

72

Berichte aus dem TFZ

# Stoffliche Nutzung von Biomasseaschen als Baustein der Bioökonomie





# **Stoffliche Nutzung von Biomasseaschen als Baustein der Bioökonomie**





# **Stoffliche Nutzung von Biomasseaschen als Baustein der Bioökonomie**

Autoren

Dr. Hans Bachmaier  
Dr. Daniel Kuptz  
Dr. Hans Hartmann

**Berichte aus dem TFZ 72**

**Straubing, Juni 2021**

**Titel:** Stoffliche Nutzung von Biomasseaschen als Baustein der Bioökonomie

**Autoren:** Dr. Hans Bachmaier  
Dr. Daniel Kuptz  
Dr. Hans Hartmann

**Mitarbeiter:** Franz Heimler

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) unter dem Förderkennzeichen G2/KS/17/02 gefördert. Die Projektlaufzeit ging vom 01.02.2018 bis zum 31.07.2020. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2021 Technologie- und Förderzentrum  
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Alle Rechte vorbehalten.

Kein Teil dieses Werks darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

Unter Verwendung mineralölfreier Druckfarben (Mineralölanteil < 1 %) gedruckt auf chlorfreiem Papier aus nachhaltiger, zertifizierter Waldbewirtschaftung.

**ISSN:** 1614-1008

**Hrsg.:** Technologie- und Förderzentrum  
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)  
Schulgasse 18, 94315 Straubing

**E-Mail:** [poststelle@tfz.bayern.de](mailto:poststelle@tfz.bayern.de)  
**Internet:** [www.tfz.bayern.de](http://www.tfz.bayern.de)

**Redaktion:** Hans Bachmaier, Daniel Kuptz, Hans Hartmann, Anna Grundner  
**Verlag:** Eigenverlag, Straubing  
**Erscheinungsort:** Straubing  
**Erscheinungsjahr:** 2021  
**Gestaltung:** Hans Bachmaier, Daniel Kuptz

**Fotonachweis:** TFZ

## Danksagung

Der vorliegende Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Stoffliche Nutzung von Biomasseaschen als Baustein der Bioökonomie (AshUse)“ umfasst die Ergebnisse mehrerer Untersuchungen, die über den Zeitraum von über zwei Jahren durch das Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) durchgeführt wurden.

Besonderer Dank gilt

- den Betreibern bayerischer Biomasseheiz(kraft)werke, die das Projekt im Rahmen der Umfrage (Kapitel 6) und bei der Entnahme von Holzascheprobe(n)en (Kapitel 7) unterstützt haben,
- den Kolleginnen und Kollegen der TFZ-Abteilung „Rohstoffpflanzen und Stoffflüsse“, dabei vor allem Herrn Franz Heimler, für die tatkräftige Unterstützung und den Wissensaustausch zu dem Gefäßversuch aus Kapitel 8 sowie
- allen Netzwerkpartnern für den fachlichen Austausch zum Thema Holzasche.

Die Studie wurde durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) unter dem Förderkennzeichen G2/KS/17/02 gefördert.



