichere Lösung darstellt, z. B. im Hinblick auf eine mögliche Anreicherung von Schadstoffen in Erzeugnissen oder in den durch die Verwertung gewonnenen Sekundärrohstoffen [Müller & Schmitt-Glaeser 1996].

Diese allgemeingültige Verpflichtung zur Verwertung nicht vermeidbarer Abfälle wird an anderer Stelle explizit auch allen Betreibern genehmigungsbedürftiger Anlagen auferlegt (' 5 BImSchG in Verbindung mit ' 9 KrW-/AbfG).

### **5.1.3 Allgemeine Abgrenzung zwischen Verwertung und Beseitigung**

Generelle Regeln für die Abgrenzung zwischen Verwertung und Beseitigung finden sich in den " 4 und 5 KrW-/AbfG (Generalklausel). Die Abgrenzung ist im Einzelfall jedoch nicht immer leicht, weil eine Beurteilung neben der Abfalleigenschaft (Qualität) stark vom jeweiligen Verwertungsverfahren selbst und den dort zu beachtenden Schutzvorschriften abhängt.

Im wesentlichen kennt das KrW-/AbfG drei Beurteilungsmaßstäbe, die sich wie folgt umschreiben lassen:

- Nutzbarkeit
- Unschädlichkeit
- Rechtmäßigkeit

### 5.1.3.1 Nutzbarkeit

Um Verwertung und Beseitigung abgrenzen zu können, ist auf den Hauptzweck der Maßnahme abzustellen. Eine stoffliche Verwertung liegt dann vor, "wenn nach einer wirtschaftlichen Betrachtungsweise, unter Berücksichtigung der im einzelnen Abfall bestehenden Verunreinigungen, der Hauptzweck der Maßnahme in der Nutzung des Abfalles und nicht in der Beseitigung des Schadstoffpotentials liegt". Wird die Rückführung des Abfalles primär zur Beseitigung des Schadstoffpotentials vorgenommen, liegt keine stoffliche Nutzung vor (' 4 Abs. 4 KrW-/AbfG).

*Hauptzweck einer Verwertung muß also die Nutzung der Holzaschen sein.*

Nutzung setzt natürlich Nutzen voraus, der auch bei wirtschaftlicher Betrachtungsweise im Falle der Ausbringung von Holzaschen auf Waldböden zwei Aspekte beinhaltet:

- Qualität des Abfalles und seiner stofflichen oder energetischen Eigenschaft (Nährstoffgehalt)
- Nutzen für den Boden (Nährstoffbedarf)

### 5.1.3.2 Unschädlichkeit

Ausgehend vom einzelnen Abfall, ohne Vermischung mit anderen Stoffen, bestimmen Art und Ausmaß seiner Verunreinigungen, ob der Hauptzweck Verwertung oder Beseitigung ist (' 4 Abs.4 KrW-/AbfG). Die Verwertung hat schadlos zu erfolgen (' 5 Abs.3 KrW-/AbfG). Das ist dann der Fall, wenn abhängig von Beschaffenheit, Ausmaß der Verunreinigung und Art der Verwertung des Abfalles keine Beeinträchtigungen des Allgemeinwohls zu erwarten sind, insbesondere keine Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf erfolgt.

*Beschaffenheit und Verunreinigungen des Abfallproduktes Holzasche dürfen also nicht so stark sein, daß eine schadlose Verwertung unmöglich ist und folglich eine Beseitigung erforderlich wird.*

Diese Forderung beinhaltet somit sowohl Aspekte der Holzaschenqualität (Schadstoffgehalte) als auch die von der Verwertung ausgehenden Wirkung (Belastungen, Schädigungen) auf gegebenenfalls betroffene Schutzgüter (Wald, Boden, Wasser, u.a.).

### **5.1.3.3 Vorschriftsmäßigkeit der Verwertung**

Die Verwertung muß nicht nur nützlich und unschädlich sondern auch ordnungsgemäß erfolgen. Wobei all das ordnungsgemäß ist, was dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz und anderen öffentlich rechtlichen Vorgaben entspricht (' 5 Abs. 3 KrW-/AbfG).

*Die ordnungsgemäße Verwertung der Holzaschen muß gesetzeskonform sein und Regeln erfüllen, die in einschlägigen Rechtsnormen festgelegt sind.*

Dies können bei einer Ausbringung der Holzaschen objektbezogene Schutzvorschriften für Wald, Boden oder Wasser ebenso sein, wie methodische Regeln und Standards für eine fachgerechte Ausbringung oder Verwertung (gute fachliche Praxis) z. B. im Forst- oder Düngemittelrecht. Die Forderung enthält somit neben den bereits zuvor genannten qualitativen Aspekten auch methodische und verfahrenstechnische Gesichtspunkte.

#### **5.1.4 Konkrete rechtliche Vorgaben für Holzaschen**

Für bestimmte Abfälle können konkrete Anforderungen zum Vollzug der ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung mittels Verordnungen geregelt werden (§ 7 und 8 KrW-/AbfG). Dies gilt explizit auch für die Anforderungen an eine Verwertung von Abfällen als Sekundärrohstoffdünger oder Wirtschaftsdünger (§ 1 Düngemittelgesetz) auf land- und forstwirtschaftlichen oder gärtnerisch genutzten Böden (§ 8 Abs. 2 KrW-/AbfG). Derartige untergesetzliche Regelungen liegen z. B. für die Klärschlammasbringung im Rahmen der Klärschlamm-Verordnung (AbfKlärVO) vor, die allerdings eine Ausbringung von Klärschlamm im Wald konkret untersagt.

*Eine rechtliche Bestimmung für Holzaschen nach § 8 Abs. 2 KrW-/AbfG, also eine "Holzaschen-Verordnung", existiert bislang nicht.*

Die Ausbringung der Holzaschen auf Waldböden als mögliches Verwertungsverfahren muß demzufolge im Einzelfall nach den oben genannten grundsätzlichen Gesichtspunkten des Abfallrechtes und den jeweils einschlägigen öffentlich-rechtlichen Vorschriften fachlich beurteilt werden.

## **5.2 Spezielle Rechtsnormen für die Beurteilung der Ausbringung im Wald**

Als einschlägige rechtliche Normen, die bei einer möglichen Verwertung von Holzasche durch Ausbringung auf Waldböden schutzgut- und qualitätsbezogene Vorgaben enthalten, sind Forst-, Düngemittel- und Bodenschutzrecht zu nennen.

### **5.2.1 Forstrecht (Spezialgesetze für Wald)**

Das Bundeswaldgesetz (BWaldG v. 2. Mai 1975; geändert am 27. Juli 1984) bestimmt in ' 1 Abs. 1, daß Wald wegen seiner Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten und eine ordnungsgemäße Bewirtschaftung nachhaltig sicherzustellen ist. Das Bayerische Waldgesetz (BayWaldG v. 25. Aug. 1982) fordert darüber hinaus in Art. 1 einen standortgemäßen Zustand des Waldes zu bewahren und wiederherzustellen, insbesondere die Waldfunktionen zu sichern. Jede Handlung, durch welche die Produktionskraft des Waldbodens vernichtet, wesentlich geschwächt oder beseitigt wird, ist verboten (Art. 9 BayWaldG).

In Einklang mit Art. 14 Abs. 1 BayWaldG (sachgemäße Bewirtschaftung des Waldes und seine Bewahrung vor Schäden) legt die Düngerichtlinie aus dem Jahr 1987 für den bayerischen Staatswald (DüngeRL-87) Grundsätze für eine ordnungsgemäße Düngung im Wald fest. Die dort formulierten Grundsätze setzen analog zur Düngeverordnung (DüngeVO) Maßstäbe für eine gute forstliche Praxis der Düngung im Wald, ohne jedoch spezifische, schadstoffbezogene Prüfkriterien für Zusatzbelastungen der Waldböden zugrunde zu legen.

## **5.2.2 Bodenschutzrecht (noch nicht rechtskräftig)**

Das für den Schutz des Bodens zentrale Spezialgesetz, das Bundes-Bodenschutz-Gesetz (Regierungsentwurf zum BBodSchG v. 29. Nov. 1996) liegt erst als Regierungsentwurf vor. Es definiert in seinem ' 1, daß es nachhaltiges Ziel ist, die Funktion des Bodens zu sichern, hierzu schädliche Bodenveränderungen abzuwehren und Vorsorge vor nachteiligen Einwirkungen auf den Boden zu treffen.

Schädliche Bodenveränderungen sind Beeinträchtigungen der Bodenfunktion, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen (' 2 Abs 3 BBodSchG).

Welche Kriterien im einzelnen bei der Abwehr von Schäden und unter dem Aspekt der Vorsorge auch beim Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden angelegt werden müssen, regeln dann untergesetzliche Vorschriften zu ' 6, 7 und 8 BBodSchG. So werden etwa im Entwurf zur Durchführungsverordnung des BBodSchG (Bodenschutz- und Altlastenverordnung -BBodSchVO-, Fassung v. 8. Nov. 1996) konkrete Prüf- und Vorsorgewerte für die Schadstoffgehalte des eingetragenen Stoffes, des Bodens und der zulässigen Frachten auf der Grundlage des derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstandes definiert.

Ob das BBodSchG auch für Sekundärrohstoffdünger gemäß ' 1 Düngemittelgesetz oder möglicher künftiger abfallrechtlicher Vorschriften gemäß ' 7/8 KrW-/AbfG einschlägig sein wird (' 3 Abs. 2 Satz 1 BBodSchG-Entwurf -) ist noch nicht abschließend geklärt.

