

Bewertung der Nährstoff- und Schwermetallgehalte von Holzaschen aus bayerischen Heiz(kraft)werken

Hans Bachmaier, Daniel Kuptz und Hans Hartmann

Abstract

Assessment of the nutrient and heavy metal content of wood ash from Bavarian heat (and power) plants

Ashes from biomass heat (and power) plants that apply natural fuels may be suitable for the use as fertilisers if certain requirements regarding pollutants and nutrient contents are met. The range and average values of relevant nutrients and pollutants in wood ashes from Bavarian biomass heating and power plants were determined by on-site sampling. For this purpose, different ash fractions from 18 Bavarian heating and power plants were investigated ($n = 50$, bottom and cyclone ashes). In 30% of all cases, the heavy metal limits of the German Fertiliser Ordinance were met in the sampled bottom ashes directly. The limit values were exceeded in some cases for chromium(VI), cadmium and lead (chromium(VI): 62%, cadmium: 12%, lead: 4%). Cyclone ashes were high in cadmium, lead and zinc. If chromium(VI) could be reduced by suitable treatment, 85% of the bottom ashes would comply with the required limit values. Therefore, quality assurance systems should be applied at biomass heating plants to improve ash quality if wood ashes should be used as fertilisers in agriculture. The analysis of the main nutrients showed high values for potassium and calcium, but also relevant amounts of phosphorus in wood ashes, making them suitable as fertilisers if pollutant limits are met.

1 Nährstoff- und Schwermetallgehalte von Holzaschen aus bayerischen Heiz(kraft)werken

1.1 Einleitung

Bei der energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in Biomassefeuerungen fallen Verbrennungsrückstände in Form von Asche an [27]. Allein in Bayern dürfte der Ascheanfall aus der Verbrennung von naturbelassenen Brennstoffen in Heiz(kraft)werken mit einer installierten Leistung von mehr als $1 \text{ MW}_{\text{therm}}$ zwischen 30.000 und 60.000 t/a betragen (berechnet aus den Zahlen des Energieholzmarktberichts 2018 der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF)) [10].

Je nachdem, wo im Heizwerk die Asche anfällt, werden verschiedene Aschefractionen unterschieden. Die im Kessel anfallende Asche wird als „Rostasche“, „Feuerraumasche“, „Brennraumasche“ oder „Grobasche“ bezeichnet. Meist wird die Asche aus den Wärmetauschern mit der Rostasche gemeinsam erfasst und bildet dann die Fraktion der sogenannten „Rost- und Kesselasche“. Nachdem das heiße Abgas den Wärmetauscher durchlaufen hat, passiert es in den meisten Heiz(kraft)werken einen Zyklon, in dem die „Zyklonasche“ (auch „Flugasche“, „Feinflugasche“) anfällt. Verfügt das Heiz(kraft)werk über einen Elektro- oder Gewebefilter oder eine Rauchgaskondensation, fällt als dritte Fraktion die „Filterasche“ (auch „Feinstflugasche“) bzw. der „Kondensatschlamm“ an [12]. Der Inhalt des folgenden Beitrags fokussiert auf Rost- und Kesselaschen sowie Zyklonaschen.

Die Zusammensetzung der einzelnen Aschefractionen ist abhängig von den Brennstoffen und der Anlagentechnik [27]. Die chemischen Inhaltsstoffe in naturbelassenem Holz, beispielsweise die enthaltenen Nähr- bzw. Schadstoffe, variieren je nach Holzart, Rindenanteil, Wuchsstandort oder Verschmutzungsgrad [7, 18, 34]. Haupt- und Spurenelemente (v.a. viele Schwermetalle) sind bei den im Brennraum herrschenden Temperaturen

unterschiedlich flüchtig [27]. Sie reichern sich daher unterschiedlich stark in Rost-, Zyklon- oder Filterasche an [21, 22]. Zu den leicht flüchtigen Schwermetallen zählen Arsen, Cadmium, Blei, Zink und Quecksilber. Schwerflüchtige Elemente wie Chrom oder Kupfer verbleiben dagegen vermehrt in Rost- und Kesselaschen. Die stoffliche Nutzung von Biomasseaschen stellt die Praxis vor große Herausforderungen [30, 32, 33]. Komplexe rechtliche Rahmenbedingungen, eine aufwändige Asche-logistik aufgrund des dezentralen Anfalls, schwankende Qualitäten sowie Aspekte der Lager- und Arbeitssicherheit sind nur einige der Punkte, die bei der stofflichen Nutzung von Aschen berücksichtigt werden müssen. Daneben befinden sich viele Nutzungspfade noch im Entwicklungs- bzw. Pilotstadium [3, 19, 23, 35]. Folglich wird die Asche aus Biomassefeuerungen bislang häufig noch nicht als Koppelprodukt der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe und damit als wertvolles Zwischenprodukt wahrgenommen, sondern als Abfall eingestuft, der kostenpflichtig entsorgt werden muss.

Biomasseaschen werden in Deutschland und anderen europäischen Ländern je nach technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Gegebenheiten und unter Berücksichtigung umweltrelevanter Aspekte bereits zu unterschiedlichen Zwecken stofflich genutzt. Eine verhältnismäßig weit verbreitete Anwendung in Deutschland ist die Verwendung von Aschen als Dünger oder als Zuschlagstoff für Dünger auf landwirtschaftlichen Flächen. So wurde beispielsweise das bayerische Kalkwerk Hermann Trolius GmbH 2019 mit dem Nachhaltigkeitspreis der Deutschen Gesteinsindustrie für die Herstellung von Holzasche-Magnesiumkalk-Gemischen für landwirtschaftliche und forstliche Anwendungen ausgezeichnet [6]. Eine Anwendung in der Forstwirtschaft findet vor allem in Baden-Württemberg und in den skandinavischen Ländern statt, indem Asche oder Asche-Kalk- bzw. Asche-Kalkdolomit-Gemische zur Bodenverbesserung eingesetzt werden [11, 17, 37, 38]. Auch die Vermischung von Aschen mit Kompost ist ein manchmal in Deutschland genutzter

Autoren

Dr. Hans Bachmaier
Dr. Daniel Kuptz
Dr. Hans Hartmann
Technologie- und Förderzentrum im
Kompetenzzentrum für Nachwachsende
Rohstoffe (TFZ)
Straubing, Deutschland

Verwertungspfad. In Österreich ist dieser Pfad zwar ebenso rechtlich möglich, die Begrenzung auf eine nur sehr geringe Beimischungsquote von 2 % macht das Verfahren aber unwirtschaftlich und es werden dort keine relevanten Mengen über diese Schiene verwertet [36]. Im Gegensatz zu Deutschland werden in Österreich etwa 40 % der jährlich anfallenden Aschen von der Zement- und Baustoffindustrie weiterverarbeitet [36]. Auch der Einsatz der Aschen beim Straßen- und Wegebau wurde in Österreich und Finnland erfolgreich in Forschungsvorhaben getestet [3, 17, 28].

Aschen enthalten die Makronährstoffe Calcium, Magnesium, Kalium und Phosphor sowie zahlreiche Mikronährstoffe und eignen sich daher besonders für Düngezwecke. Das Bayerische Landesamt für Umwelt LfU (2009) [30] gibt als durchschnittliche Gehalte für Rost- und Kesselaschen 25 bis 45 m-% Calciumoxid (CaO), jeweils 3 bis 6 m-% Magnesiumoxid (MgO) und Kaliumoxid (K₂O) und 2 bis 3 m-% Phosphat (P₂O₅) an. Dadurch werden Aschen interessant als Düngemittel. Die Wasserlöslichkeit von Aschen liegt zwischen 10 und 30 %. Die Metalloxide in der Asche sind ursächlich für den hohen pH-Wert der Asche im alkalischen Bereich zwischen pH 11 und pH 13.

Katzensteiner et al. (2011) [13] beschreiben die Pflanzenverfügbarkeit von Calcium und Kalium aus Holzaschen als „hoch“, die Magnesiumverfügbarkeit als „mittel“ und die Phosphatverfügbarkeit als „gering“. „Gering“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass weniger als 10 % des Gesamtphosphats aus Holzaschen im Anwendungsjahr für die Pflanze verfügbar sind. Bei Gefäßversuchen wiesen Kebli et al. (2017) [14] und Maltas et al. (2014) [24] die Aufnahme von Kalium aus Holzasche bei Raygras und Sonnenblumen nach. Bei den Sonnenblumen ließ sich darüber hinaus auch eine P-Aufnahme aus den Aschen beobachten.