## Abstract (deutsch)

Ziele des Projekts „AshUse“ waren Identifikation, Erprobung und Bewertung innovativer und praxisrelevanter Verwertungsmöglichkeiten von Aschen aus der Verbrennung von Biomasse. Der Fokus lag dabei auf der stofflichen Verwertung im Hinblick auf die Bayerische Bioökonomiestrategie. Die jährlich in Bayern anfallende Aschemenge, die für eine stoffliche Verwertung relevant sein könnte, wurde auf Basis der in Bayern eingesetzten Energieholzmenge ermittelt. Je nach Berechnung ergibt sich somit ein theoretisches jährliches Potenzial von 30.000 bis 60.000 t an Asche (v. a. Rost- und Kesselasche), das für eine stoffliche Verwertung interessant ist (Bezugsjahr 2018). Um den Status quo der Aschenutzung in Bayern zu ermitteln, wurde u. a. eine Umfrage zum Aschemanagement bayerischer Biomasseheiz(kraft)werke durchgeführt. Die durchschnittliche Brennstoffzusammensetzung variiert zwischen den Leistungsklassen. Während die Anlagen der unteren Leistungsklassen ( $\leq 2,5$  MW) vorwiegend Nadelholzhackschnitzel, Sägewerksnebenprodukte (ohne Rinde), Hartholzhackschnitzel und Pellets einsetzen, dominiert bei Anlagen mit einer thermischen Leistung ab 2,5 MW Landschaftspflegematerial. Vor allem im Leistungsbereich  $< 15$  MW wird ein Großteil der Aschen über Deponien entsorgt. Herausforderungen bei der Umsetzung einer stofflichen Verwertung sind laut der Umfrage u. a. in rechtlichen Unsicherheiten, schwankenden Aschequalitäten und in erwarteten geringen wirtschaftlichen Erlösen zu sehen. Häufig fehlt es auf Betreiberseite zudem an Wissen zu Qualitätsmanagementstrategien, beispielsweise wie eine definierte Aschequalität zuverlässig eingehalten und nachgewiesen werden kann. Durch gezielte Probenahme vor Ort wurden die Bandbreite und die Durchschnittswerte von Nähr- und Schadstoffen in Holzaschen bayerischer Biomasseheiz(kraft)werke ermittelt. In 30 % der Fälle konnten die Schwermetallgrenzwerte der Düngemittelverordnung in den beprobten Rost- und Kesselaschen direkt eingehalten werden. Sowohl beim Chrom(VI)-Wert, als auch bei Cadmium und Blei kam es teilweise zu Überschreitungen der Grenzwerte (Chrom(VI): 62 %, Cadmium: 12 %, Blei: 4 %). Sollte der Chrom(VI)-Wert durch eine geeignete Aufbereitung, beispielsweise durch Anfeuchten der Aschen, reduziert werden, würden 85 % der Rost- und Kesselaschen die Grenzwerte der DüMV einhalten. Wegen der verbleibenden 15 % beanstandeten Aschen ist aber eine generelle vollständige stoffliche Verwertbarkeit von Holzaschen, beispielsweise als Düngemittel in der Landwirtschaft, ohne ein vorgeschaltetes Aschequalitätsmanagement kritisch zu hinterfragen. Die Analyse der Hauptnährstoffe ergab neben Kalium- und Calciumgehalten auch relevante Mengen an Phosphor in den Holzaschen, wodurch diese bei Einhaltung der Grenzwerte nach der DüMV u. a. für den ökologischen Landbau als Düngemittel interessant sein dürften. Zur Ermittlung der Düngewirkung von Holzaschen wurde am TFZ ein Gefäßversuch mit Ackerkulturen (Mais, Ackerbohne) durchgeführt. Als Düngemittel kamen drei Holzaschen und zwei Kalkdünger (Brantkalk, Mischkalk) zum Einsatz. Insgesamt wurden 252 Pflanzgefäße angelegt. In Bonituren konnte eine signifikante Verbesserung in der auf einen Phosphormangel hinweisenden Rotfärbung (Mais), in der Pflanzenlänge (Mais), in der Wuchshöhe (Ackerbohne) und im Trockenmasseertrag bei einer Düngung mit Holzasche, verglichen mit Kalk, nachgewiesen werden.