### 5.2.3 Düngemittelrecht (materiellrechtlich richtungsweisend)

Das Düngemittelgesetz (DüngeG v. 15. Nov. 1977; zul. geänd. 1994) gilt auch für Sekundärrohstoffdünger. Ob hierzu Holzasche zu rechnen ist, muß stets fachgutachtlich beurteilt werden. Es ist jedoch gemeinsam mit der Düngemittelverordnung (DüngemittelVO v. 9. Juli 1991, zul. geänd. am 25. Jan. 1993) und der Düngeverordnung (DüngeVO v. 26. Jan. 1996) die zentrale Regelung für die verfahrenstechnische Normierung **einer guten fachlichen Praxis** bei der Ausbringung von Düngern, Wirtschaftsdüngern und Sekundärrohstoffen. Dort getroffene Vorgaben besitzen nur Gültigkeit für landwirtschaftliche und gärtnerische Flächen, **nicht jedoch für Wald**. Die Anwendung von Düngemitteln ist hierbei nach Art, Menge und Zeit an dem Bedarf der Pflanzen und des Bodens orientiert. Im Boden verfügbare Nährstoffe und die organische Substanz sind ebenso wie die herrschenden standörtlichen Bedingungen zu berücksichtigen. Hinweise und Randbedingungen für die Nutzbarkeit eines Düngers lassen sich ableiten.

## 5.3 Prüfkriterien für eine Beurteilung der Qualität von Holzasche und ihrer Unschädlichkeit für den (Wald-)Boden

Die Düngewirksamkeit der Holzasche bemißt sich nach ihrem Nährstoffgehalt. Die Gefährlichkeit des Abfalles bestimmt sich aus der Konzentration und der Dosis seiner Verunreinigungen ebenso wie aus deren Wirkung auf bestimmte Schutzobjekte (hier: Wald bzw. Waldboden).

Eine genehmigungsrechtlich erforderliche Bewertung setzt gesetzlich verankerte Umweltqualitätsstandards voraus.

*Bislang existieren noch keine rechtskräftigen Grenzwerte z. B. für anthropogene Belastungen des Waldbodens.*

Möglichkeiten zur fachgutachtlichen und genehmigungsbedeutsamen Beurteilung der Qualität und der Gefährlichkeit von Holzasche finden sich jedoch bereits heute in verschiedenen, für Wald nicht, noch nicht oder nur bedingt einschlägigen gesetzlichen Regelungen in Form von Grenz- oder Prüfwerten. Auch existieren stoffbezogene Schwellen- und Orientierungswerte auf forstfachlicher und fachwissenschaftlicher Grundlage, die eine Beurteilung bzw. Bewertung einer möglichen Ausbringung zulassen.

Folgende Qualitäts- und Umweltstandards stehen zur Verfügung:

### **Qualitätsstandard zur Beurteilung des Nährstoffgehaltes:**

- Qualitätskriterien für Düngemittel (DüngemittelVO v. 26. Jan. 1996). Sie enthalten Gehaltsangaben für Nährstoffgehalte in Düngemitteln.

### **Fachtechnisch festgelegte Grenzwerte über das Ausmaß des Schadstoffgehaltes:**

- Prüfwerte nach der Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TA-Siedlungsabfall) "Anhang D"- oder der Deponieklasseinteilung TA-Abfall enthalten Grenzwerte für eine Deponierung von Abfall.

### **Umweltstandards zur Beurteilung der Wirkung auf das Schutzgut Wald:**

- Grenzwerte der Klärschlamm-Verordnung (AbfKlärVO v. 15. April 1992;

zul. geändert am 6. Mai 1997). Sie enthalten Kennwerte für zulässige Verunreinigungen im Abfall und für Unschädlichkeitsschwellen bei der Ausbringung auf landwirtschaftliche Böden (nicht Wald!).

- Vorsorgewerte des Bodenschutzgesetzes (Regierungsentwurf einer BBodSchVO v. 8. Nov. 1996). Sie enthalten Kennwerte für Verunreinigungen im Abfall und Vorsorgewerte für Unschädlichkeitsschwellen bei der Ausbringung auf Böden einschließlich zulässiger Höchstfrachten (auch für Wald).

- Prüfwerte von Altlastenflächen (Bayer. Altlastenleitfaden, Juli 1991). Sie enthalten Prüfwerte für sanierungsbedürftige Bodenverunreinigungen (auch Wald).

- Wasserwirtschaftliche Grenzwerte für Recyclingbaustoffe (z.B. in NRW). Sie enthalten Kennwerte für problematische, weil wassergefährdende Bodenverunreinigungen.

- Fachwissenschaftliche Orientierungswerte (Normalgehalte, Schwellenwerte, critical loads, critical levels). Sie liefern Kennwerte für zulässige Schadstoffeinträge und Bodenbelastungen im Wald.

## 6 Zusammensetzung von Holzaschen

Die meisten Probleme, die sich bei der Verwertung von Holzaschen im Wald ergeben können, hängen unmittelbar mit ihrer Beschaffenheit zusammen. Aus forstlicher Sicht ist dabei entscheidend, ob mit der Ausbringung der Aschen im Wald ein Nutzen (Verbesserung der Baumvitalität, Bodenfruchtbarkeit, etc.) verbunden und die Anwendung unschädlich für das Ökosystem (Wasser, Boden, Pflanze, Tier und Mensch) ist.

### 6.1 Nährstoffgehalte

Holzasche entspricht aufgrund ihrer Zusammensetzung einem vom Calcium dominierten Mehrnährstoffdünger, der eine wertvolle Ergänzung der Baumernährung darstellen könnte. Holzasche besteht zum überwiegenden Teil aus Metalloxiden und Silikaten. Der im Holz gebundene Stickstoff entweicht bei der Verbrennung dagegen nahezu vollständig im Rauchgas. Der niedrige Stickstoffgehalt in den Holzaschen ist angesichts hoher Stickstoff-Depositionen aus der Atmosphäre ein wichtiger Aspekt bei einer möglichen Verwertung von Holzaschen im Wald.

Es liegt deshalb nahe, die in der Holzasche enthaltenen Nährstoffe im Sinne der Kreislaufwirtschaft wieder dem Wald zuzuführen. Nach Untersuchungen von Obernberger [1994] enthält eine Mischung aus Grob- und Zyklonflugasche die in Tabelle 3 angegebenen Nährstoffe.

*Tab. 3: Durchschnittliche Nährstoffgehalte (Mittelwerte) in Aschengemischen aus Grob- und Zyklonflugaschen nach Anfall in Gewichtsprozent der Trockensubstanz (Gew.-% TS)[Obernberger 1994, leicht verändert]*

Nährstoff	Rindenasche	Hackgutasche	Späneasche
CaO	40,0	46,2	41,5
MgO	5,1	4,5	6,4
K <sub>2</sub> O	4,8	6,6	8,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,8	3,7	2,7
Na <sub>2</sub> O	0,5	0,4	0,4

Tabelle 4 zeigt, wie sich die Nährstoffe auf die einzelnen Aschefractionen verteilen. Demnach sind in der Grob- und Zyklonasche zusammen durchschnittlich rund 85 - 95 Gewichtsprozent der Trockensubstanz (Gew.-% TS) der Nährstoffe enthalten. Beide Aschefractionen unterscheiden sich

demnach auch nur wenig in ihrer Nährstoffzusammensetzung.

Der Nährstoffgehalt der Holzaschen ist beträchtlich [Felber, Noger, Hasler 1996; Obernberger 1994]. Ihre Zusammensetzung ist erheblich von dem Nährelement Calcium bestimmt.

**Tab. 4:** Mittlere prozentuale Elementverteilung der Nährstoffe auf die einzelnen anfallenden Aschen- fraktionen [nach Obernberger und Narodoslowsky 1994]

Aschefraktion	Ca	Mg	K	P	Na
Grobasche	51,5	57,8	41,9	48,9	49,5
Zyklonasche	40,5	35,3	41,7	41,1	41,0
Feinstflugasche	8,0	6,9	16,3	10,0	9,5

Nach den Ergebnissen der Bayerischen Waldbodeninventur [Gulder & Kölbl 1993] sind die Waldböden und auch die Waldbäume meist ausreichend bis gut mit Nährstoffen ausgestattet. Versorgungsschwächen treten vereinzelt bei Magnesium, Kalium und Phosphor auf. Calcium-schwächen wurden bisher noch nicht beobachtet. Calcium hat jedoch eine große Bedeutung für die Basensättigung bzw. Säurepufferung der Böden. Rund 10% der Waldböden sind von deutlichen Versauerungserscheinungen im gesamten Wurzelraum betroffen.

Ein Vergleich der Nährstoffgehalte der einzelnen Aschefraktionen mit verschiedenen forstüblichen Düngemitteln bzw. Bodenhilfsstoffen (Tab. 5), zeigt den Wert der Holzasche als mögliche Nährstoffquelle. In Tabelle 5 finden sich letztlich die Nährstoffmengen wieder, die im Laufe eines Bestandeslebens dem Waldboden durch Holzbildung entzogen worden sind.

**Tab. 5:** Vergleich der Aschefraktionen mit durchschnittlichen Nährelementgehalten verschiedener handelsüblicher Dünger in Gewichtsprozent der Trockensubstanz (Gew.-% TS)

	Ca-Anteil	Mg-Anteil	K-Anteil	P-Anteil	pH
Dolomit	30 - 45	8 - 22	0	0	8 - 9
Hyperphos	40 - 45	1	0	27 - 35	7 - 8
Gesteinsmehl	10 - 15	8 - 12	0,5 - 3	0,1 - 1	8 - 10
Kalimagnesia	0	6	25	0	5 - 6

<b>Zyklonasche</b>	20 - 46	2 - 3	3 - 4	1 - 3	10 - 13
<b>Grobasche</b>	15 - 46	1 - 2	3 - 4	1 - 2	10 - 13

Aus diesem Blickwinkel ist der Gedanke, die bei der Holzernte dem Wald entzogenen Nährstoffe wieder zurückzuführen, naheliegend. Allerdings sind die reaktiven oxidischen und hydroxidischen Bindungsformen nicht unproblematisch für die im Wald sehr langsam ablaufenden Umsetzungsprozesse (vgl. Kap.7).

## 6.2 Schwermetallgehalte und -frachten

Aufgrund der großen Oberfläche wirken Baumkronen wie Filter auf die oberflächennahen Luftmassen. Jahr für Jahr kämmen die Wälder erhebliche (Schad)Stoffmengen aus und speichern sie in ihren Böden. Deren Speichervermögen ist allerdings nicht unbegrenzt. Mit steigenden Schadstoffeinträgen nimmt deshalb auch die Gefahr einer übermäßigen Belastung der Waldböden zu.