Da die Qualitätssicherung von Aschen sowie von Produkten aus Aschen wegen möglicher Schadstoffbelastungen vor allem für die Anwendung als Düngemittel oder im Rahmen der Waldkalkung eine wichtige Rolle spielt, besteht in Deutschland die Möglichkeit der Zertifizierung. Die Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK) und die Bundesgütegemeinschaft Holzasche e.V. (BGH) als Spartengütegemeinschaft der BGK verleihen das RAL-Gütezeichen „GZ 252 Dünger oder Ausgangsstoff für Dünger“. Eine Zertifizierung der Aschen ist für eine stoffliche Verwertung als Düngemittel nicht verpflichtend und sie wird nur von wenigen Heizwerken genutzt. Kürzlich wurde zudem das Gütesiegel für „Dolomit-Holzasche-Gemische für die Bodenschutzkalkung“ der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. (DLG) entwickelt. Für die Waldkalkung in Baden-Würt-

Tab. 1. Grenzwerte bzw. Höchstgehalte (in Klammern) für Holzaschen nach der aktuellen DüMV und BioAbfV (TM = bezogen auf die Trockenmasse).

Element	Einheit	aktuelle Grenzwerte		
		DüMV	DüMV (Forst)	BioAbfV
Arsen	mg/kg TM	40	60	-
Blei	mg/kg TM	150	225	150
Cadmium	mg/kg TM	1,5	2,25	1,5
Chrom, gesamt	mg/kg TM	-	-	100
Chrom(VI)	mg/kg TM	2	-	-
Kupfer	mg/kg TM	(900)	(2.000)	100
Nickel	mg/kg TM	80	120	50
Quecksilber	mg/kg TM	1	1,5	1
Thallium	mg/kg TM	1	1,5	0
Zink	mg/kg TM	(5.000)	(5.000)	400
PFT	mg/kg TM	0,1	0,15	-
I-TE Dioxine und dl-PCB	ng WHO-TEQ/kg TM	30	45	-

temberg sind zukünftig nur Waldkalkungsprodukte mit diesem DLG-Gütesiegel zugelassen [29]. Entsprechend wäre eine Zertifizierung nach DLG-Siegel für diesen Verwertungspfad notwendig.

1.2 Untersuchung zu Holzaschen bayerischer Biomasseheiz(kraft)werke

Im Rahmen des TFZ-Forschungsprojekts „AshUse“ (FKZ: G2/KS/17/02) werden die Bandbreite und die Durchschnittswerte für Nähr- und Schadstoffe in Aschen aus bayerischen Biomasseheiz(kraft)werken dargestellt. Hierzu wurden vor allem Rost- und Kesselaschen, aber auch Gemische aus Rost-, Kessel- und Zyklonaschen und reine Zyklonaschen untersucht. Die Verwertung von Rost- und Kesselaschen als Düngemittel bzw. als Ausgangsstoff für Düngemittel ist ein zumindest teilweise schon etablierter Verwertungspfad in Bayern. Eine wichtige Voraussetzung für die Zulassung als Düngemittel ist die Einhaltung der Schwermetallgrenzwerte in der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV) [4] und ggf. die je nach Düngemittel geforderten Mindest-Nährstoffgehalte. Wenn die Asche mit Bioabfall oder Kompost vermischt wird, müssen in bestimmten Fällen zusätzlich die Grenzwerte der Bioabfallverordnung (BioAbfV) [5] eingehalten werden [16]. Tabelle 1 fasst diese Grenzwerte zusammen. Die DüMV enthält darüber hinaus noch Grenzwerte zu organischen Verbindungen (perfluorierte Tenside, Dioxine und dioxinähnliche Stoffe). Diese Verbindungen fehlen üblicherweise in Aschen aus Biomasseheiz(kraft)werken [30] und wurden nicht untersucht.

1.2.1 Material und Methoden

Insgesamt wurden 18 Heizwerke mit einer installierten Feuerungswärmeleistung > 1 MW_{therm} sowie eine Aschesammelstelle mehrerer kleiner Heizwerke für die Beprobung ausgewählt. Die Qualität der

Aschen variierte dabei aufgrund von unterschiedlichen Brennstoffen, Anlagentypen oder Betriebsparametern der Feuerung. An den meisten Standorten wurden reine Rost- und Kesselaschen, an einem Standort wurden zusätzlich Zyklonaschen und in fünf Fällen auch Mischungen aus Rost- und Kesselaschen mit Zyklonaschen beprobt. Insgesamt wurden im Projekt „AshUse“ 50 Ascheproben gewonnen. Je nach Vorgehensweise beim Aschemanagement unterschied sich die Lagerdauer der Rost- und Kesselaschen an den Heizwerken erheblich und reichte von wenigen Tagen bis hin zu mehreren Wochen. Bei zehn Anlagen erfolgte die Probenahme in zwei unterschiedlichen Heizperioden (2018/2019 sowie 2019/2020). Sieben Anlagen und das Aschesammelager wurden nur einmal beprobt. Am TFZ-eigenen Heizwerk wurde über eine gesamte Heizperiode hinweg eine Serie von insgesamt 20 Ascheproben gewonnen (12 × Rost- und Kesselaschen, 8 × Zyklonaschen).

Um aussagekräftige Analysenergebnisse zu erhalten, war es notwendig aus den jeweils an den Heizwerken gelagerten Aschen eine Mischprobe zu erstellen. Die Probenahme erfolgte direkt am Heizwerk gemäß LAGA PN 98 [20] durch einen sachkundigen Probenehmer. Das Mindestvolumen einer Einzelprobe vor Ort und der aus den Einzelproben durch Probenzusammenführung, Homogenisierung und Teilung erstellten Laborprobe ist dabei abhängig von der maximalen Korngröße der Asche und betrug zwischen 0,5 und 10 Liter. Fein gekörnte Aschen haben dabei ein niedrigeres Mindestvolumen als grobkörnige Aschen. Die Mindestanzahl der Einzelproben ergibt sich aus der Grundmenge der gelagerten Rost- und Kesselasche bzw. Zyklonasche. Bis zu einem Volumen von 30 m³ sollen nach LAGA PN 98 beispielsweise mindestens acht Einzelproben gezogen werden.



Bild 1. Probenahme von Rost- und Kesselasche nach LAGA PN 98 [20].

Bei den Probenahmen wurden die Einzelproben fotografisch festgehalten (Bild 1). Um von den Einzelproben zur Laborprobe zu kommen, wurden diese zu einer Gesamtprobe aufgekegelt und mit einer Schaufel gründlich durchmischt. Danach erfolgte eine Vierteilung des Kegels. Zwei gegenüberliegende Kegel wurden verworfen. Die beiden übrigen Viertel wurden erneut zusammengeführt, sorgfältig durchmischt und daraus die Laborprobe gezogen. Jede Probenahme wurde auf einem Probenahmeprotokoll dokumentiert.

Eine Ausnahme hinsichtlich der Probenahme bildete das TFZ-eigene Heizwerk. Hier wurden zwölf Einzelproben der Rost- und Kesselasche durch Mittelwertbildung zu einer theoretischen Mischprobe für die gesamte Heizperiode zusammengefasst.

Alle Proben wurden vom gleichen Labor (Wessling GmbH, Neuried) analysiert. Untersucht wurden zunächst die düngewirksamen Bestandteile in den Aschen. Neben den Makronährstoffen Calcium (Ca), Phosphor (P), Kalium (K) und Schwefel (S) wurden zudem die Gehalte der Mikronährstoffe Kobalt (Co), Eisen (Fe), Mangan (Mn), Molybdän (Mo), Natrium (Na) und Selen (Se) analysiert. Schwermetalluntersuchungen umfassten Arsen (As), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), sowohl als Gesamtgehalt als auch als Chrom(VI), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Quecksilber (Hg), Thallium (Th) und Zink (Zn). Daneben wurden der pH-Wert, der Wassergehalt und der Glühverlust der Aschen gemessen.