## Abstract (englisch)

The aim of the “AshUse” project was to identify, test and evaluate innovative and practical recycling options for ashes from the combustion of biomass. The focus is on material recycling with regard to the Bavarian Bioeconomy Strategy. The amount of ash produced annually in Bavaria that could be relevant for material recycling was determined based on the amount of energy wood used in Bavaria. Depending on the calculation, this resulted in a theoretical annual potential of 30,000 to 60,000 t of ash (primarily bottom ash), that would be available for material recycling (reference year 2018). To determine the status quo of ash use in Bavaria, a survey was conducted on the ash management of Bavarian biomass heating (power) plants. The average fuel composition of these plants varies in respect to their installed thermal power. While plants with a thermal capacity lower than 2.5 MW mainly use softwood chips, sawmill by-products (without bark), hardwood chips and pellets, plants with a thermal output of 2.5 MW or above predominately use landscape conservation material. Especially in the power range below 15 MW, a large part of the ash is disposed of in landfills. According to the survey, challenges in the implementation of recycling include legal uncertainties, fluctuating ash qualities and low expected economic revenues. Operators often lack knowledge about quality management strategies, for example how to reliably maintain and verify a defined ash quality. The range and average values of nutrients and pollutants in wood ashes from Bavarian biomass heating (and power) plants were determined by sampling on site. In 30 % of the cases, the sampled bottom ashes complied with the heavy metal limits of the German Fertiliser Ordinance directly. The chromium (VI) value as well as the cadmium and lead values partly exceeded the threshold values (chromium (VI): 62 %, cadmium: 12 %, lead: 4 %). If the chromium (VI) value were to be reduced by suitable ash treatment, for example by moistening the ashes, 85 % of the grate and boiler ashes would comply with the limit values of the German fertilizer legislation. However, due to the remaining 15 % of rejected ashes, a general complete recycling of wood ashes, for example as fertiliser in agriculture, without a preceding ash quality management is to be considered critical. The analysis of the main nutrients revealed not only high potassium and calcium contents but also relevant amounts of phosphorus in wood ashes, which could make these materials interesting e. g. as fertilisers for organic farming, if the limit values according to the German fertilizer legislation are met. To determine the fertilising effect of wood ashes, a greenhouse experiment with arable crops (maize, field bean) was carried out at the TFZ. Three wood ash batches and two lime fertilisers (quicklime, mixed lime) were used as fertilisers. The trial comprised a total of 252 planters. A significant decrease in the red leaf colour (maize), that indicates a phosphorus deficiency, in the plant length (maize), in the growth performance (field bean) and in the dry matter yield could be demonstrated when plants were fertilised with wood ash compared to lime.