Knapp die Hälfte aller Trinkwassergewinnungsgebiete liegt im Wald. Die Forstwirtschaft hat deshalb eine besondere Verantwortung für die nachhaltige Sicherung der Gesundheit, Stabilität und Leistungsfähigkeit der Wälder. Es ist eine ihrer zentralen Aufgaben, die Waldböden gesund und fruchtbar zu erhalten, wozu sie auch durch das Waldgesetz verpflichtet ist. Aus Gründen des Boden- und Trinkwasserschutzes ist die Belastung von Holzaschen mit Schwermetallen kritisch zu sehen.

Untersuchungen aus Österreich, der Schweiz und Deutschland zeigen, daß in den einzelnen Holzaschefraktionen eine ganze Reihe von Schwermetallen stark angereichert sein kann. Das erschwert unter Umständen eine Wiederverwertung erheblich. Die durchschnittliche Belastung der einzelnen Aschenfraktionen mit Schwermetallen kann Tabelle 6 entnommen werden (vgl. auch Obernberger & Narodoslowsky [1994]; Pohlandt [1995]; Felber et al. [1996]).

**Tab. 6:** Durchschnittlicher Schwermetallgehalt in den verschiedenen Aschenfraktionen (mg/kg TS) nach Obernberger [1997]

Fraktion	Cu	Co	As	Ni	Cr	Pb	Cd	V	Hg	Zn
Grobasche	164,6	21,0	4,1	66,0	325,5	13,6	1,2	43,0	0,01	432,5
Zyklonasche	143,1	19,0	6,7	59,6	158,4	57,6	21,6	40,5	0,04	1870,4
Feinstflugasche	389,2	17,5	37,4	63,4	231,3	1053,3	80,7	23,6	1,47	12980,7

Die Gehalte von Zink, Kupfer, Blei und Cadmium steigen von der Grob- bis hin zur Feinstflugasche deutlich an, was auf die temperaturabhängigen chemischen und physikalischen Eigenschaften der genannten Schwermetalle zurückzuführen ist. Anders liegen die Verhältnisse bei den stabileren Metallen (Kobalt, Nickel, Vanadium, Chrom) und deren Verbindungen, die sich vor allem in der Grobasche anreichern.

Nach Felber et al. [1996] haben Herkunft und Holzart nur wenig Einfluß auf den Schwermetallgehalt der Aschen.

Aus Tabelle 7 läßt sich die Verteilung der Schwermetalle nach ihren Gewichtsanteilen auf die einzelnen Aschenfraktionen entnehmen. Danach sind allein in der Feinstflugasche rund 50% der gesamten leichtflüchtigen Schwermetalle und deren Verbindungen konzentriert. Nimmt man die Anteile, die in der Zyklonflugasche enthalten sind dazu, dann kommt man sogar auf 80 bis 98 Prozent. Auf die beiden Flugaschenfraktionen entfallen dagegen nur rund 45 bis 50 Prozent der schwerflüchtigen Schwermetalle.

**Tab. 7:** Mittlere Elementverteilung der leicht- und schwerflüchtigen Schwermetalle (linke bzw. rechte Hälfte der Tabelle) auf die einzelnen Aschefraktionen (in Gew.-%TS) nach Obernberger und Narodoslowsky [1994]

Fraktion	leichtflüchtig				schwerflüchtig			
	Zn	Pb	Cd	Hg	Co	Ni	Cr	V
Grobasche	11,1	9,8	3,4	2,6	51,9	52,2	53,8	53,1
Zyklonasche	43,8	35,4	54,0	12,9	40,3	41,1	34,8	41,5
Feinstflugasche	45,1	54,8	42,7	84,5	7,8	6,8	11,4	5,4

In der Grobasche liegen, abgesehen von Chrom und Zink, vergleichsweise niedrige Schwermetallkonzentrationen vor. In der Feinstflugasche, die generell die höchste Schwermetallkontamination aufweist, ist vor allem das mobile Cadmium stark angereichert. Die Zyklonflugasche steht dazwischen, allerdings weist auch sie stark erhöhte Cadmiumgehalte auf.

Will man die Schwermetallkontaminationen bei der Wiederverwertung von Holzaschen begrenzen, so ist es unumgänglich, die einzelnen Fraktionen streng zu trennen. Nachdem Grobasche die vergleichsweise niedrigste Belastung aufweist, ist sie deshalb grundsätzlich für eine Verwertung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes geeignet.

Um den Gehalte an Schwermetallen ökologisch bewerten zu können, ist es notwendig, sie mit den bisher gültigen und künftig zu erwartenden Richt- bzw. Grenzwerten einschlägiger Bestimmungen (Klärschlammverordnung, Düngemittelverordnung und Entwurf zum Bundes-Bodenschutz-Gesetz) zu vergleichen. Tabelle 8a stellt die Schadstoffgehalte der einzelnen Aschenfraktionen diesen Richtwerten gegenüber. Neben den genannten Grenzwerten sind in der letzten Spalte von Tabelle 8a zur Orientierung zusätzlich die Vorsorgewerte für Böden nach dem Entwurf zum künftigen Bundesbodenschutzgesetz angegeben. Werden diese Richtwerte für Böden überschritten, dann ist aus Vorsorgegründen eine zusätzlichen Belastung mit Schadstoffen zu vermeiden.

Für die Feinstflugaschen ergeben sich kritische Belastungsschwellen - im Vergleich mit den Grenzwerten der Klärschlamm- und Düngemittelverordnung - vor allem für Cadmium, Kupfer, Nickel, Blei und Zink. Bei den Zyklonflugaschen sind Überschreitungen für Cadmium und Blei festzustellen. Von allen Aschenfraktionen schneidet nur die Grobasche vergleichsweise günstig ab. Allerdings werden auch hier kritische Schwellen für Chrom und Nickel erreicht. Dies gilt vor allem für die hohen Konzentrationen von wasserlöslichem Chromat [Pohlandt 1995]. Holzaschen aus behandelten Rest- und Althölzern sind hier nicht weiter berücksichtigt; ihre Schadstoffbelastungen sind so enorm, daß eine Verwertung im Wald von vorneherein ausscheidet.

Felber et al. [1996] stellen bei ihren Untersuchungen zusammenfassend fest, daß die Schwermetallgehalte der Grob- und Zyklonaschen aus der Verbrennung unbehandelter Hölzer ökologisch unbedenklich sind. Sie merken weiter an, daß bereits kleine Mengen an mitverbranntem behandeltem Holz oder sonstigen brennbaren Abfällen zu einer Erhöhung der Schwermetallgehalte führen, so daß eine Verwertung nicht mehr in Frage kommt.

Nach Obernberger und Narodoslowsky [1994] sind es vorrangig Cadmium aber auch Zink, die hinsichtlich deren umweltverträglicher Rückführung auf forst- bzw. landwirtschaftlichen Böden Probleme bereiten können.

Nach den Ergebnissen der Bayerischen Waldbodeninventur zeigt fast ein Drittel der Waldböden in

den organischen Auflagen erhöhte Belastungen mit Blei. Aber auch bei anderen Schwermetallen (Cadmium, Zink, Kupfer, Nickel) werden teilweise nennenswerte Gehalte gemessen [Gulder & Kölbel 1993].

**Tab. 8a:** Vergleich der Schwermetallgehalte (mg/kg TS) der verschiedenen Aschefraktionen mit den Richtwerten verschiedener Rechtsverordnungen [Pohlandt 1995, Obernberger 1994]

Schwermetall	Feinst- aschen	Zyklon- aschen	Grob- aschen	AbfKVO*	DüngeMVO**	BodSchVO***
						Ton- Lehm- Sand
<b>Cd</b>	5 - 17	5 - 80	0,2 - 2	10	4	1,5 - 1 - 0,4
<b>Cr</b>	17 - 810	70 - 230	40 - 325	900	k.A.	100 - 60 - 30
<b>Cu</b>	55 - 1450	90 - 300	90 - 160	800	200	60 - 40 - 10
<b>Ni</b>	27 - 235	50 - 66	40 - 66	200	30	70 - 50 - 15
<b>Pb</b>	134 - 7300	60 - 1053	14 - 17	900	200	100 - 70 - 40
<b>Zn</b>	109 - 6200	740 - 1400	100 - 200	2500	750	200 - 150 - 60

Anmerkung:

\* Klärschlammverordnung (1997) Angaben für Werte in den ausgebrachten Schlämmen

\*\* Düngemittelverordnung (1993): Angegebene Werte gültig für organ./mineral. Mischdünger

\*\*\* Bundes-Bodenschutz-Gesetz bzw. Verordnung zum BBodenschG (Entwurf) Vorsorgewerte für Böden

In der Vergangenheit wurden in Waldökosystemen zum Teil erhebliche Mengen an Schwermetallen deponiert. Zusätzliche Stoffeinträge in das Waldökosystem über eine mögliche Ausbringung der Holzaschen müssen deshalb sorgfältig gegenüber den Vorteilen der Nährelementrückführung abgewogen werden.

In Tab. 8b sind nach Andreae [1993] die atmosphärischen Schwermetalleinträge aus drei Fallstudien zusammengestellt. Wenngleich die Belastungen regional sehr unterschiedlich und teilweise in den letzten Jahren rückläufig sind, so sollten dennoch zusätzliche Befruchtungen der Wälder und ihrer Böden vermieden werden. Der Entwurf zur Bundesbodenschutzverordnung sieht deshalb vor, daß bestimmte jährliche Frachten an Schwermetallen nicht überschritten werden (Tab. 8b). Stellt man diese Vorsorgewerte der Fracht gegenüber, die mit einer jährlichen Rostascheausbringung von 1 t ha<sup>-1</sup> auf den Boden gelangt, so würden die gesetzlichen Vorgaben für einzelne Elemente (z.B. Cr) ausgeschöpft. Berücksichtigt man, daß die Holzaschen nicht jährlich, sondern lediglich ein- bis zweimal innerhalb einer Umtriebszeit ausgebracht werden, so ist eine Gabe von 1 bis 6 t ha<sup>-1</sup> vom Gesichtspunkt der Schwermetallbelastung her vertretbar.