1.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Schwermetall- und Nährstoffgehalte der untersuchten Rost- und Kesselaschen sowie der Mischungen aus Rost-, Kessel- und Zyklonasche vorgestellt. Weitere Unterabschnitte um-

fassen die Gegenüberstellung von Rost- und Kesselasche zur Zyklonasche aus dem TFZ-Heizwerk. Abschließend wird betrachtet, welche Düngemitteltypen nach DüMV und BioAbfV mit den erfassten Aschequalitäten erreichbar wären.

1.2.2.1 Qualität der Rost- und Kesselaschen

Die Analyse der Aschen umfasste Schwermetalle, Nährstoffe, pH-Wert, Wassergehalt und Glühverlust. Zunächst werden die Ergebnisse zu den Schwermetallen näher betrachtet. (Bild 2). Je Element sind die Einzelergebnisse als Punktwolke und als

Boxplot mit Minimum und Maximum dargestellt. Die zwölf Ascheproben des TFZ-Heizwerks gehen dabei als gemittelter Einzelwert in die Auswertung ein, um Gewichtungseffekte zu vermeiden. Hierdurch ergibt sich eine Gesamtzahl von $n = 26$ für die Rost- und Kesselaschen. Darüber hinaus wurden die Grenzwerte für landwirtschaftliche und forstliche Anwendung nach DüMV und die Grenzwerte der BioAbfV eingezeichnet (vgl. Bild 2).

Die zulässigen Werte der DüMV werden in einem Fall für Blei (3 %) und in drei Fällen für Cadmium (8 %) überschritten. Diese Überschreitungen gelten sowohl für die ackerbauliche als auch die forstliche Anwendung, obwohl für die forstliche Anwendung ein um 50 % höherer Schwermetallgehalt zulässig ist (Tabelle 1). Für eine Anwendung auf Ackerflächen gilt nach DüMV zudem ein Grenzwert für Chrom(VI) in Höhe von 2,0 mg/kg. Diesen überschreiten 62 % der Rost- und Kesselaschen. Diese Erkenntnis deckt sich mit Untersuchungen des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) [30], die auf häufige Überschreitungen des Chrom(VI)-Grenzwerts bei Rost- und Kesselaschen bei der Holzverbrennung hinweisen. Das LfU empfiehlt bezüglich einer stofflichen Verwertung von Holzaschen v.a. auf Chrom(VI) ein besonderes Augenmerk zu richten. In der BioAbfV gibt es keinen Grenzwert für Chrom(VI). Allerdings sind in der BioAbfV einige der anderen Grenzwerte niedriger als in der DüMV. Bemessen nach BioAbfV werden die Grenzwerte bei Kupfer (19 %, $n = 5$), Nickel (8 %, $n = 2$) und Zink (15 %, $n = 4$) durch einzelne Proben überschritten.

Zehn Heizwerke wurden doppelt beprobt. Nur zwei Heizwerke hielten in beiden Pro-

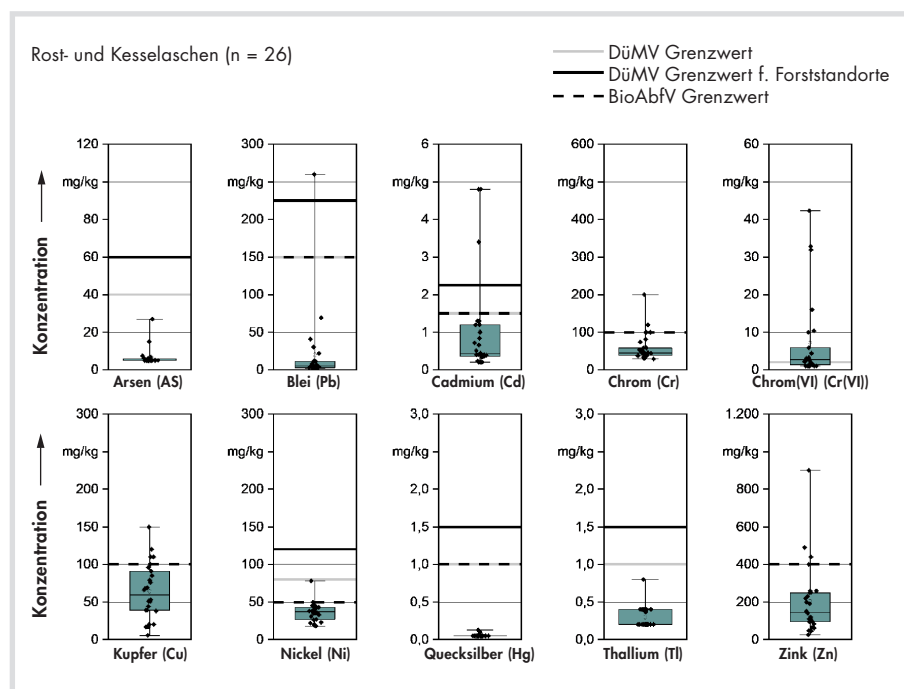


Bild 2. Schwermetallgehalte der 26 Rost- und Kesselaschen als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25 %- und 75 %-Quantil (Box) und Minimum zum Maximum (Whisker). Horizontale Linien geben die jeweiligen Grenzwerte nach DüMV und BioAbfV wieder.

ben den Grenzwert für Chrom(VI) ein. Dabei handelt es sich jeweils um Anlagen mit Nassentaschung, wohingegen alle anderen Anlagen trocken entaschen. Bei den trockenen entaschenden Anlagen überschritt mindestens eine Probe je Heizwerk den Grenzwert für Chrom(VI). Bei drei Anlagen wurde der Grenzwert sogar beide Male überschritten. Dass eine Anfeuchtung von Rostaschen zu verminderten Chrom(VI)-Gehalten führt, deckt sich mit Praxiserfahrungen an Holzheizwerken, wo Holzaschen gezielt befeuchtet wurden, um eine Umwandlung in Chrom(III) zu erzielen [8].

Der Grenzwert für Cadmium wurde von zwei Anlagen überschritten. Dabei kam es bei einer Anlage bei beiden Proben zu einer Überschreitung. Die Betreiber der anderen Anlage stellten hingegen zwischen den beiden Probenahmen eine undichte Stelle in der Rahmenkühlung des Rostes fest. Der dort erfolgte Wassereintritt führte wohl zu einer Abkühlung des Glutbetts und verhinderte somit ein Verdampfen des Cadmiums. Nach Behebung dieses Schadens wurde an dieser Anlage keine Überschreitung des Cadmiumgrenzwertes in der Rost- und Kesselasche mehr festgestellt.

Überschreitungen der Nickel- und Kupfer-Grenzwerte der BioAbfV traten bei doppelt beprobten Heizwerken jeweils nur in einer Probe auf. Der BioAbfV-Grenzwert für Zink wurde bei einem Heizwerk von beiden Proben überschritten. In den drei Ascheproben mit Überschreitungen beim Cadmium wurde zeitgleich auch der BioAbfV-Grenzwert für Zink überschritten. Wie Schilling *et al.* (2020) [31] zeigen, korrelieren sowohl Zink als auch Cadmiumgehalte in Rostaschen negativ mit der Brennraumtemperatur. Das Auftreten von hohen Gehalten dürfte also mit relativ niedrigen Brennraumtemperaturen zusammenhängen.

Insgesamt hielten nur acht der beprobten Rost- und Kesselaschen alle Schwermetallgrenzwerte nach der DüMV und der BioAbfV ein (Tabelle 1). Geht man davon aus, dass sich Chrom(VI) durch geeignete Aufbereitungsmaßnahmen, z.B. durch Anfeuchten der Aschen, ausreichend stark reduzieren lässt [8], halten 85 % der Aschen ($n = 22$) die weiteren Grenzwerte der DüMV ein. Insgesamt 54 % der Aschen ($n = 14$) halten zusätzlich auch die Anforderungen der BioAbfV hinsichtlich der maximal zulässigen Schwermetallkonzentrationen ein.

In Rost- und Kesselaschen ist eine Vielzahl an Nährstoffen enthalten. Die Summe der basisch wirksamen Bestandteile sowie die Einzelwerte für Calcium (berechnet als CaO), Kalium (berechnet als Kaliumoxid K_2O), Magnesium (berechnet als Magnesiumoxid MgO) und Phosphor (berechnet als Phosphat P_2O_5) sind in Bild 3 als Punktwolken sowie als Boxplots dargestellt. Die Gehalte der darüber hinaus enthaltenen Spurennährstoffe und weitere Parameter zeigt Tabelle 2.