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Abstract (deutsch)</b> .....  | <b>7</b>  |
| <b>Abstract (englisch)</b> .....   | <b>8</b>  |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b> .....   | <b>11</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b> .....   | <b>15</b> |
| <b>1 Einleitung</b> .....  | <b>17</b> |
| <b>2 Zielsetzung</b> .....   | <b>19</b> |
| <b>3 Stand des Wissens</b> .....   | <b>21</b> |
| <b>3.1 Stoffliche Verwertung von Holzaschen</b> .....  | <b>21</b> |
| <b>3.2 Qualität und Aufbereitung von Holzaschen</b> .....  | <b>22</b> |
| <b>3.3 Eigenschaften von Holzaschen als Düngemittel</b> .....  | <b>24</b> |
| <b>4 Rechtliche Fragen</b> .....   | <b>25</b> |
| <b>5 Abschätzung des Ascheanfalls aus Biomasse in Bayern</b> .....   | <b>29</b> |
| <b>5.1 Material und Methoden</b> .....   | <b>29</b> |
| <b>5.2 Ergebnisse und Diskussion</b> .....   | <b>30</b> |
| <b>6 Aschemanagement bayerischer Biomasseheiz(kraft)werke</b> .....  | <b>35</b> |
| <b>6.1 Material und Methoden</b> .....   | <b>35</b> |
| <b>6.2 Ergebnisse und Diskussion</b> .....   | <b>35</b> |
| 6.2.1 Technische Details der Heizwerke .....   | 39        |
| 6.2.2 Eingesetzte Brennstoffe .....  | 39        |
| 6.2.3 Rost- und Kesselaschen: Mengen, Management, Kosten.....  | 40        |
| 6.2.4 Einstellung der Heizwerkbetreiber gegenüber angebotener<br>Aschezertifizierung.....                                      | 46        |
| 6.2.5 Einstellungen und Erfahrungen der Heizwerkbetreiber gegenüber bzw.<br>mit der Verwertung von Rost- und Kesselasche ..... | 47        |
| 6.2.6 Schlussfolgerungen .....   | 48        |
| <b>7 Bewertung der Nährstoff- und Schwermetallgehalte<br/>bayerischer Holzaschen</b> .....                                     | <b>49</b> |
| <b>7.1 Material und Methoden</b> .....   | <b>49</b> |
| 7.1.1 Auswahl der zu beprobenden Biomasseheiz(kraft)werke.....   | 49        |
| 7.1.2 Vorgehensweise bei der Probenahme und Analyse.....   | 50        |
| 7.1.3 Probenahmestellen .....  | 52        |
| <b>7.2 Ergebnisse und Diskussion</b> .....   | <b>54</b> |
| 7.2.1 Qualität der Rost- und Kesselaschen.....   | 54        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 7.2.1.1    | Schwermetalle.....  | 56         |
| 7.2.1.2    | Nährstoffe und weitere Parameter.....   | 60         |
| 7.2.2      | Qualität der Rost- und Kesselaschen des TFZ-Heizwerks .....   | 61         |
| 7.2.3      | Qualität der Zyklonaschen des TFZ-Heizwerks .....   | 67         |
| 7.2.4      | Verteilung der Elementfrachten zwischen Rostasche und Zyklonasche<br>(TFZ-Heizwerk) .....                           | 71         |
| 7.2.5      | Qualität von Mischungen aus Rost- und Kesselasche mit Zyklonasche .....   | 75         |
| <b>7.3</b> | <b>Verwertbarkeit der untersuchten Aschen auf landwirtschaftlichen,<br/>forstlichen und sonstigen Flächen .....</b> | <b>80</b>  |
| 7.3.1      | Rost- und Kesselaschen .....  | 80         |
| 7.3.2      | Mischungen aus Rost- und Kesselasche mit Zyklonasche .....  | 81         |
| <b>8</b>   | <b>Düngewirkung von Rost- und Kesselaschen .....</b>  | <b>83</b>  |
| <b>8.1</b> | <b>Material und Methoden .....</b>  | <b>83</b>  |
| 8.1.1      | Ablauf des Gefäßversuchs .....  | 86         |
| 8.1.2      | Statistik .....   | 89         |
| <b>8.2</b> | <b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>  | <b>89</b>  |
| 8.2.1      | Versorgung der Varianten mit Phosphor und Kalium.....   | 89         |
| 8.2.2      | pH-Werte im Boden.....  | 90         |
| 8.2.3      | Entwicklung der Pflanzen .....  | 92         |
| 8.2.3.1    | Mais .....  | 92         |
| 8.2.3.2    | Ackerbohne .....  | 95         |
| 8.2.4      | Trockenmasseerträge .....   | 96         |
| <b>8.3</b> | <b>Schlussfolgerungen und Ausblick.....</b>   | <b>100</b> |
|            | <b>Zusammenfassung .....</b>  | <b>103</b> |
|            | <b>Quellenverzeichnis .....</b>   | <b>107</b> |
|            | <b>Anhang .....</b>   | <b>113</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1:  | Prüfschema zur Holzaschenverwertung von unbehandeltem Holz nach FNR (2014) [12] (BMUB: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, AVV: Abfallverzeichnisverordnung, AS: Abfallschlüssel, DüMV: Düngemittelverordnung, DüV: Düngeverordnung, BioAbfV: Bioabfallverordnung, DFZR: Deutscher Forst-Zertifizierungsrat, DK: Deponieklasse, NachwV: Nachweisverordnung, DepV: Deponieverordnung, VersatzV: Versatzverordnung) ..... | 25 |
| Abbildung 2:  | Klassifizierung der Heizwerke nach ihrer Wärmeleistung .....  | 36 |
| Abbildung 3:  | Verteilung der thermischen Leistung in der Grundgesamtheit (befragte Anlagen) und in den beantworteten Fragebögen .....   | 37 |
| Abbildung 4:  | Verteilung der thermischen Leistungen in der Umfrage im Vergleich zu den Zahlen im Energieholzmarktbericht Bayern 2016 [14] für Anlagen > 150 kW <sub>therm</sub> .....   | 38 |
| Abbildung 5:  | Inbetriebnahmejahr der Biomasseheizwerke, die an der Umfrage zum Aschemanagement teilgenommen haben (Balken = Inbetriebnahme pro Jahr, durchgezogene Linie = kumulierte Inbetriebnahme) .....   | 38 |
| Abbildung 6:  | Techniken zur Abgasreinigung bei den befragten Heizwerken .....   | 39 |
| Abbildung 7:  | Mittlere Brennstoffzusammensetzung in Abhängigkeit von der installierten Leistung (HS = Hackschnitzel, KUP = Kurzumtriebsplantage, LP = Landschaftspflegematerial) .....  | 40 |
| Abbildung 8:  | Menge trockener Rost- und Kesselasche pro Jahr, dargestellt als Häufigkeit der jeweiligen Gewichtsklassen .....   | 41 |
| Abbildung 9:  | Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei Rost- und Kesselaschen .....   | 42 |
| Abbildung 10: | Lagerdauer der Rost- und Kesselaschen als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25-%- und 75-%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker) .....   | 42 |
| Abbildung 11: | Gesetzliche Grundlagen für die durchgeführten Analysen der Rost- und Kesselaschen .....   | 43 |
| Abbildung 12: | Detaillierte Kostenaufstellungen für die Entsorgung von Asche – vier Beispiele .....  | 45 |
| Abbildung 13: | Entsorgungswege der Asche in den thermischen Leistungsklassen .....   | 46 |
| Abbildung 14: | Antworten auf die Frage nach der Kenntnis des Gütezeichens RAL-GZ 252 für Rost- und Kesselaschen als Düngemittel und Ausgangsstoff für Düngemittel und Einstellung zur dafür notwendigen Zertifizierung (rechts) .....  | 47 |
| Abbildung 15: | Probenahme von Rost- und Kesselasche nach LAGA PN 98 [4] .....  | 51 |
| Abbildung 16: | Schwermetallgehalte (auf wasserfreier Bezugsbasis) der 26 Rost- und Kesselaschen als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25-%-   |    |