**Tab. 8b:** Einträge von Schwermetallen in Wälder durch Rostascheausbringung und durch Luftverunreinigungen [Andreae 1993] im Vergleich zu den Vorsorgewerten des Entwurfs zur Bodenschutzverordnung (Regierungsentwurf der BBodSchVO v. 8. Nov. 1996)


Schwer- metall	Einträge aus Luftverunreinigungen			Vorsorgewert	Ascheausbringung
	[g ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]				[g ha <sup>-1</sup> ]
	Fallstudie Wingst	Fallstudie Harz	Fallstudie Solling	Zusätzliche Fracht (BBodSchV)	Fracht bei Ascheausbringung von 1 t ha <sup>-1</sup>
<b>Cd</b>	4,2	5,3	4,9	6	1,2
<b>Cr</b>	3,7	14	6,9	300	325,5
<b>Cu</b>	58	71	47	360	164,6
<b>Ni</b>	11	23	19	100	66
<b>Pb</b>	197	262	242	400	13,6
<b>Zn</b>	430	384	531	1200	432,5

Trüby [1994] hat für Blei, Zink und Cadmium Bilanzierungen für Waldbestände durchgeführt. Demnach werden einem 120jährigen Fichtenbestand (durchschnittlicher Belastung) bei der regulären Holznutzung rund 12,5 kg Zink, 115 g Cadmium und 2,7 kg Blei pro Hektar mit der Biomasse (Stamm mit Rinde) entzogen. Die Menge an Schwermetallen, die dem Wald durch die Holzernte entzogen wird, liegt demnach um ein vielfaches über der, die ihm mit 1 bis 6 Tonnen Grobaschen aus unbehandeltem Holz wieder zugeführt wird. Mit der Abscheidung der Flug- und Zyklonaschen wird der größte Teil der Schwermetalle in den Verbrennungsrückständen ausgeschleust. Die Chance sollte genutzt werden, langfristig sogar zu einer Schwermetallabreicherung zu kommen, indem durch Holznutzung mehr Schwermetalle entzogen werden als an Einträgen in die Wälder gelangen.

### 6.3 Organische Schadstoffe

Holzaschen weisen neben den anorganischen auch organische Bestandteile auf. Für eine Verwertung sind vor allem die Gehalte an Dioxinen (polychlorierten Dibenzo-p-dioxiden = PCDD) und Furanen (Dibenzofuranen = PCDF) von Bedeutung. Nach Untersuchungen von Pohlandt [1996] fallen in den Brennkammeraschen (= Grob- bzw. Rostaschen) keine oder nur sehr geringe Mengen an PCDD und PCDF an. Die Konzentrationen in den Zyklon- und Feinstflugaschen sind dagegen deutlich höher (Tabelle 9). Um eine spätere Wiederverwertung der Holzaschen zu ermöglichen, müssen deshalb die verschiedenen Aschenfraktionen unbedingt getrennt gesammelt werden.

**Tab. 9:** Konzentrationen von organischen Schadstoffen, organischem Kohlenstoff (Corg.) und Chlorid (Cl) in verschiedenen Aschenfraktionen nach Obernberger [1997]

Brennstoff	Aschenfraktion	Corg.	Cl	PCDD/F*	PAK**	B(a)P***
		[Gew% TS]	[Gew% TS]	[ngTE/kgTS]	[mg/kgTS]	[µg/kgTS]
Rinde	Grobasche	0,2 - 0,9	<0,06	0,3 - 11,7	1,4 - 1,8	1,4 - 39,7
	Zyklon-	0,4 - 1,1	0,1 - 0,4	2,2 - 12,0	2,0 - 5,9	4,7 - 8,4
	Feinst-	0,6 - 4,6	0,6 - 6,0	7,7 - 12,7	137 - 195	900 - 4900
Hackgut	Grobasche	0,2 - 1,9	<0,01	2,4 - 33,5	1,3 - 1,7	0,0 - 5,4
	Zyklon-	0,3 - 3,1	0,1 - 0,5	16,3 - 23,3	27,6 - 61,0	188 - 880
	Feinst-	---	---	---	---	---
Späne	Grobasche	0,2 - 3,4	<0,1	1,3 - 2,1	14,7 - 21,1	21,0 - 40,5
	Zyklon-	3,2 - 15,3	0,1 - 0,6	1,5 - 3,7	11,2 - 150,9	180 - 670
	Feinst-	---	---	---	---	---
<b>Klärschlamm</b> (AbfKVO)		-	-	100	20	4000

\* PCDD/F = polychlorierte Dibenzo-p-dioxine bzw. Dibenzofurane, Angabe in Toxizitätsäquivalenten

\*\* PAK = polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, mit vorgeschlagenem Grenzwert von 20 mg/kgTS

\*\*\*B(a)P = Benzo(a)pyren, mit vorgeschlagenem Grenzwert von 4000 µg/kgTS

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Obernberger und Narodoslowsky [1994]. Sie stellen bei ihren Untersuchungen fest, daß die in den Biomassefernheizwerken abgeschiedenen Mengen organischer Schadstoffe sehr gering und nach derzeitigem Wissensstand ökologisch unbedenklich sind. Das setzt voraus, daß ausschließlich unbehandeltes Holz und eine moderne Verbrennungstechnik eingesetzt wird. Bei Kleinfeuerungsanlagen können die organischen Schadstoffe in

deutlich höheren Konzentrationen auftreten.

Um den Anteil unverbrannter Stoffe in den Holzaschen zu minimieren ist bei der thermischen Nutzung von Holz daher auf einen möglichst guten Ausbrand der Holzaschen zu achten. Nach Ruckenbauer et al. [1996] sollte der organische Kohlenstoffanteil der Biomasseaschen 5,0 Gew.-% TS nicht überschreiten. Die Bildung von organischen Schadstoffen kann demnach im wesentlichen durch eine entsprechende Feuerungs- und Regelungstechnik vermieden werden, die eine möglichst vollständige Verbrennung gewährleistet.

## 7 Eigenschaften der Holzaschen

Neben den Inhaltsstoffen spielen auch die chemischen Eigenschaften der Holzaschen eine wesentliche Rolle bei der Beurteilung ihrer Umweltverträglichkeit bzw. Verwertbarkeit im Wald. Hierbei ist vor allem das chemische Reaktionsverhalten der Holzaschen von entscheidender Bedeutung.

### 7.1 Chemische Reaktion, elektrische Leitfähigkeit und Lösungsverhalten

Die pH-Werte von Holz- und Rindenaschen liegen im allgemeinen zwischen 10 und 13 (Tab. 10). Diese stark basische Wirkung ("Branntkalkeigenschaften") beruht auf dem hohen Anteil an Oxiden und Hydroxiden der Elemente Calcium, Kalium, Magnesium und Natrium. Der Sulfat-, Chlorid- und Karbonatanteil ist hingegen gering.

Aufgrund des hohen pH-Wertes ist eine Ausbringung von Holzaschen im Wald nicht unproblematisch. Waldböden weisen von Natur aus eine schwach saure bis saure Bodenreaktion auf. Die in der Humusaufgabe aktiven Lebensgemeinschaften und der Wald ganz allgemein sind an diese ökologischen Bedingungen optimal angepaßt und reagieren entsprechend empfindlich gegenüber raschen und starken Veränderungen des chemischen Milieus. Daneben zeigen Untersuchungen, daß eine Anhebung der Bodenreaktion die Umsetzungsprozesse der organischen Substanz im und auf dem Boden so stark fördern kann, daß Nährstoffverluste auftreten und Beeinträchtigungen der Qualität der Sickerwässer eintreten können [Rothe 1994 u. 1997, Kreutzer 1994]. Aus diesem Grund bevorzugt die Forstwirtschaft langsam und vor allem langfristig wirkende Düngemittel [Zollner 1996].

Nach Untersuchungen von Obernberger [1997] wandeln sich die reaktiven Bestandteile der Holzaschen (Oxide und Hydroxide) im Gelände rasch in Karbonate um, indem sie mit dem Kohlendioxid aus der Bodenluft reagieren. Dadurch wird der pH-Wert rasch gesenkt und die negativen "Branntkalkeigenschaften" klingen ab. Gleichzeitig verringert sich durch die Karbonatisierung der Gehalt an freien Elektrolyten, wodurch die Bodenreaktion angehoben wird ("Säureneutralisierung"). Damit sinkt in kurzer Zeit die elektrische Leitfähigkeit der Aschen (6-30 mS/cm) und gleicht sich typischen Bodenverhältnissen (0,75 mS/cm) an.

**Tab.10:** Bodenreaktion (pH in CaCl<sub>2</sub>) und elektrische Leitfähigkeit (mS/cm) von verschiedenen Pflanzenaschen nach Obernberger [1997]

Biomasse	Grobasche		Zyklonasche		Feinstflugasche	
	pH	el. Leitf.	pH	el. Leitf.	pH	el. Leitf.

<b>Rinde</b>	12,7	8,9	12,7	10,8	12,7	35,6
<b>Hackgut /Späne</b>	12,8	10,2	12,7	13,1	12,6	39,5
<b>Stroh</b>	11,4	9,3	10,8	25,8	9,4	49,5
<b>Ganzpflanze</b>	10,8	11,4	10,5	21	5,9	46,7

Nach der TA-Siedlungsabfall ist nicht allein die Konzentration eines Schadstoffes in dem zu deponierenden Gut entscheidend, sondern auch dessen Wasserlöslichkeit. Um das Gefahrenpotential von anorganischen Bodenverunreinigungen für das Grundwasser beurteilen zu können, verwendet man deshalb nach DIN vorgeschriebene Lösungs- oder Auslaugungsverfahren (Elutionsverfahren). Vor allem die Methode nach DIN 38 414 wird häufig angewandt. Kein anderes Elutionsverfahren ist allerdings in bezug auf seine Aussagekraft aus naturwissenschaftlicher Sicht so übereinstimmend kritisiert worden, wie diese Methode [Förster & Thöming 1997]. Deshalb soll hier nicht weiter auf diese eingegangen werden.