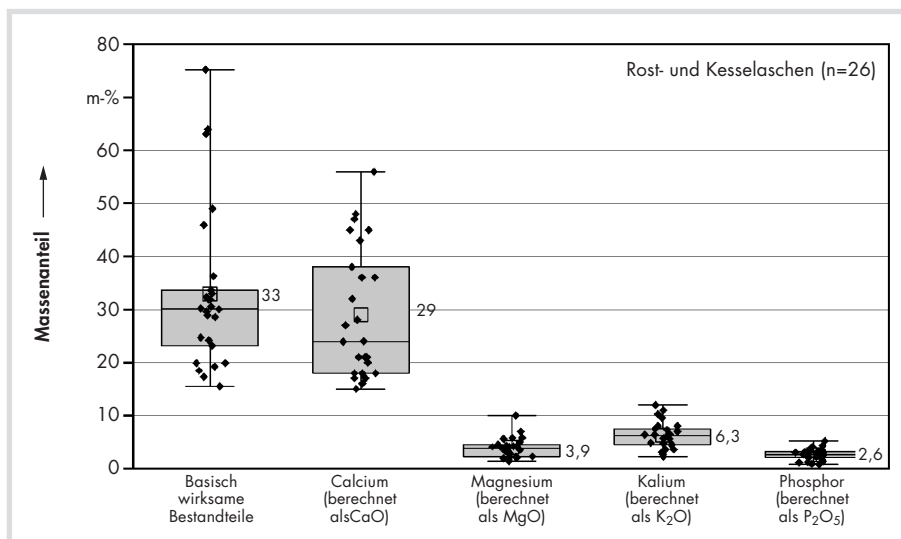


Bild 3. Hauptnährstoffe der 26 Rost- und Kesselaschen (bezogen auf die Trockenmasse) als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25%- und 75%-Quantil (Box) und Minimum zum Maximum (Whisker). Die Zahlen neben den Boxplots sind jeweils die Mittelwerte.

Tab. 2. Analyseergebnisse der Spurennährstoffe und weiterer Parameter von 26 Rost- und Kesselaschen aus bayerischen Biomasseheiz(kraft)werken mit einer installierten Leistung > 1 MW (TM = Trockenmasse).

Parameter	Einheit	Min	1. Quantil	Median	Mittelwert	3. Quantil	Max
Schwefel gesamt (S)	m-% TM	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4
Bor (B)	mg/kg TM	0	92	145	148	195	330
Eisen (Fe)	mg/kg TM	5.000	12.000	14.500	14.057	16.750	26.083
Kobalt (Co)	mg/kg TM	4,1	9,1	12,5	13,0	15,8	28,0
Mangan (Mn)	mg/kg TM	1.000	4.075	12.500	11.772	15.750	40.000
Molybdän (Mo)	mg/kg TM	2,0	2,7	5,0	4,1	5,0	7,0
Natrium (Na)	mg/kg TM	970	2.425	2.750	3.362	4.181	8.000
Selen (Se)	mg/kg TM	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
pH-Wert		12,3	12,7	12,8	12,8	12,8	13,3
Wassergehalt	m-%	0,0	0,0	0,5	6,2	9,9	32,7
Glühverlust	m-% TM	0,0	0,0	0,0	0,6	1,3	3,6

Für CaO, MgO und P_2O_5 liegt die Mehrheit der hier analysierten Rost- und Kesselaschen in dem Bereich, der von Reichle *et al.* (2009) [30] angegeben wird (siehe Kapitel 2.1). Höhere Werte wurden v.a. für Kaliumoxid gemessen. Hier liegt der Mittelwert bei 6,3 m-% TM und 50 % der Analyseergebnisse lagen zwischen 4,5 und 7,5 m-% TM (25 %- und 75 %-Quantil). Obernberger (1997) [26] gibt als Durchschnittswert für den Gehalt von Kaliumoxid in 12 Rostaschen aus der Verbrennung von Holzhackschnitzeln ebenfalls einen höheren Wert als Reichle *et al.* (2009) [30] von 6,7 m-% TM an. Der mittlere Phosphatgehalt liegt bei Obernberger bei 3,6 m-% TM und somit um ca. einen Prozentpunkt höher als in der vorliegenden Untersuchung.

Es zeigt sich somit deutlich, dass die Nährstoffgehalte in Rost- und Kesselaschen aus der Holzverbrennung in einem weiten Wertebereich schwanken können. Analog geht auch der FNR-Leitfaden „Feste Biobrennstoffe“ (2014) [9] für Feuerrau-

maschen aus der Verbrennung von Biomasse von großen Schwankungsbereichen zwischen 0,2 und 14,4 m-% TM für K_2O bzw. zwischen 0,01 und 11,3 %TM für P_2O_5 aus. Die dort genannten Mittelwerte von 6,4 m-% TM für K_2O und 2,6 m-% TM für P_2O_5 passen wiederum gut zu den in Bild 3 wiedergegebenen Werten aus dieser Studie.

Die pH-Werte der untersuchten Aschen variieren zwischen pH 12,3 (Minimum) und pH 13,3 (Maximum) (Tabelle 2). Sie schwanken damit recht eng um den Mittelwert von pH 12,8 und liegen innerhalb der Bandbreite von pH 11 bis pH 13, den Reichle *et al.* (2009) [30] für Holzaschen angeben. Die meisten Aschen waren sehr trocken (Median = 0,5 m-%). Nur die beiden Anlagen mit Nassentaschung heben den mittleren Wassergehalt auf 6,2 m-%. Bei den nass entaschenden Anlagen variierte der Wassergehalt zwischen 21 und 33 m-%.

Die meisten Aschen sind komplett ausgebrannt und weisen einen nur geringen Glühverlust auf. Dieser betrug im Mittel

0,6 m-% und erreichte maximal 3,6 m-%. Damit bleiben alle Aschen unter dem Wert von 5 m-%. Unterhalb eines Glühverlusts von 5 m-% kann davon ausgegangen werden, dass sich keine organischen Schadstoffe in der Asche befinden [30].

1.2.2.2 Verteilung der Elementfrachten zwischen Rostasche und Zyklonasche (TFZ-Heizwerk)

Am hauseigenen Heizwerk des TFZ wurde die Verteilung der Elementfrachten zwischen Rost- und Kesselasche und Zyklonasche untersucht. Dazu wurde an acht Zeitpunkten innerhalb einer Heizperiode jeweils die aktuell anfallende Rostasche sowie die Zyklonasche separat beprobt.

Flüchtige Aschebestandteile wie Arsen-, Cadmium-, Blei-, Zink- und Quecksilberverbindungen verdampfen bei den hohen Temperaturen im Feuerraum [30]. Aus diesem Grund können flüchtige Bestandteile aus dem heißen Glutbett ausgetragen werden und sich durch Kondensation in der Zyklonasche anreichern. Die Folge sind erhöhte Konzentrationen in der Zyklonasche im Vergleich zur Rost- und Kesselasche. Aus dem Datensatz der am TFZ-Heizwerk gewonnen Proben sollte sich dieser Zusammenhang direkt nachprüfen lassen.

Tabelle 3 zeigt die Schwermetall- und Nährstoffkonzentrationen in den Rost- und Kesselaschen im direkten Vergleich mit den dazugehörigen Zyklonaschen. Angegeben sind jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung der acht paarweise gezogenen Proben. Mittelwertpaare, die sich signifikant unterscheiden, sind fett gedruckt. Die Mittelwerte wurden mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test verglichen. An den Stellen, bei denen die Standardabweichung den Wert 0,0 beträgt, haben alle Proben bezüglich dieses Elements die Nachweis- bzw. Bestimmungsgrenze unterschritten. Als Konzentration wurde dann die angegebene Nachweis- bzw. Bestimmungsgrenze verwendet. Für die Elemente Arsen und Quecksilber, die auch in der Zyklonasche mit sehr geringen Konzentrationen vorkommen, kann es aus diesem Grund zu einer Verzerrung bei der Berechnung der Elementfrachten kommen, da durch dieses Vorgehen sowohl in der Rost- und Kesselasche als auch in der Zyklonasche ein ähnlich hoher Wert angenommen werden muss. Tatsächlich ist jedoch anzunehmen, dass der Anteil der beiden leicht flüchtigen Elemente Arsen und Quecksilber in der Zyklonasche höher ist als in der Rost- und Kesselasche. Die Nachweisgrenze der Analyse über das externe Labor lässt diesen Rückschluss jedoch nicht zu.