---

|               |   |    |
|---------------|---|----|
|               | und 75-%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker) (horizontale Linien geben die jeweiligen Grenzwerte nach DüMV und BioAbfV wieder).....   | 56 |
| Abbildung 17: | Relative Häufigkeit der eingehaltenen und überschrittenen Grenzwerte nach DüMV für ackerbauliche und forstliche Anwendung sowie nach BioAbfV in den beprobten Rost- und Kesselaschen .....  | 57 |
| Abbildung 18: | Hauptnährstoffe der 26 Rost- und Kesselaschen (bezogen auf die Trockenmasse) als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25-%- und 75-%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker) (Zahlen neben den Boxplots sind jeweils die Mittelwerte).....  | 60 |
| Abbildung 19: | Schwermetallgehalte (auf wasserfreier Bezugsbasis) der zwölf Rost- und Kesselaschen vom TFZ-Heizwerk als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25-%- und 75-%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker) (horizontale Linien geben die jeweiligen Grenzwerte nach DüMV und BioAbfV wieder)..... | 64 |
| Abbildung 20: | Relative Häufigkeit der eingehaltenen und überschrittenen Grenzwerte nach DüMV für ackerbauliche und forstliche Anwendung sowie nach BioAbfV in den beprobten Rost- und Kesselaschen des TFZ-Heizwerks .....  | 65 |
| Abbildung 21: | Hauptnährstoffe der zwölf Rost- und Kesselaschen vom TFZ-Heizwerk (bezogen auf die Trockenmasse) als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25-%- und 75-%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker) (Zahlen neben den Boxplots sind jeweils die Mittelwerte).....                              | 66 |
| Abbildung 22: | Phosphatkonzentration im Brennstoff bezogen auf die entsprechenden Gehalte in der Rostasche (unten) und in der Zyklonasche (oben) .....   | 67 |
| Abbildung 23: | Schwermetallgehalte (auf wasserfreier Bezugsbasis) der acht Zyklonaschen vom TFZ-Heizwerk als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25-%- und 75-%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker) (horizontale Linien geben die jeweiligen Grenzwerte nach DüMV und BioAbfV wieder).....            | 69 |
| Abbildung 24: | Relative Häufigkeit der eingehaltenen und überschrittenen Grenzwerte nach DüMV für ackerbauliche und forstliche Anwendung sowie nach BioAbfV in den beprobten Zyklonaschen vom TFZ-Heizwerk .....   | 70 |
| Abbildung 25: | Hauptnährstoffe der acht Zyklonaschen vom TFZ-Heizwerk (bezogen auf die Trockenmasse) als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25-%- und 75-%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker) (Zahlen neben den Boxplots sind jeweils die Mittelwerte).....   | 71 |
| Abbildung 26: | Verhältnis der Elementfrachten in Rost- und Kesselasche sowie Zyklon-asche bei hypothetischen Mischungsverhältnissen mit Zyklonascheanteilen von 10 m-%, 20 m-%, 30 m-% und 50 m-% .....  | 73 |