Grundsätzlich zeigt sich eine stark unterschiedliche Löslichkeit bei den verschiedenen Inhaltsstoffen der Holzaschen. Kalium, Chlor und Schwefel sind leicht wasserlöslich, Calcium, Magnesium und Phosphor dagegen nur wenig. Bezüglich der Schwermetalleuierbarkeit ergeben sich ebenfalls deutliche Unterschiede. Bei den Grobaschen sind vor allem die Chrom-(VI-)Werte im Eluat stark erhöht [Pohlandt 1995]. Nach Obernberger [1997] können diese Konzentrationen bei großflächiger Ausbringung in kleinen Mengen aber noch als ökologisch unbedenklich eingestuft werden.

Umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen zur Frage, wie diese ungünstigen Eigenschaften der Holzaschen vermindert werden können und welche Auswirkungen eine Holzaschedüngung im Wald hat, sind noch nicht abgeschlossen.

## 7.2 Wirkungen auf Boden und Pflanze

Erfahrungen mit dem Einsatz von Holzaschen als Düngemittel liegen vor allem aus Skandinavien und den USA vor. Meist stehen dabei die Auswirkungen auf die Bodenorganismen, auf das Wurzelwachstum und den Zuwachs der Waldbäume im Vordergrund. Keine Angaben werden dabei zu etwaigen Grundwasserbelastungen gemacht. Auch zu möglichen Beeinträchtigungen der Vegetation gibt es nur wenige Hinweise. Ruckenbauer et al. [1996] konnten selbst in kürzester Entfernung vom Verblasegerät keinerlei Blatt- oder Rindenschäden durch die stark alkalischen Holzaschen feststellen.

Trotzdem scheinen diese beiden Punkte "Stoffaustrag im Sickerwasser" und "Gefahrenpotential der Ausbringungstechnik" noch am stärksten untersuchungsbedürftig, wenn an einen großflächigen Einsatz als Düngemittel gedacht wird. Beispielsweise gingen nach einem natürlichen Waldbrand in Kanada Setzlinge, die in frische Holzaschen gepflanzt worden waren, aufgrund des hohen pH-Wertes ein [Thomas & Wein 1990]. Ein Ergebnis, das auch hierzulande aus der früheren Forstpraxis (Verbrennungsflächen für Schlagabraum) bekannt ist.

Der Literaturüberblick zeigt, daß die Wirkung von Holzaschen als forstliches Düngemittel im Vergleich mit herkömmlichen Düngern bereits in zahlreichen Feldversuchen untersucht wurde. Danach unterschieden sich mit Holzaschen gedüngte Parzellen in der Regel nicht von gekalkten Flächen [Frostegard et al. 1993; Baath & Arnebrant 1994]. Bei diesen Versuchen wurden 2 bis 5 Tonnen Holzasche pro Hektar ausgebracht. Nach fünf Jahren war der pH-Wert immer noch um mehr als eine pH-Stufe erhöht. Als Folge davon nahm die mikrobielle Biomasse im Boden zu und das Artenspektrum

der Pilzflora veränderte sich [baath & arnebrant 1993]. Bei einer Gabe von mehr als 5 Tonnen ging die mikrobielle Biomasse allerdings wieder zurück. Clarholm und Rosenbrinck [1995] stellten bei ihren Untersuchungen fest, daß der pH-Anstieg nach Holzascheausbringung zu einer verringerten Phosphorverfügbarkeit führte. Ein Gewächshausversuch von Unger und Fernandez [1990] ergab, daß die erhöhten pH-Werte und Basensättigungen im Boden kein verbessertes Wachstum der Bäume bewirkten.

In schwedischen Arbeiten werden Cadmium-Gehalte in ausgebrachten Holzaschen bis zu 4 mg pro kg noch nicht als problematisch angesehen, da auch die Aschen aus natürlichen Waldbränden erhebliche Cadmium-Mengen enthalten (4 bis 20 mg pro kg). In Laborversuchen von Fritze et al. [1995] war die Bodenatmung als Weiser für ein aktives Bodenleben erst ab 400 mg pro kg um 50 Prozent abgesenkt.

## 8 Ausbringung im Wald

Auf den ersten Blick mag die Ausbringung der anfallenden Holzaschen bei einer Waldfläche von rund 2,5 Millionen Hektar in Bayern kein ernsthaftes Problem darstellen (vgl. Kap. 4.2.1). Kalkuliert man die Nährstoffverluste, die im Zuge einer ordnungsgemäßen Bewirtschaftung dem Wald im Laufe einer Umtriebszeit entzogen werden, dann ergibt sich je nach forstlicher Nutzungsintensität ein Aschenäquivalent von 1 bis 6 Tonnen pro Hektar und Umtriebszeit. Würde man die Aschen in den Wald zurückführen und mit einer mittleren Ausbringungsmenge von drei Tonnen pro Hektar und Umtriebszeit rechnen, so wäre bei einem jährlichen Anfall von 1200 Tonnen Grobaschen eine Fläche von 400 Hektar pro Jahr in Bayern notwendig.

Voraussetzung für eine Verwertung von Holzaschen im Wald ist, daß diese ausschließlich aus der Verbrennung von unbehandeltem Holz (= reine Holzaschen) stammen. Ferner muß aus Vorsorge zum Schutz der Waldböden nach den zu erwartenden Bestimmungen des Bodenschutzgesetzes darauf geachtet werden, daß möglichst große Anteile der in den Holzaschen angereicherten Schwermetalle aus dem Stoffkreislauf entfernt werden. Eine sorgfältige Trennung der anfallenden Aschenfraktionen ist daher unbedingt erforderlich. Für eine Ausbringung im Wald kommt derzeit nur die Grobasche in Betracht. Die Feinstflugasche ist dafür nicht geeignet und muß auf eine andere Weise verwertet oder deponiert werden. Bei der Zyklonflugasche entscheidet der jeweilige Belastungsgrad (v. a. Cadmium) über die Verwertbarkeit. In vielen Fällen kann ihre Ausbringung im Wald derzeit nicht empfohlen werden.

## 8.1 Ausbringungsmengen

Ein Hauptargument für die Holzaschenausbringung im Wald ist die Rückführung in natürliche Kreisläufe (Kreislaufwirtschaft). Was dem Wald durch Holznutzung an Nährstoffen entzogen wird, soll über die Holzaschenausbringung wieder zurückgeführt werden.

Dieser Gedanke ist vom Grundsatz her sinnvoll und zweckmäßig, in der Praxis aber oft nur schwer zu verwirklichen. Zum einen sind Entnahme- und Ausbringungsort selten identisch, zum anderen hängt die Höhe der entzogenen Nährstoffe von zahlreichen Einflüssen ab, wie zum Beispiel dem Alter des Bestandes und der Intensität der Nutzung. Es ist ein großer Unterschied, ob lediglich entrindetes Derbholz oder aber ganze Bäume entnommen werden (Abb. 4).

### Abb. 4: Vergleich der Nährstoffgehalte einzelner Baumkompartimente bezogen auf Derbholzvolumen

(= 1) nach Kreuzer [1980], d.h. in der Rinde ist z.B. fünfmal soviel Magnesium enthalten als im Derbholz o.R. (bezogen auf 1g Trockensubstanz)

In der Praxis läßt sich daher eine unmittelbare Rückführung der Nährstoffe schon allein deshalb nicht verwirklichen, weil die beispielsweise bei einer Durchforstung anfallenden Holzmassen und damit die entzogenen Nährstoffmengen so gering sind, daß nur kleinste Aschenmengen zurückgebracht werden dürften. Umsetzbar erscheint daher lediglich die Rückführung aufgrund einer Bilanzierung der Nährstoffentzüge über eine ganze Umtriebszeit. Aus ökologischen Gründen sollte die Rückführung dieser Nährstoffe allerdings nicht auf einmal, sondern auf mehrere Male verteilt erfolgen. Dadurch lassen sich Nährstoffverluste und mögliche negative Auswirkungen einer Überdosierung mit basischen Bestandteilen vermeiden.

Stellt man diesen Verlusten durch Holzernte die Nährelementmengen in den Holzaschen gegenüber, dann erkennt man eine weitere Schwierigkeit. Abhängig vom jeweils betrachteten Nährstoff (Kalium, Phosphor, Magnesium oder Calcium) ergeben sich ganz unterschiedliche Ausbringungsmengen. Welches Nährelement das maßgebliche Leitelement bei einer Dosierungsempfehlung ist, muß deshalb auf jeden Einzelfall abgestimmt werden. Grundsätzlich beschränkt aber der hohe basisch wirksame Anteil die Aufwandmengen, um unerwünschte Nebenwirkungen (Mineralisationsschübe, Überschußnitritifikation, etc.) zu vermeiden. Bei der Holzaschenausbringung sollte daher die bei der Waldkalkung angestrebte Säureneutralisationskapazität nicht wesentlich überschritten werden. Das ergibt eine Aufwandmenge von 3 (1-6) t ha<sup>-1</sup> und Umtriebszeit. Tabelle 11 gibt einen Überblick der Nährstoffentzüge durch Holzernte in zwei verschiedenen Waldbeständen.

*Tab.11: Gegenüberstellung der Nährstoffentzüge durch Holzernte bei unterschiedlicher*

*Nutzungsin-tensität innerhalb einer Umtriebszeit für Fichte bzw. Kiefer [kg/ha] und der Nährstoffzufuhr durch forstübliche Dünger und Holzasche [dt/ha] [nach KREUTZER 1980, YILDIRIM 1978 und ANONYMUS 1987]*

<b>Entzug d. Holzernte</b>	<b>Stickstoff</b>	<b>Phosphor</b>	<b>Kalium</b>	<b>Calcium</b>	<b>Magnesium</b>
<b>für Fichte</b>	640-960	65-100	380-560	410-560	75-95
<b>für Kiefer</b>	430-800	50-80	260-420	290-480	50-105
<b>Zufuhr d. Düngung</b>					
<b>30 dt Dolomit</b>	0	0	0	700-800	200-300
<b>30 dt Holzasche</b>	0	24-48	120-170	820-980	81-93
<b>10 dt Patentkali</b>	0	0	250	60	81-93
<b>10 dt Thomasphos</b>	0	66	0	250	012
<b>30 dt Tetrabon</b>	0	78	150	750	180

Auf nährstoffarmen Standorten kann nach Tabelle 12 bei der Ernte eines einzelnen Baumes (Vollbaumnutzung) mit den folgenden Nährstoffentzügen gerechnet werden. Die von Pavlov [1972] für Buche und von Nebe & Herrmann [1987] für Fichte hergeleiteten Zahlen gestatten eine grobe Abschätzung der erntebedingten Nährstoffverluste nach dem Stammdurchmesser. Aus der Höhe der so ermittelten Entzüge läßt sich dann eine mögliche Aufwandmenge für die Holzaschenausbringung ableiten.