Die Interpretation der Ergebnisse in Tabelle 3 erfolgt anhand der berechneten absoluten Elementfrachten bezogen auf die Gesamtmasse des jeweiligen Elements in der Asche (Bild 4). Um quantitative Aussagen darüber zu treffen, wie sich die tatsächlichen Frachten der einzelnen Ele-

Tab. 3. Mittlere Schwermetall- und Nährstoffkonzentrationen (inkl. Standardabweichung) in Rost- und Kesselaschen und in den dazugehörigen Zyklonaschen aus acht paarweisen Probenahmen am TFZ-Heizwerk. Signifikant unterschiedliche Mittelwertpaare sind fett gedruckt.

Parameter	Einheit	Rost- und Kesselasche		Zyklonasche	
		Mittelwert	Stdabw.	Mittelwert	Stdabw.
Arsen (As)	mg/kg TM	5,0	0,0	8,7	2,5
Blei (Pb)	mg/kg TM	5,0	0,0	123,3	65,6
Cadmium (Cd)	mg/kg TM	0,5	0,1	56,3	14,7
Chrom (Cr)	mg/kg TM	41,1	7,3	54,4	10,4
Chrom(VI) (Cr(VI))	mg/kg TM	1,9	1,3	2,1	0,7
Kupfer (Cu)	mg/kg TM	32,9	27,8	77,1	20,5
Nickel (Ni)	mg/kg TM	46,0	9,1	51,9	8,7
Quecksilber (Hg)	mg/kg TM	0,1	0,0	0,4	0,2
Thallium (Tl)	mg/kg TM	0,4	0,0	5,5	2,1
Zink (Zn)	mg/kg TM	110	25,4	3.787	788,1
Kalk (CaO)	m-% TM	20,9	5,9	25,3	8,8
Basisch wirks. Stoffe (CaO)	m-% TM	30,7	10,4	40,5	6,1
Phosphat, gesamt (P ₂ O ₅)	m-% TM	3,3	1,8	3,9	1,4
Kaliumoxid ges. (K ₂ O)	m-% TM	10,1	3,3	8,5	3,0
Magnesiumoxid ges. (MgO)	m-% TM	4,0	0,9	5,3	1,1
Schwefel gesamt (S)	m-% TM	0,1	0,0	1,8	0,3
Bor (B)	mg/kg TM	191,3	40,8	435,0	72,6
Eisen (Fe)	mg/kg TM	16.125	3.370	35.125	11.263
Kobalt (Co)	mg/kg TM	20,6	6,5	29,9	13,4
Mangan (Mn)	mg/kg TM	15.850	7.284	24.213	11.097
Molybdän (Mo)	mg/kg TM	2,2	0,2	4,7	0,9
Natrium (Na)	mg/kg TM	4.525	1.253	2.788	491

mente zwischen der Rost- und Kesselasche und der Zyklonasche verteilen, sind zunächst sinnvolle Annahmen zum Massenverhältnis zwischen Rost- und Kesselasche und der dazugehörigen Zyklonasche notwendig. Für Festbettfeuerungen wird üblicherweise ein Anteil von 10 bis 30 m-% Zyklonasche angenommen [9, 13, 25, 39]. Feine Flugaschen werden bei der folgenden Betrachtung nicht berücksichtigt. Der tatsächliche Anteil der Zyklonasche hängt dabei von unterschiedlichen Faktoren ab, beispielsweise von der Turbulenz der Primärluft im Glutbett oder der Feinheit des Brennstoffs, wie ein Vergleich der Aschefractionen aus Holzhackschnitzeln bzw. Sägespänen als Brennstoff zeigt [26]. Mit diesen Annahmen lässt sich aus den acht paarweisen Analysen der Rost- und Kesselasche und der Zyklonasche am TFZ-eigenen Heizwerk ableiten, wie sich die Frachten der Schwermetalle und Nährstoffe zwischen den Aschefractionen aufteilen. In Bild 4 sind neben dem 1:1 Mischungsverhältnis (unterstes Säulendiagramm) die Aufteilung der Frachten bei 10 m-%, 20 m-% und 30 m-% Zyklonasche an der Gesamtasche dargestellt.

Schwermetallverbindungen, die Blei, Cadmium, Thallium, Quecksilber und Zink enthalten, sind leicht flüchtig und finden sich in allen Berechnungen zum überwiegenden Teil in der Zyklonasche wieder.

Beispielsweise reichert sich Cadmium auch beim als niedrigsten angenommenen Zyklonascheanteil von 10 m-% an der Gesamtasche mit bis zu 93 m-% in der Zyklonasche an. Arsen ist ebenfalls leicht flüchtig. Weil aber die Konzentrationen in Rost- und Zyklonasche insgesamt sehr niedrig waren und daher häufig die Nachweis- bzw. Bestimmungsgrenze als Konzentration in den Aschefractionen eingesetzt werden musste, errechnen sich überhöhte Rost- und Kesselascheanteile für dieses Element. Sollten bei leicht flüchtigen Elementen hohe Konzentrationen in der Rost- und Kesselasche beobachtet und eine Verwertung als Düngemittel infrage gestellt werden, könnte eine Erhöhung der Temperatur im Glutbett eine Verminderung der Gehalte bringen. Kupfer, Chrom und Nickel sind schwerer flüchtig und finden sich, je nach Berechnung, nur zu 11 bis 50 m-% in der Zyklonasche wieder. Sie verbleiben somit überwiegend in der Rost- und Kesselasche. Obernberger (1997) [27] zeigt für Holzhackschnitzel grundsätzlich ähnliche Verhältnisse zwischen Rost- und Kesselasche und Zyklonasche. Allerdings sind die berichteten Konzentrationsanteile in der Zyklonasche durchweg etwas niedriger als am TFZ (Ausnahmen sind K und P), was an unterschiedlichen Feuerraum- und Zyklonatemperaturen der von Obernberger untersuchten Heizwerke liegen kann. Die Feuer-