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Abbildung 27: | Schwermetallgehalte (auf wasserfreier Bezugsbasis) der fünf Mischaschen aus Rost- und Kesselasche mit Zyklonasche als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25-%- und 75-%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker) (horizontale Linien geben die jeweiligen Grenzwerte nach DüMV und BioAbfV wieder) ..... | 78 |
| Abbildung 28: | Relative Häufigkeit der eingehaltenen und überschrittenen Grenzwerte nach DüMV für ackerbauliche und forstliche Anwendung sowie nach BioAbfV in den beprobten Mischaschen aus Rost- und Kesselasche mit Zyklonasche .....   | 79 |
| Abbildung 29: | pH-Messung mit Boden-pH-Meter direkt im feuchten Substrat.....  | 86 |
| Abbildung 30: | Randomisationsplan für Mais mit den Aschen A1 bis A3, Mischkalk (MK), Branntkalk (CAO), jeweils in den Dünge­stufen 50 bis 300 % (M 50 bis M 300), Nullvariante (M 0) und Randpflanzen zur Minimierung der Rande­effekte (M 1 bis M 15, markiert mittels „X“).....  | 86 |
| Abbildung 31: | Aussaat von Mais und Ackerbohne mittels Säs­chablone .....  | 87 |
| Abbildung 32: | Auflaufen von Ackerbohne (Vordergrund) und Mais (Hintergrund) im TFZ-Gewächshaus (Tag 12 nach der Aussaat).....   | 88 |
| Abbildung 33: | Kompensation des P- und K-Entzugs bei Mais und Ackerbohne in den vier Dünge­stufen .....  | 90 |
| Abbildung 34: | pH-Messung bei den Gefäßversuchen, Messzeitpunkte zehn Tage nach Substratmischung und Anfeuchtung sowie sechs Wochen später (n = 1) (grau hinterlegter Bereich entspricht dem angestrebten pH-Bereich für Mais zwischen pH 6 und pH 7,2) .....  | 91 |
| Abbildung 35: | Bonitur der Rotfärbung von Mais auf einer Skala von 1 bis 9 an den Tagen 35 und 71 nach Aussaat (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, n = 6).....   | 92 |
| Abbildung 36: | Bonitur der mittleren Pflanzenlänge von Mais an den Tagen 34 und 71 nach der Aussaat (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, n = 6).....  | 93 |
| Abbildung 37: | Bonitur der mittleren Wuchshöhe der Ackerbohnen an den Tagen 34 und 71 nach der Aussaat (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung, n = 6).....   | 95 |
| Abbildung 38: | Mittlerer Trockenmasseertrag ( $\pm$ Standardabweichung) bei Mais (n = 6) in Abhängigkeit von der Düngevariante .....   | 96 |
| Abbildung 39: | Mittlerer Trockenmasseertrag ( $\pm$ Standardabweichung) bei Ackerbohne (n = 6) in Abhängigkeit von der Düngevariante .....   | 98 |
| Abbildung 40: | Mittlerer Trockenmasseertrag bei Mais und Ackerbohne (n = 6) in Abhängigkeit von der Deckung des potenziellen Phosphor- und Kaliumentzugs (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung).....  | 99 |