**Tab. 12:** Elemententzüge in kg/Baum auf nährstoffarmen Böden für Buche [Pavlov 1972] und Fichte [Nebe & Herrmann 1987]

<b>Baumart</b>	<b>BHD (cm)</b>	<b>Stickstoff</b>	<b>Phosphor</b>	<b>Kalium</b>	<b>Calcium</b>	<b>Magnesium</b>
<b>Buche</b>	24	0,57	0,09	0,33	0,36	0,07
	32	1,21	0,19	0,70	0,56	0,15
	40	2,09	0,31	1,21	0,80	0,26
<b>Fichte</b>	24	0,52	0,04	0,21	0,61	0,05

	32	0,93	0,08	0,37	0,95	0,07
	40	1,75	0,12	0,67	1,71	0,14

Wissenschaftliche Untersuchungen und praktische Erfahrungen haben gezeigt, daß Waldbestände auf nährstoffarmen, sauren bis stark sauren Böden mit ungünstiger Humusform mit kohlensauren Magnesiumkalken (2-4 t Dolomit/ha) ohne ökologische Nachteile gedüngt werden können. Diese Bestände weisen in der Regel eine schwache Stickstoffversorgung und gedämpfte Wuchsleistung auf. Eine pH-Erhöhung ist hier erwünscht, um die Umsetzung anzuregen und damit die Nährstoffkreisläufe wieder zu aktivieren und gleichzeitig Säureeinträge aus der Atmosphäre abzufuffern. Eventuell gasförmig entweichender Stickstoff wird von den "stickstoffhungrigen" Beständen aufgenommen und so vor der Auswaschung bewahrt. Auswirkungen auf die Sickerwasserqualität sind daher nicht zu befürchten. Auf diesen Standorten kann sich die Dosierung der Holzasche an der Menge basisch wirksamer Bestandteile der Dolomiddüngung orientieren.

## 8.2 Ausbringungstechnik

Unabhängig von den Schwierigkeiten bei der Herleitung der passenden Ausbringungsmengen, ergeben sich weitere Einschränkungen einer Holzaschenverwertung im Wald. Sie liegen in den bisher noch wenig untersuchten Möglichkeiten einer sowohl für Anwender wie auch für den Wald unschädlichen Ausbringungstechnik begründet.

Die in der Landwirtschaft üblichen schleppergestützten Verfahren für staubförmige Kalkdünger sind im Wald im allgemeinen nicht einsetzbar und scheiden auch bereits wegen der Gefahr von Bodenverdichtungen durch mehrmaliges Befahren in vielen Fällen von vorneherein aus. Selbst wenn die Asche in granulierter Form vorläge, wäre eine gleichmäßige Verteilung mit dem Schlepper in den meisten Waldbeständen erst in den letzten Jahrzehnten vor der Hiebsreife möglich, wenn die Stammzahldichte geringer ist. In dichten Beständen wäre lediglich eine Ausbringung von Hand denkbar. Die Granulierung von Holzaschen ist zudem mit erheblichen Zusatzkosten verbunden (Lagerung, Transport und Aufbereitung).

Aus den Erfahrungen mit der Meliorationskalkung empfiehlt sich ein Verblasen der Asche von Erschließungswegen aus. Dieses Verfahren ist für Holzaschen noch wenig erprobt und wegen Sand- bzw. Steinbeimengungen (stammen von der Holzernte) mit erheblichem Geräteverschleiß verbunden [vgl. Obernberger 1995]. Zusätzlich erfordert die Ausbringung mit Verblasegeräten ausreichend große Einsatzflächen (> 20 ha) und -mengen (> 40 Tonnen), um wirtschaftlich durchgeführt werden zu können.

Als weitere Alternative wäre auch eine Beimischung der Holzaschen zu den forstüblichen kohlen-sauren

Magnesiumkalken denkbar. Diese Gemische könnten dann im Zuge der Meliorationskalkung im Wald eingesetzt werden.

## 9 Alternative Verwertungsmöglichkeiten

Die Verwertung von Holzaschen ist in verschiedenen Bereichen der Wirtschaft denkbar.

Die Landwirtschaft mit ihrem hohen Flächenanteil und Düngemittelbedarf erlaubt zahlreiche Verwertungsmöglichkeiten. Insbesondere für Ackerbaubetriebe könnten schadstoffarme Holz-aschen ähnlich wie Gesteinsmehle eingesetzt werden. Empfehlungen hierzu geben Krauss [1995], Hasler & Nussbaumer [1996].

Eine weitere Verwertungsmöglichkeit ist die Kompostwirtschaft. Zahlreiche Untersuchungen bestätigen dies [vgl. hierzu Narodoslawsky 1994]. Die Kompostbetriebe sind auf der gesamten Landesfläche präsent. Durch eine Beimischung von Holzaschen ließen sich die Nährstoffverhältnisse der Komposte entsprechend gestalten und die hohe Alkalität der Holzaschen senken.

Schließlich ist auch eine Verwertung der Aschen als Zuschlagsstoffe in der Bauwirtschaft (z.B. Zementherstellung, Straßenbau, etc.) möglich. Untersuchungen von Pohlandt [1995] zeigen hierzu verschiedene Einsatzmöglichkeiten auf.

## 10 Ausblick und Schlußfolgerungen

Die thermische Nutzung von Holz wird in den nächsten Jahren deutlich zunehmen. Deshalb ist es bereits heute erforderlich, sich auf diese künftige Entwicklung einzustellen. Insbesondere bei der Frage der möglichen Wiederverwertung von Holzaschen bestehen erhebliche Unsicherheiten, sowohl auf Produktions- wie auf Verwertungsseite. Der Gesetzgeber hat bisher die Verwertung des in seiner Zusammensetzung stark variierenden Abfallprodukts Holzasche nicht näher geregelt, was zu erheblicher Rechtsunsicherheit führt.

Aus Gründen der Rechtssicherheit und der Verwaltungsvereinfachung bei der Genehmigung und dem Betrieb von Holzheiz(kraft)werken sollten die **Aschen aus unbehandelten Hölzern als Sekundärrohstoffdünger** mit klar definierten Höchstgrenzen für Schadstoffe in die Düngemittelverordnung aufgenommen werden. Dies sichert einen definierten Qualitätsstandard für die Holzaschen und garantiert eine sachgemäße Verwertung nach guter fachlicher Praxis. Über die einschlägigen Landesverordnungen sind die Instrumentarien für eine entsprechende Verkehrskontrolle bereits vorhanden und gestatten einen landesweiten Prüfservice.

Ist eine Aufnahme in das Düngemittelrecht nicht möglich, dann sollte die Verwertung von Holzaschen in einer eigenen Holzaschen-Verordnung - ähnlich wie bei der Ausbringung von Klärschlamm - nach dem Abfallrecht geregelt werden.

Bis es zu einer klaren gesetzlichen Regelung kommt, muß in jedem Einzelfall eine Prüfung nach folgenden Gesichtspunkten durchgeführt werden:

- Die einzusetzenden Holzaschen - dabei handelt es sich in der Regel um

Grobaschen - müssen aus der Verbrennung von unbehandeltem Holz stammen.

- Die Schadstoffgehalte der anfallenden Holzaschen müssen nach den Maßstäben der vorliegenden Regelwerke (Klärschlammverordnung, TA-Siedlungsabfall und Entwurf zur Bodenschutzverordnung) für einen Einsatz im Wald unbedenklich sein.
- Eine Ausbringung der Holzaschen darf erst erfolgen, nachdem die Düngewürdigkeit der Waldbestände (Düngediagnose) festgestellt worden ist (gute fachliche Praxis).
- Konkrete Schutzziele dürfen durch unerwünschte Nebenwirkungen nicht gefährdet werden (Wasserschutz, Naturschutz etc.).

## 11 Zusammenfassung

Die thermische Nutzung von Holz wird insbesondere in Bayern staatlich gefördert. Daher steigt der Anfall von Holzaschen. Derzeit werden in Bayern in staatlich geförderten Biomasseheiz(kraft)werken cirka 60.000 t/a ausschließlich unbehandeltes Energieholz (z.B. Wald-Hackgut) verwertet. Der daraus resultierende Aschenanfall beträgt rund 1.200 t/a.

Bei der Verbrennung von unbehandeltem Holz fallen drei Aschefraktionen - Rostasche, Zyklonasche und Flugasche - an. Diese Fraktionen unterscheiden sich in ihrer chemischen Zusammensetzung sehr stark. Die Rostasche ist besonders reich an Nährstoffen und gleichzeitig am wenigsten mit Schadstoffen belastet.

Die Verwertung von Holzaschen im Wald erfordert dringend eine klare rechtliche Regelung. Dabei wäre entweder die Einbindung in das Düngemittelrecht oder alternativ eine Konkretisierung im Abfallrecht wünschenswert und würde Rechtssicherheit schaffen.

Da bisher konkrete Regeln für den Abfall Holzasche fehlen, muß deshalb eine Ausbringung im Wald nach allgemeinen Grundsätzen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und nach den für das Verfahren jeweils einschlägigen Rechtsvorschriften (Forst-, Düngemittel- und Bodenschutzrecht) beurteilt werden. Dabei sind bestehende Umweltqualitätsnormen (Klärschlammverordnung, Entwurf zur Bundesbodenschutzverordnung) zu beachten.

Bei der Ernte von Brennholz werden dem Wald Nährstoffe entzogen, die nach der thermischen Nutzung in den Holzaschen zurückbleiben. Über die Rückführung dieser Holzabfälle in den Wald könnten die bei der Holzernte auftretenden Nährstoffverluste zum Teil wieder ausgeglichen werden. Aufgrund der hohen pH-Werte und der erheblichen Schwermetallgehalte ist das Recycling von Holzaschen aber nicht unproblematisch.