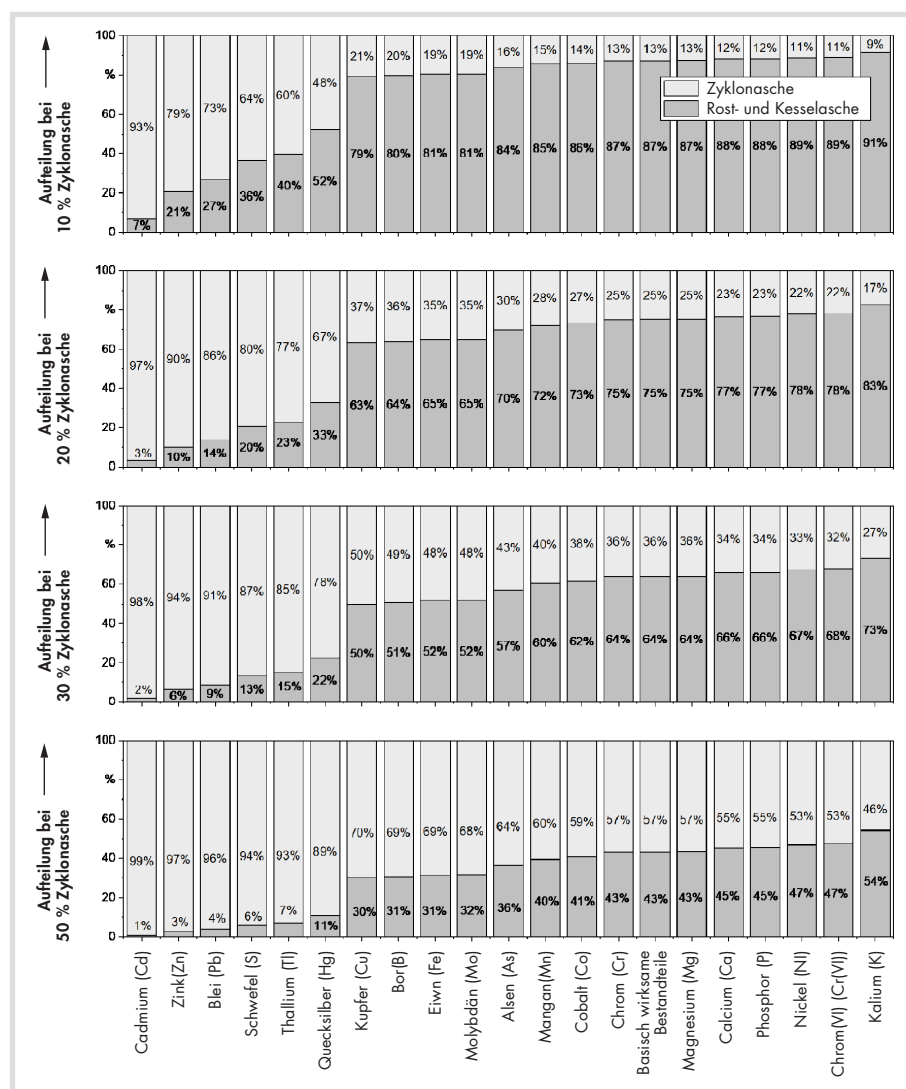


Bild 4. Verhältnis der Elementfrachten in Rost- und Kesselasche und Zyklonasche des TFZ-Heizwerks bei hypothetischen Mischungsverhältnissen mit Zyklonascheanteilen von 10 m-%, 20 m-%, 30 m-% und 50 m-%.

raumtemperaturen nahe dem Glutbett sind für das TFZ-Heizwerk nicht bekannt.

1.2.2.3 Qualität von Mischungen aus Rost- und Kesselasche mit Zyklonasche

In einigen Heizwerken wird die Rost- und Kesselasche und die Zyklonasche bauartbedingt in einem gemeinsamen Behälter gesammelt. Alle fünf Proben dieser Mischungen überschreiten den DüMV-Grenzwert für Cadmium. Weitere Überschreitungen traten bei Chrom(VI) ($n = 4$), Thallium ($n = 1$) und Blei ($n = 1$) auf. Diese Ergebnisse machen deutlich, dass für Biomasseheiz(kraft)werke, die naturbelassenes Holz einsetzen, eine getrennte Sammlung von Rost- und Kesselasche und von Zyklonasche empfehlenswert ist, wenn eine Verwendung der Rost- und Kesselasche zu Düngezwecken angestrebt wird.

In speziellen Fällen – beispielsweise bei der Verfeuerung von Agrarbrennstoffen wie Stroh – kann ein Gemisch aus Rost- und Kesselasche und Zyklonasche die Grenzwerte der DüMV dagegen häufig einhalten

[2]. Dies liegt an den i.d.R. geringeren Schwermetallgehalten der Agrarbrennstoffe im Vergleich zu Holzbrennstoffen.

1.2.2.4 Verwertbarkeit der untersuchten Aschen auf landwirtschaftlichen, forstlichen und sonstigen Flächen

Holzaschen aus der Verbrennung von unbehandeltem Holz können zur Nutzung ihres Nährstoffgehaltes auf landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzten Flächen zur Düngung eingesetzt werden [30]. Weiter können die Aschen Komposten zugesetzt oder im Wald, z.B. im Rahmen der Bodenschutzkalkung verwertet werden. Um als Düngemittel oder als Ausgangsstoff für die Düngemittelproduktion zugelassen werden zu können, müssen die Aschen zunächst die in der Düngemittelverordnung festgelegten Schwermetallgrenzwerte einhalten (DüMV Anlage 2, Tab. 1.4, Sp. 4). Bei der Vermischung mit Kompost bzw. Bioabfall können zusätzlich die Grenzwerte der BioAbfV zur Anwendung kommen [16]. Für den Einsatz als Düngemittel sind Rost- und Kessela-

schen zugelassen. Zyklonaschen sind dann zulässig, wenn es sich beim Zyklon nicht um die letzte filternde Einheit handelt. Sind für einen Düngemitteltyp Mindestnährstoffgehalte vorgeschrieben, so sind diese einzuhalten. Zum Inverkehrbringen von Aschen als Düngemittel sind weitere Anforderungen zu erfüllen, die beispielsweise im Merkblatt zur „Verwertung und Beseitigung von Holzaschen“ des LfU (2009) [30] zu entnehmen sind.

Die nachfolgende Beurteilung der in diesem Kapitel untersuchten Aschen beruht nur auf deren Schwermetall- und Nährstoffgehalten. Weiterführende Vorschriften, beispielsweise die Düngerverordnung (DüV) werden nicht beachtet.

1.2.2.4.1 Rost- und Kesselaschen

Bei 62 % der Rost- und Kesselaschen treten Chrom(VI)-Gehalte über dem Grenzwert der DüMV für ackerbauliche Anwendung auf. Durch eine geeignete Ascheaufbereitung lässt sich Cr(VI) meist in das unschädliche Cr(III) überführen. Sieht man von der Cr(VI)-Belastung ab, überschreiten 4 % der Rost- und Kesselaschen den DüMV-Grenzwert für Blei und 12 % den Grenzwert für Cadmium. Insgesamt würden somit 85 % der Rost- und Kesselaschen die Grenzwerte der DüMV (ohne Cr(VI)) einhalten. Die nachfolgende Einordnung nach möglichen Düngemitteltypen erfolgt nur für diese Aschen. Die jeweiligen Prozentangaben beziehen sich dagegen auf alle beprobten Rost- und Kesselaschen.

Die Aschen, die außer Chrom(VI) keine weiteren Grenzwerte der DüMV überschreiten, enthalten alle mehr als 15 m-% TM CaO und erreichen damit die Voraussetzung für einen „Kalkdünger aus Asche aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe“ (DüMV Anlage 1, Abschnitt 1.4.6 i. V. mit Anlage 2 Tab. 6.4, Z. 6.4.11). Ein in Bayern und Baden-Württemberg etablierter Verwertungspfad besteht in der Vermischung von Aschen dieser Qualität mit Kalk- bzw. Kalkdolomit zu „Kohlensaurem Kalk“ (DüMV Anlage 1, Abschnitt 1.4.1 i.V. mit Anlage 2, Tab. 7.3, Z. 7.3.16). Der Ascheanteil darf dabei 30 m-% nicht überschreiten. Theoretisch wäre auch eine Vermischung dieses Kalkdüngers aus Asche mit Bioabfall möglich. Allerdings wären dann Mindestnährstoffgehalte im fertigen Produkt in Höhe von 3 m-% N, 3 m-% P_2O_5 oder 3 m-% K_2O in der Trockenmasse einzuhalten (DüMV Anlage 1 Nr. 3.2 Spalte 6). Diese Gehalte werden nach Einschätzung von Kehres (2016) [16] von Mischungen aus Rost- und Kesselasche und Bioabfall in der Regel nicht erreicht.

Für einen Großteil der Rost- und Kesselaschen (69 %) wäre die Einordnung als „PK-Dünger aus Asche aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe“ möglich, da mindestens 2 m-% P_2O_5 und 3 m-% K_2O in ihrer Trockenmasse enthalten sind (DüMV Anlage 1, Abschnitt 2.3 i.V. mit Anlage 2 Tab. 7.3., Z. 7.3.16).

Vier der Aschen (entspricht ca. 15 %) enthalten Kaliumoxidgehalte von mindestens 10 m-% TM und würden damit die Anforderung an einen „Kaliumdünger aus Asche der Verbrennung pflanzlicher Stoffe“ (DüMV Anlage 1, Abschnitt 1.3.4 i.V. mit Anlage 2 Tab. 6.3., Z. 6.3.3) erfüllen.

Holzaschen können auch in der Kompostierung eingesetzt werden. Sollen die entstehenden „organisch-mineralischen Düngemittel“ nach Anlage 1 Abschnitt 3.2 DüMV auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht werden, müssen zusätzlich die Grenzwerte der BioAbfV eingehalten werden. Unter Berücksichtigung der Überschreitungen bei Chrom(VI) nach der DüMV, halten insgesamt noch 54 % der untersuchten Rost- und Kesselaschen auch die Grenzwerte der BioAbfV ein. Die Grenzwerte der BioAbfV müssen allerdings nicht eingehalten werden, wenn die Aufbringung auf Flächen erfolgt, für die die BioAbfV nicht zur Anwendung kommt, so etwa im Garten- und Landschaftsbau oder wenn aus der Mischung aus Asche und Kompost Substrate oder Oberbodenmaterialien hergestellt werden [16]. Dieser letztgenannte Verwertungspfad wäre somit für 85 % der untersuchten Rost- und Kesselaschen möglich, solange eine Reduzierung des Chrom(VI)-Gehalts vorausgesetzt werden kann.