## Tabellenverzeichnis

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Tabelle 1:  | Grenzwerte bzw. Höchstgehalte (in Klammern) für Holzaschen nach der aktuellen DüMV und BioAbfV .....   | 27 |
| Tabelle 2:  | Auswahl möglicher Düngemitteltypen für Holzaschen nach DüMV (verändert nach [13]) .....  | 28 |
| Tabelle 3:  | Energieholzverbrauch von Feuerungsanlagen > 50 kW <sub>therm</sub> in Bayern im Jahr 2016 nach GÖßWEIN et al. [14] .....   | 30 |
| Tabelle 4:  | Abschätzung des mittleren Aschegehalts der eingesetzten Brennstoffe auf wasserfreier Bezugsbasis (wf) in Bayern für Anlagen > 1 MW <sub>therm</sub> nach [14] (Altholz und sonstige Brennstoffe wurden bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt) .....   | 31 |
| Tabelle 5:  | Berechnung der potenziell im Jahr 2018 angefallenen, für die stoffliche Verwertung nutzbaren Aschen aus naturbelassenen Brennstoffen bei der Verbrennung in Anlagen > 1 MW .....   | 32 |
| Tabelle 6:  | Übersicht der Probenahmen der Rost- und Kesselaschen, der Gemische aus Rost-, Kessel- und Zyklonaschen sowie der reinen Zyklonaschen (die zwölf Einzelproben der Rost- und Kesselasche vom TFZ-Heizwerk wurden rechnerisch zu einer Probe gemittelt; daraus resultieren die Angaben in Klammern).....              | 53 |
| Tabelle 7:  | Analyseergebnisse für 26 Rost- und Kesselaschen aus bayerischen Heizwerken mit einer installierten Leistung > 1 MW (TM = Trockenmasse) .....   | 55 |
| Tabelle 8:  | Auswertung der Grenzwertüberschreitungen bei Schwermetallen in Rost- und Kesselaschen nach DüMV (hellgrau) und BioAbfV (dunkelgrau) bezogen auf Heizwerke und Einzelproben (Schwermetalle ohne Überschreitungen und TFZ-Heizwerk nicht angezeigt) .....  | 59 |
| Tabelle 9:  | Analyseergebnisse von zwölf Rost- und Kesselaschen aus dem TFZ-Heizwerk mit einer installierten Leistung 2 × 650 kW <sub>therm</sub> . Grau hinterlegte Felder kennzeichnen eine Erhöhung der Gehalte in den Rost- und Kesselaschen des TFZ im Vergleich mit der Übersicht aller Heizwerke (siehe Tabelle 7) ..... | 62 |
| Tabelle 10: | Analyseergebnisse von acht Zyklonaschen aus dem TFZ-Heizwerk mit einer installierten Leistung 2 × 650 kW <sub>therm</sub> .....  | 68 |
| Tabelle 11: | 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) .....   | 72 |
| Tabelle 12: | Vergleich der Aschequalität aus zwei parallel betriebenen Kesseln: in einem Fall gemeinsame Sammlung von Rost-, Kessel- und Zyklonasche, im anderen Fall nur Rost- und Kesselasche .....   | 76 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Tabelle 13: | Analyseergebnisse von fünf Mischungen aus Brennraum- und Zyklonasche aus Heizwerken mit einer installierten Leistung > 1 MW ..... | 77  |
| Tabelle 14: | Calcium-, Kalium- und Phosphatgehalte der eingesetzten Düngemittel in m-% TM .....  | 84  |
| Tabelle 15: | Übersicht der Varianten mit Anzahl der Wiederholungen und Gesamtzahl der Gefäße .....   | 84  |
| Tabelle 16: | Aufwandmenge für die eingesetzten Kalke und Aschen für die vier Düngestufen in kg/ha.....   | 85  |
| Tabelle 17: | Düngebedarf und Aufwandmenge für die eingesetzten Kalke und Aschen für die vier Düngestufen in g/l Pflanzsubstrat.....            | 85  |
| Tabelle 18: | Verhältnis von Kaliumoxid zu Phosphat ( $P_2O_5$ ) in den Aschen .....  | 100 |