Die Ausbringung von Holzaschen im Wald ist nur dann empfehlenswert, wenn diese ausschließlich aus der Verbrennung von unbehandeltem Holz stammen. Die stark mit Schwermetallen angereicherten Flugaschenfraktionen müssen von der Grobasche getrennt und von der forstlichen Nutzung ausgeschlossen werden. Bei nachgewiesener geringer Belastung können allerdings auch Zyklonflugaschen wiederverwertet werden.

Grundsätzlich beschränkt der hohe basisch wirksame Anteil die Aufwandsmengen, um unerwünschte Nebenwirkungen (starke Mineralisierung, Überschußnitritifikation, etc.) auf das Waldökosystem zu vermeiden. Bei der Ausbringung sollte daher die bei der Waldkalkung angestrebte Säureneutralisationskapazität nicht wesentlich überschritten werden. Damit

kann eine Aufwandmenge von 3 (1-6) t pro Hektar und Umtriebszeit empfohlen werden.

Die Ausbringung im Wald ist darüber hinaus nur dann vertretbar, wenn die Düngewürdigkeit (einzelbestandsweise Düngediagnose) nachgewiesen ist. Bisher ist sie aus technischen Gründen nur schwer zu realisieren. Eine flächige Verteilung mit Verblasegeräten scheint jedoch grundsätzlich möglich.

## 12 Abstract

The use of wood as fuel is promoted by the Bavarian government. The amount of wood ashes is therefore increasing. Approximately 60000 t a<sup>-1</sup> of untreated fuel wood is currently used in state-supported bio-mass power stations. The resulting ashes is around 1200 t a<sup>-1</sup>.

During the process of burning wood, three fractions of ashes are accumulated: bottom (grate) ashes, cyclone-fly ashes, and filter-fly ashes. These fractions differ in their chemical composition. Particularly, grate ashes is very nutritious and at the same time least contaminated with harmful substances such as heavy metals.

At present time there are no specific regulations concerning wood ashes as a waste product and their legal range of use. Therefore the use of wood ashes in forests urgently require clear legal regulations. An integration under the Law on Fertilizers and Waste is recommended and would clarify the legal situation.

Until now assessment is based on the general principles of the laws on recycling and on legal regulations for the procedure being used (forestry law, laws on fertilisers and soil protection). Particular attention should be paid to existing environmental quality standard (sewage sludge regulations, draft legislation on soil protection).

Considerable quantities of nutrients are removed from forests by harvesting and remain in wood ashes after thermal use. By returning ashes to the forests nutrient losses can be partially put back. High pH-value and a not inconsiderable level of harmful substances, however, might cause some problems.

From a scientific point of view recycling of wood ashes in forests is only recommended when they result **exclusively** from the burning of untreated wood. Fly ashes, which have a high content of heavy metals, have to be separated from the coarse ashes and excluded from use in the forest. If low contamination is determined, cyclone-fly ashes can also be re-used.

However, the application quantity is restricted because of the high alkaline content and its effects on the forest eco-system (e.g. high mineralisation, excessive nitrification). Therefore, the soil acid neutralisation capacity should

not be allowed to rise much above the level for lime application. An amount of 3 (1-6) t ha<sup>-1</sup> wood ashes in one rotation period is recommended.

In general an application of ashes in forests can only be justified if a need for fertilizer is determined and based upon an individual stand fertilizing diagnosis. Up to now, distribution is for technical reasons still difficult to realize. The use of blasting machines seems to be possible.

# 13 Abkürzungsverzeichnis

## Leistung, Wärmemenge, Elektrische Leitfähigkeit

Die Leistung einer Verbrennungsanlage gibt an, wieviel Energie pro Zeiteinheit geliefert werden kann. Sie wird in Watt (W) angegeben.

Als Maßeinheit für die Wärmemenge wird heute das Joule (J) oder die Kilowattstunde (kWh) verwendet. Zwischen diesen beiden Größen besteht folgender Zusammenhang:

$$1 \text{ kWh} = 3.600 \text{ kJ} \text{ (3,6 MJ)}$$

$$1 \text{ MJ} = 0,278 \text{ kWh}$$

## Abkürzungen

kW Kilowatt

Kilo =  $10^3$

kWh Kilowattstunde

MW Megawatt

Mega =  $10^6$

MWth Megawatt thermisch

MWel Megawatt elektrisch

GW Gigawatt

Giga =  $10^9$

PJ Petajoule

Peta =  $10^{15}$

mS/cm Milli-Siemens pro Zentimeter

## Elementabkürzungen

Al = Aluminium

Cu = Kupfer

Na = Natrium

As = Arsen

Fe = Eisen

Ni = Nickel

C = Kohlenstoff

Hg = Quecksilber

O = Sauerstoff

Ca = Calcium

K = Kalium

P = Phosphor

Cd = Cadmium

Mg = Magnesium

Pb = Blei

Co = Kobalt

Mn = Mangan

V = Vanadium

Cr = Chrom

N = Stickstoff

Zn = Zink

## Maßeinheiten für Holz

**fm / m<sup>3</sup> Maßeinheit für einen Kubikmeter feste Holzmasse (Festmeter)**

rm Maßeinheit für geschichtete und geschüttete Holzteile,  
(Raummeter) die unter Einschluß der Luftzwischenräume  
ein Gesamtvolumen von einem Kubikmeter füllen

**Srm Maßeinheit für einen Raummeter geschütteter Holzhackschnitzel  
(Schüttraummeter)**

t TS Maßeinheit für das Gewicht einer Tonne absolut  
trockener Holzmasse (Tonne Trockensubstanz)

m; (r) Maßeinheit für die Rohholzmenge die erforderlich ist,  
um daraus eine bestimmte Produkteinheit (z. B. Möbel,  
Papier, Parkett) herzustellen (Rohholzäquivalent)

## 14 Literaturverzeichnis

Asche, N.; Nolte, N. (1997) Waldkalkung mit Asche. AFZ/Der Wald, Nr.1, S.16-20

Baath, E.; Arenebrant, K. (1993): Microfungi in coniferous forest soils treated with lime or wood ash. Biol. Fertil. Soils 15, S. 91-95

Baath, A.; Arenebrant, A. (1994): Growth rate and response of bacterial communities to pH in limed and ash treated forest soils. Soil Biol. Biochem. 26 (8), S. 995-1001

Baath, E.; Frostegard, A.; Pennanen, T.; Fritze, H. (1995): Microbial community structure and pH response in relation to soil organic matter quality in wood-ash fertilized, clear-cut or burned coniferous forest soils. Soil Biol. Biochem. 27 (2), S. 229-240

Bachmann, G.; Schmidt, S.; Bannick, C.G. (1996): Hintergrundwerte für Schwermetalle in Böden. Wasser und Boden, 48. Jahrg., S. 8-11.

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.): Grundsätze für die Düngung im Wald (Dünge-RL)

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung E.V. (1996): Biomasse-Heizwerke, Gegenwärtiger Stand und Entwicklungstendenzen. Studie im Auftrag der Bayernwerk AG in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität München

Biedermann, F. (1994): Stoffflüsse der Nährstoffe und Schwermetalle in Biomasseheizwerken. Tagungsband zum Symposium: Sekundärrohstoff Holzasche, vom 15. und 16. September 1994, Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Graz

Büttner, G. (1994): Sekundärrohstoff Holzasche. Symposium und Workshop in Graz. Forst und Holz, 49. Jg., S. 740-741

Büttner, G.; Rumpf, S. (1996): Einsatz von Holzasche im Wald. In: Sekundärrohstoffe im Stoffkreislauf der Landwirtschaft, Kongreßbericht 1996, VDLUFA-Schriftenreihe, S. 473-476

Candinas, T. (1994): Aschen und ihre landwirtschaftliche Verwendung.

Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 2; Bundesministerium f. Ernährung, Landwirtschaft und Forsten

C.a.r.m.e.n. (1997): Energiebilanz Biomasse 1995. Unveröffentlichte Zusammenstellung.

Clarholm, M. (1994): Granulated wood ash and a "N-free" fertilizer to a forest soil-effects on P availability, *Forest Ecology and Management* 66 (1-3), S. 127-136

Clemensson-Lindell, A.; Persson, H. (1995): Fine root vitality in a Norway spruce stand subjected to various nutrient supplies. *Plant and Soil* 168-169, S. 167-172

Deutsches Institut Für Wirtschaftsforschung (DIW) (1996): Holzverbrauch in den Haushalten Deutschlands. Gutachten im Auftrag der Europäischen Kommission

Dietrich, H.-P. (1997): Rechtliche Aspekte bei der Ausbringung von Holzasche. In: C.a.r.m.e.n.: 2. Betreiber-Fachgespräch "Biomasse-Heizkraftwerke" v. 10. Juni 1997, Tagungsband, Rimpf/Würzburg

Felber, H.; Noger, D.; Hasler, P. (1996): Verwertung und Entsorgung von Holzaschen in der Schweiz. In: Nussbaumer, T. (Hrsg): Tagungsband zum 4. Holzenergiesymposium der ETH Zürich am 18.10.1996. S. 63-87

Feger, K.-H. (1993): Bedeutung von ökosysteminternen Umsätzen und Nutzungseingriffen für den Stoffhaushalt von Waldlandschaften. *Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen*, Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwig-Universität Freiburg i.Br. (Hrsg.), Nr. 31, 237 S, Freiburg

Förster, U.; Fhöming, J. (1997): Altlasten einfach wegrechnen. *Bodenschutz*, 2. Jg., Heft 3, S. 72-73

Fritze, H.; Kapanan, A.; Vanhala, P. (1995): Cadmium contamination of wood ash and fire-treated coniferous humus: Effect on soil respiration. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 54, S. 775-782

Frostegard, A.; Baath, E.; Tunlid, A. (1993): Shifts in the structure of soil microbial communities in limed forests as revealed by phospholipid fatty acid analysis. *Soil. Biol. Biochem.* 25 (6), S. 775-782