1.2.2.4.2 Mischungen aus Rost- und Kesselasche mit Zyklonasche

Von den mit Zyklonasche vermischten Rost- und Kesselaschen kann keine die Anforderungen hinsichtlich der Schwermetallgrenzwerte der DüMV oder der BioAbfV erfüllen. Sie kommen daher als Ausgangsstoff für Düngemittel nicht infrage. Diese Aschen sind somit von einer Ausbringung auf land- und forstwirtschaftlichen Flächen ausgeschlossen. Bei einer angestrebten Verwertung von Rost- und Kesselaschen ist daher eine getrennte Sammlung dieser Aschefractionen und eine separate Weiterverwendung zu empfehlen.

1.2.3 Ausblick

Bei der energetischen Nutzung von naturbelassenem Holz in Biomasseheiz(kraft)werken fallen Verbrennungsrückstände in Form von Asche an. Die verstärkte Nutzung von Nebenprodukten und Reststoffen trägt zur Schonung der natürlichen Ressourcen bei. Es hat sich gezeigt, dass die anfallenden Rost- und Kesselaschen für eine Verwertung als Düngemittel oder Ausgangsstoff für Düngemittel grundsätzlich in Frage kommen. Entscheidend ist jedoch eine Qualitätssicherung der Aschen und die Beachtung der relevanten gesetzlichen Vorgaben.

Wie eine ebenfalls im Rahmen des Projekts „AshUse“ durchgeführte Umfrage gezeigt hat, bestehen aus Sicht der Heizwerkbetreiber die Herausforderungen bei der Umsetzung einer stofflichen Verwertung u.a. in rechtlichen Unsicherheiten, schwanken-

den Aschequalitäten und geringen wirtschaftlichen Erlösen. Häufig fehlt es auf Betreiberseite zudem am Wissen zu Qualitätsmanagementstrategien, beispielsweise wie eine definierte Aschequalität zuverlässig eingehalten und nachgewiesen werden kann [1]. Die geplanten weiterführenden Arbeiten am TFZ werden daher auf den Bereich Qualitätsmanagement bei der Erzeugung von Holzaschen am Biomasseheiz(kraft)werk fokussieren.

Quellenverzeichnis

- [1] Bachmaier, H.; Kuptz, D.; Hartmann, H. (2019): *Ash Management at Biomass Heating Plants in Southern Germany*. In: Carvalho, M. d. G.; Scarlat, N.; Grassi, A.; Helm, P. (Hrsg.): *Setting the course for a biobased economy – Papers of the 27th European Biomass Conference*. Extracted from the Proceedings of the International Conference. Lisbon, Portugal, 27-30 May. Florence, Munich: ETA-Florence Renewable Energies; WIP – Renewable Energies, S. 1814-1817.
- [2] Bischof, R. (2020): *Eignung von Biomasseaschen zur Nährstoffversorgung im Pflanzenbau*. Vortrag beim 2. Fachgespräch Biomasseaschen am 5.3.2020. Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum TLLR, 23 Seiten.
- [3] Bohrn, G.; Stampfer, K. (2014): *Untreated wood ash as a structural stabilizing material in forest roads*. In: Österreichischer Biomasse-Verband (ÖBV) (Hrsg.): *Tagungsband der 4. Mitteleuropäische Biomassekonferenz*. Graz, 15. bis 18. Jänner 2014. Wien: Österreichischer Biomasse-Verband (ÖBV) S. 1-16.
- [4] Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) (2017): *Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln*. Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305) geändert worden ist. Düngemittelverordnung – DüMV, in der Fassung vom 1. Juni 2017. In: Bundesgesetzblatt, Teil I, Jg. 68, Nr. 32, S. 1305-1349.
- [5] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMELF); Bundesministerium für Gesundheit (BMG) (2012): *Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden*. Bioabfallverordnung – BioAbfV, in der Fassung vom 1. August 2012. Quelle: *Vorschriftensammlung der Gewerbeaufsicht Baden-Württemberg*, Version 02/2012, S. 1-58.
- [6] Bundesverband Mineralischer Rohstoffe e.V. (MIRO) (2019): *Deutscher Nachhaltigkeitspreis 2019 – Preisträger und Projekte. Die deutsche Gesteinsindustrie – modern, effizient, nachhaltig*. Stand: 29.03.2019. Bundesverband Mineralischer Rohstoffe e.V. (MIRO) (Hrsg.). (Mitarb.): Rese, F. Duisburg, 39 Seiten.
- [7] Dietz, E.; Kuptz, D.; Blum, U.; Schulmeyer, F.; Borchert, H.; Hartmann, H. (2016): *Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern. Gehalte ausgewählter Elemente, Heizwert und Aschegehalt*. Straubing, Freising-Weihenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF). Berichte aus dem TFZ, Nr. 46, 141 Seiten, ISSN 1614-1008.
- [8] Eberl, G. (2018): *Veränderung von Chrom(VI)-Gehalten in Holzaschen durch Bewässerung*. Vortrag auf dem 21. Österreichischen Biomassetag von 6. bis 7. November 2018 in Kufstein, 14 Seiten.
- [9] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2014): *Leitfaden Feste Biobrennstoffe. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen im mittleren und großen Leistungsbereich*. Förderkennzeichen (FKZ) 22002410. 4., vollst. überarb. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 208 Seiten, ISBN 9783000153891.
- [10] Gößwein, S.; Hiendlmeier, S. (2018): *Energieholzmarkt Bayern 2016. Untersuchung des Energieholzmarktes in Bayern hinsichtlich Aufkommen und Verbrauch*. Abschlussbericht 05/2018 (Mai 2018). Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (Hrsg.). Freising, 131 Seiten.
- [11] Hansen, M. T. (2019): *Options for increased use of ash from biomass combustion*. Vortrag auf dem Biomass Ash Workshop am 25.3.2019 in Kopenhagen, 17 Seiten.
- [12] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2016): *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 3., aktual. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 1755 Seiten, ISBN 978-3-662-47437-2.
- [13] Katzensteiner, K.; Holzner, H.; Obernberger, I. (2011): *Richtlinien für den sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen zur Verwertung auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen*. 1. Aufl. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.). Wien: Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz, 74 Seiten.
- [14] Kebli, H.; Maltas, A.; Sinaj, S. (2017): *Landwirtschaftliches Potenzial von Asche aus rezykliertem Holz*. Agrarforschung Schweiz, Jg. 8, Nr. 1, S. 30-37.
- [15] Kehres, B. (2013): *Verwertung von Holzaschen auf Flächen*. 08.03.2013. 2., überarb. Fassung. Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. (Hrsg.). Köln-Gremberghoven. BGK Thema Information, 14 Seiten.
- [16] Kehres, B. (2013): *Zumischung von Holzasche bei der Kompostierung*. In: Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. (Hrsg.): *Humuswirtschaft & Kompost*. Köln-Gremberghoven, H & K Aktuell, Nr. 8 (Jahrgang), Ausgabe 4 vom 08.04.2013, S. 1-3.
- [17] Korpilähti, K. (2019): *The development in the use of ashes in Finland*. Vortrag auf dem Biomass Ash Workshop am 25.3.2019 in Kopenhagen, 22 Seiten.
- [18] Kuchler, C.; Zimmermann, D.; Kuptz, D.; Dietz, E.; Rist, E.; Riebler, M.; Schön, C.; Mack, R.; Blum, U.; Borchert, H.; Hartmann, H. (2019): *Contamination of wood chips with mineral soils – fuel quality and combustion behaviour*. Proceedings of the 52nd International Symposium on Forestry Mechanization (FORMEC). Sopron, Ungarn / Forchtenstein, Österreich, 6 bis 9 Oktober. Sopron: University of Sopron Press, S. 320-329.