- Frühwald, A., et al. (1994): Holz - ein Rohstoff der Zukunft. Informationsdienst Holz; Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V.
- Gulder, H.J.; Kölbl, M. (1993): Waldbodeninventur in Bayern. Forstliche Forschungsberichte München, Nr. 132
- Hasler, P. (1994): Stoffflüsse in Altholzfeuerungen - Charakteristik der anfallenden Aschen. Tagungsband zum Symposium: Sekundärrohstoff Holzasche, vom 15. und 16. September 1994, Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Graz, S. 69-82
- Hasler, P.; Nussbaumer T. (1996): Landwirtschaftliche Verwertung von Aschen aus der Verbrennung von Gras, Chinaschilf, Hanf, Stroh und Holz. Verenum Zürich; Schlußbericht Bundesamt für Energiewirtschaft Bern
- Hofbauer, H. (1994): Charakterisierung von biogenen Brennstoffen und Verwertung von Holzaschen. Tagungsband zum 3. Holzenergie-Symposium; ETH Zürich
- Hönlein, (1943 a): zit. in Rummel, O.: Die Pottaschesiederei im Spessart Teil III, "Ausfuhr der rohen Asche verboten"; Main Echo 3.9.1992
- Hönlein, (1943 b): zit. in Rummel, O.: Die Pottaschesiederei im Spessart Teil I, "Ein stets begehrtes Universalmittel"; Main Echo 31.8.1992
- Kaltschmitt, M. (1996): Nutzung biogener Brennstoffe - Stand und Perspektiven. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe Band 6: Biomasse als Festbrennstoff; Landwirtschaftsverlag; Münster
- Kampfmann, G. (1984): Vom Umgang der Menschen mit dem Wald im Glashüttenspessart. In: Grimm, C. (Hrsg.) [1984]: Glück und Glas. Zur Kulturgeschichte des Spessartglases. Veröffentlichungen zur Bayer. Geschichte und Kultur, Haus der Bayer. Geschichte, Verlag Kunst & Antiquitäten, München
- Krauss, M. (1995): Landwirtschaftliche Verwertung der Asche aus nachwachsenden und sekundären Rohstoffen. SuB, Heft 5, S. IV13-15
- Kreutzer, K. (1979): Ökologische Fragen zur Vollbaumnutzung. Forstw. Centralblatt, Jg. 98, Heft 6, S. 298-308

Kreutzer, K. (1979): Der Einfluß moderner Holzernteverfahren auf die Ökologie des Waldes. Verh. d. Ges. f. Ökologie, Bd. VIII, S. 229-233

Keutzer, K. (1979): Ökologische Fragen zur Vollbaumnutzung. Forstw. Centralblatt, Jg. 98, Heft 6, S. 298-308

Kreutzer, K. (1994): Folgerungen aus der Höglwaldforschung. Allg. Forstzeitung, Nr. 14, S. 769-774

Lamp, P. (1996): Ökologische Bewertung der Biomasseheiz(kraft)werke. Tagungsband zum 5. Symposium im Kreislauf der Natur, C.a.r.m.e.n, Würzburg

Lyr, H.; Fiedler, H.-J.; Tranquillini, W. (1992): Physiologie und Ökologie der Gehölze. Gustav Fischer Verlag Jena, Stuttgart

Müller; Schmitt-gleser (1996): Handbuch der Abfallentsorgung. Loseblattsammlung, ecomed-Verlag

meyers Konversations- Lexikon (1984): 4. Überarbeitete Auflage; Leipzig

Meyrahn H.; Möhlenbruch, N.; Pfäffgen, H.-P. (1994): Flugasche aus rheinischer Brikettierbraunkohle für die Walddüngung. Forst und Holz, Nr. 15, S. 421-423

Narodoslawsky, M. (1994): Kompostierung von Holzasche. Tagungsband zum Symposium: Sekundärrohstoff Holzasche, vom 15. und 16. September 1994, Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Graz

Nebe, W.; Herrmann, U. J. (1987): Das ökologische Meßfeld der Sektion Forstwirtschaft der TU Dresden. VI. Zur Verteilung der Nährelemente in der oberirdischen Dendromasse eines 100jährigen Fichtenbaumholzes. Wiss. Z. Techn. Univ. Dresden 36: S. 235-241

Obernberger, I. (1994): Mengen, Charakteristik und Zusammensetzung von Aschen aus Biomasseheizwerken. Tagungsband zum Symposium: Sekundärrohstoff Holzasche, vom 15. und 16. September 1994, Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Graz

Obernberger, I. (1995): Aschen aus Biomassefeuerungen - Schwermetallfraktionierung und Recyclingstrategien. Tagungsband zum

- vierten OTTI-Symposium Biobrennstoffe und umweltfreundliche Heizanlagen
- Obernberger, I. (1996): Wechselwirkung Biomasse-Asche und daraus resultierende technische und strategische Rahmenbedingungen. Tagungsband zum 5. Symposium: Biobrennstoffe und umweltfreundliche Energietechnik; OTTI Regensburg (Hrsg.)
- Obernberger, I. (1996): Logistik der Aschenaufbereitung und Aschenverwertung. In: Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe", Bd. 5, Logistik bei der Nutzung biogener Festbrennstoffe, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster.
- Obernberger, I. (1997): Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente. Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung; TU Graz
- Obernberger, I.; narodoslowsky, M. (1994): Verbrennungsbedingte Stoffflüsse Biomasse -Asche und deren Beeinflussung. Tagungsband: Thermische Nutzung von Biomasse; Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.)
- Ohno, T. (1992): Neutralization of soil acidity and releas of phosphorus and potassium by wood ash. J. Environ. Qual. 21 (3), S. 433-438
- Pavlov, M. B. (1972): Bioelement-Inventur von Buchen- und Fichtenbeständen im Solling. Göttinger Bodenkundl. Berichte 25, S.1-174
- Peretzki, F. (1997): Holzascheverwertung auf landwirtschaftlichen Flächen. In: C.a.r.m.e.n., 2. Betreiber-Fachgespräch "Biomasse-Heizkraftwerke" v. 10. Juni 1997, Tagungsband, Rimpf/Würzburg
- Pohlandt, K.; Marutzky, R. (1994): Concentration and distribution of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD) and polychlorinated dibenzofurans (PCDF) in wood ash. Chemosphere 28, S. 1311-1314
- Pohlandt, K. (1995): Zusammensetzung, Verwertung und Entsorgung von Holzaschen. Holz-Zentralblatt, Nr. 79, S., 1305 und 1313-1315, Sonderdruck
- Remler, N.; Fischer, M. (1996): Kosten und Leistung bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. Berichte aus der Bayer. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft Nr. 11

Remler, N. (1997): Holzaschen - Aufkommen und Bedeutung. Arbeitsmaterialien der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft; unveröffentlicht

Ruckenbauer, P. (1994): Pflanzenbauliche Aspekte einer Holzaschenausbringung auf Acker und Grünland. Tagungsband zum Symposium: Sekundärrohstoff Holzasche, vom 15. und 16. September 1994, Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Graz

Ruckenbauer, P.; Obernberger, I.; Holzner, H. (1996): Erforschung der Verwendungsmöglichkeiten von Aschen aus Hackgut- und Rindenfeuerungen. Endber. Forschungsprojekt StU48, Inst. f. Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Univ. für Bodenkultur Wien

Rothe, A. (1994): Auswirkungen auf Bodenchemie und Wasserqualität. Allg. Forstzeitung, Nr. 14, S. 754-758

Rothe, A. (1997): Einfluß des Baumartenanteils auf Durchwurzelung, Wasserhaushalt, Stoffhaushalt und Zuwachsleistung eines Fichten-Buchen-Mischbestandes am Höglwald. Forstlicher Forschungsbericht München Nr. 163, 174 S.

Saarela, I. (1991): Wood, bark, peat and coal ashes as liming agents and sources of calcium, magnesium, potassium and phosphorus. Ann. Agric. Fenn. 30, S. 375-388

Silfverberg, K.; Huikari, O. (1985): Wood-ash fertilization on drained peatlands. Folia For 633:1-25, Finland

Silfverberg, K. (1994): Voraussetzung und Ergebnisse der Ascheausbringung in Finnland. Tagungsband zum Symposium: Sekundärrohstoff Holzasche, vom 15. und 16. September 1994, Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Graz (Hrsg); S. 131-150

Spitzer, J. (1994): Technologische Anforderungen an die Verbrennungsführung kleiner und mittelgroßer Holzfeuerungsanlagen hinsichtlich der Ausbrandgüte der anfallenden Aschen. Tagungsband zum Symposium: Sekundärrohstoff Holzasche, vom 15. und 16. September 1994, Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Graz

Strehler, A. (1997): Statement zur Verwertung von Holzaschen. In:

C.a.r.m.e.n., 2. Betreiber-Fachgespräch "Biomasse-Heizkraftwerke" v. 10. Juni 1997, Tagungsband, Rimpf/Würzburg

Thomas, P.A.; Wein, R.W. (1990): Amelioration of wood ash toxicity and jack pine establishment. *Canadian-Journal-of-Forest-Research* 24(4), S. 748-755

Trüby, P. (1994): Zum Schwermetallhaushalt von Waldbäumen. *Freiburger Bodenkundl. Abh.*, Heft 33, Freiburg i. Br.

Unteregger, E. (1994): Die Holzashedüngung im Forst. Tagungsband zum Symposium: Sekundärrohstoff Holzasche vom 15. und 16. September 1994, Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Graz

Unger, Y.L.; Fernandez, F. (1990): The short-term effect of wood-ash amendment on forest soils. *Water Soil Pollution* 49, S. 299-314

Wolff, B.; Rieck, W. (1997): *Deutscher Waldbodenbericht 1996*. Bundesministerium f. Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg), Bonn

Yildirim, M. (1978): Der Nährstoffexport aus Fichtenreinbeständen in Abhängigkeit vom Holzernteverfahren. Diss. an der Universität Göttingen

Zollner, A. (1996): Düngeversuche in ostbayerischen Wäldern. *Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* Nr. 6

Zollner, A. (1997): Eigenschaften von Holzaschen und Möglichkeiten der Wiederverwertung. In: C.a.r.m.e.n., 2. Betreiber-Fachgespräch "Biomasse-Heizkraftwerke" v. 10. Juni 1997, Tagungsband; Rimpf/Würzburg

Zollner, A.; Remler, N. (1997): Eigenschaften von Holzaschen und Möglichkeiten der Wiederverwertung. *Forst und Holz*; in Druckvorbereitung.