- [19] Lahtinen, P. (2014): *Utilization of biomass ashes in infrastructure construction in Finland*. Vortrag auf der 4. Central European Biomass Conference von 15. bis 18.01.2014 in Graz, 36 Seiten.
- [20] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (2019): *LAGA PN 98 – Grundregeln für die Entnahme von Proben aus festen und stichfesten Abfällen sowie abgelagerten Materialien Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen*. Stand: Mai 2019. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), www.laga-online.de, 69 Seiten.
- [21] Lanzerstorfer, C. (2017): *Grate-fired biomass combustion plants using forest residues as fuel*. Enrichment factors for components in the fly ash. Waste and Biomass Valorization, Nr. 8 (1), S. 235-240.
- [22] Lienemann, P.; Vock, W. (2013): *Elementgehalt in Holzaschen und Validierung der Holzaschenkontrolle*. Projekt-Schlussbericht. 12. Dezember 2013. Wädenswil: Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), Institut für Chemie und Biologische Chemie, 96 Seiten.
- [23] Lövgren, L. (2014): *Roll pelletizing of ash*. In: Österreichischer Biomasse-Verband (ÖBV) (Hrsg.): Tagungsband der 4. Mitteleuropäische Biomassekonferenz. Graz, 15. bis 18. Jänner 2014. Wien: Österreichischer Biomasse-Verband (ÖBV).
- [24] Maltas, A.; Sinaj, S. (2014): *Holzäsche: ein neuer Dünger für die Landwirtschaft*. Agrarforschung Schweiz, Jg. 5, Nr. 6, S. 232-239.
- [25] Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (2003): *Schadstoffströme bei der Entsorgung von Holzäsche. Schadstoffströme bei der Verbrennung naturbelassener Hölzer und holzartiger Biomassen im Hinblick auf die Ascheentsorgung*. Stand: März 2003. Stuttgart. Reihe Abfall, Nr. 76, 79 Seiten.
- [26] Obernberger, I. (1997): *Aschen aus Biomassefeuerungen – Zusammensetzung und Verwertung*. In: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI) (Hrsg.): Thermische Biomassenutzung – Technik und Realisierung. Internationale Tagung. Salzburg, 23.-24. April. VDI-Berichte, Nr. 1319. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 199-222 ISBN 3-18-0913 19-3.
- [27] Obernberger, I.; Höfer, I.; Hülsmann, T.; Kaltschmitt, M. (2016): *Feste Verbrennungsrückstände und deren Verwertung*. In: Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3. Aufl. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer-Verlag, S. 778-797.
- [28] Obernberger, I.; Supancic, K. (2015): *Fact-Sheet: Einsatz von Holzäsche als Bindemittel zur Bodenstabilisierung z.B. im Straßenbau*. FFG-Branchenprojekt „Entwicklung von innovativen Verfahren zur Holzäscheverwertung“. Fachverband der Holzindustrie Österreichs (Hrsg.). Wien, Graz: BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, 8 Seiten.
- [29] Puhlmann, H.; Hartmann, P. (2020): *Einsatz und Qualitätssicherung bei der Bodenschutzalkung im Wald – Erfahrungen aus Baden-Württemberg*. Vortrag beim 2. Fachgespräch Biomasseaschen am 5.3.2020. Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum TLLRL, 18 Seiten.
- [30] Reichle, E.; Müller, R.; Schmoedel, G.; Müller, C.; Wendland, M.; Geiger, H.; Stetter, U.; Zormaier, F. (2009): *Verwertung und Beseitigung von Holzaschen. Merkblatt. Stand: 01.08.2009*. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.). Augsburg, 19 Seiten.
- [31] Schilling, S.; Wilpert, K., v. (2020): *Steuerungsmöglichkeiten für die Qualität von Holzäsche*. Vortrag auf dem 20. Fachkongress Holzenergie vom 22.-30. September 2020, 17 Seiten.
- [32] Schrägle, R. (2012): *Innovative Ansätze und Perspektiven der Verwertung von Holzaschen*. In: Bundesverband BioEnergie e. V. (BBE) (Hrsg.): IHE HolzEnergie. 12. Internationaler BBE-Fachkongress für Holzenergie. Messe Augsburg, 27.-28.09.2012, Bonn: Bundesverband BioEnergie e. V. (BBE), S. 1-41.
- [33] Stetter, U.; Zormaier, F. (2010): *Verwertung und Beseitigung von Holzaschen*. Neues LfU-Merkblatt greift altes Thema auf. LWF aktuell 74, S. 28-30.
- [34] Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) (2020): *FRED Feste Regenerative Energieträger Datenbank*. Straubing: Technologie- und Förderzentrum (TFZ), www.fred.bayern.de/.
- [35] Van Ejik, R. J.; Obernberger, I.; Supancic, K. (2011): *Options for increased utilization of ash from biomass combustion and co-firing*. IEA Bioenergy Task 32 Deliverable D4. Arnhem: KEMA, 35 Seiten.
- [36] Walter, B.; Mostbauer, P.; Karigl, B. (2016): *Biomasse-Aschenströme in Österreich*. Wien: Umweltbundesamt GmbH. Umweltbundesamt – Report, Nr. REP-0561, 56 Seiten.
- [37] Wilpert, K. v. (2016): *Begründung, Technik und Wirkung der Bodenschutzalkung*. Stand: 08.04.2016. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) (Hrsg.). URL: https://www.waldwissen.net/wald/boden/fva_bodenschutzalkung/index_DE/printerfriendly?4, 4 Seiten.
- [38] Wilpert, K. v.; Bösch, B.; Bastian, P.; Zirlewagen, D.; Hepperle, F.; Holzmann, S.; Puhlmann, H.; Schäffer, J.; Kändler, G.; Sauter, U. H. (2011): *Biomasse-Aufkommensprognose und Kreislaufkonzept für den Einsatz von Holzaschen in der Bodenschutzalkung in Oberschwaben*. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA), Abteilung Boden und Umwelt, Freiburger Forstliche Berichte Heft 87, 167 Seiten.
- [39] Zimmermann, S.; Hässig, J.; Landolt, W. (2010): *Literaturreview Holzäsche – Wald. Nährstoffzug durch Holzernte, abiotische und biotische Wirkungen*. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Stand: 26. März 2010. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), 80 Seiten.

VGB-Standard

Maßnahmen zur Verminderung von Abzehrungen in abfall- und biomassegefeuerten Dampferzeugern

Ausgabe 2018 – VGB-S-205-00-2018-04-DE

DIN A4, 160 Pages, Preis für VGB-Mitglieder € 180.–, für Nichtmitglieder € 270.–, + Versandkosten und MwSt.

Die Gegebenheiten bei der Abfall- und Biomasseverbrennung, insbesondere die inhomogene Beschaffenheit des „Brennstoffs“ Abfall, haben in Verbindung mit den gesetzlichen Vorgaben und Maßnahmen zur effizienten Energienutzung zur Folge, dass in praktisch allen abfall- und biomassegefeuerten Dampferzeugern Heizflächenabzehrungen auftreten.

Die in den letzten dreißig Jahren gesammelten wissenschaftlichen Erkenntnisse und Betriebserfahrungen, sowie der Erfahrungsaustausch im VGB-Arbeitskreis „Thermische Abfallverwertung“ haben wesentlich dazu beigetragen, dass das Ausmaß dieser Abzehrungen durch Maßnahmen bei der Planung, Konstruktion und Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen minimiert werden konnten.

Der vorliegende VGB-Standard stellt eine vollständige Neuerstellung dar. Basierend auf dem Stand der Technik und den Erfahrungen der genannten Autoren, mit besonderem Dank an Dr. Wolfgang Spiegel für die Bereitstellung zahlreicher Bilddokumente, sind die aktuellen Erkenntnisse und Betriebserfahrungen in dem vorliegenden Merkblatt wiedergegeben.

Der VGB-Standard soll insbesondere auch einem jüngeren Personenkreis, der infolge der verstärkten Bemühungen um den Ressourcen- und Umweltschutz vor die Aufgabe gestellt ist, sich mit den besonderen Aufgabenstellungen der Abfallverbrennung zu befassen, in die Lage versetzen, aus den bisher gemachten Erfahrungen Nutzen zu ziehen. Hierbei muss besonderes Augenmerk auf eine sinnvolle Balance zwischen dem technischen und betriebswirtschaftlichen Nutzen und wünschenswerten Umwelt- und Ressourcenschutzziele gelegt werden.