# 1 Einleitung

Die Bioökonomie leistet einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen und zukunftsorientierten Entwicklung des Freistaats Bayern [40]. Mit ihren technischen und wirtschaftlichen Innovationen auf Basis regenerativer Energie- und Rohstoffquellen erlaubt sie eine langfristig ausgerichtete, ökologisch, ökonomisch und sozial vorbildhafte Lebensweise zum Schutz der Ökosysteme und des Klimas und sichert so die Lebensgrundlage für zukünftige Generationen.

Zur Unterstützung der bayerischen Bioökonomie sowie der Energie- und Rohstoffwende wurde im Jahr 2015 der Sachverständigenrat Bioökonomie Bayern durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) ins Leben gerufen. In seinen „Empfehlungen zur Förderung der Bioökonomie in Bayern“ fordert der Rat die Erarbeitung einer ressortübergreifenden Bioökonomiestrategie, in der u. a. eine Steigerung der Ressourceneffizienz durch Rückgewinnung und Wiederverwendung von Rohstoffen hervorgehoben wird [41]. Der Erhalt der zugrunde liegenden Ökosysteme durch nachhaltige Bewirtschaftung, die Abkehr von fossilen Ressourcen und die Erschließung von Materialkreisläufen sind dabei nur einige der Grundpfeiler für eine wissenschaftsbasierte, verantwortungsvolle und gesellschaftsübergreifende Wirtschaftsweise. Vor allem durch die „verstärkte Nutzung von Nebenprodukten und Reststoffen trägt die Bioökonomie in Bayern zur Schonung der natürlichen Ressourcen bei“ [40].

Bei der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe in Biomassefeuerungen fallen Verbrennungsrückstände in Form von Asche an [34]. Allein in Bayern dürfte der Ascheanfall aus der energetischen Holznutzung ca. 118.400 t/a betragen (berechnet aus den Zahlen des Energieholzmarktberichts 2014 der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) [14]. Unterschieden werden diverse Aschefraktionen, z. B. Rostasche, Zyklonasche und Filterasche, abhängig davon an welchen Bereichen der Feuerungen die Asche anfällt. Die inhaltsstoffliche Zusammensetzung dieser Fraktionen unterscheidet sich mitunter erheblich [34]. Vor allem feine Flugaschen, d. h. die Aschefraktionen, die in Elektro- bzw. Gewebefiltern anfallen, können hohe Gehalte leicht flüchtiger Schwermetalle wie Arsen, Cadmium, Blei, Quecksilber und Zink beinhalten, wodurch ihre Verwertung erschwert wird. Gesetzlich gilt Asche als Abfallstoff im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) [5], für den geprüft werden muss, ob eine hochwertige Verwendung überhaupt möglich ist.

Gerade die stoffliche Nutzung von Biomasseaschen stellt die Praxis vor große Herausforderungen [38] [45] [48]. Komplexe rechtliche Rahmenbedingungen, eine aufwändige Aschelogistik 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 [52] [3] [26] [30]. 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.



## 2 Zielsetzung

Ziele des Projekts „Stoffliche Nutzung von Biomasseaschen als Baustein der Bioökonomie“ (AshUse) sind Identifikation, Erprobung und Bewertung innovativer und praxisrelevanter Verwertungsmöglichkeiten von Aschen aus der Verbrennung von Biomasse. Der Fokus liegt auf der stofflichen Verwertung im Hinblick auf die Bayerische Bioökonomiestrategie. Durch Identifikation neuer Wertschöpfungsmöglichkeiten für Aschen sollen nicht nur stoffliche Kreisläufe regional geschlossen werden, sondern auch Kostenentlastungen bei Holzheiz(kraft)werken eintreten, indem für die ansonsten kostspielige Ascheentsorgung alternative und sinnvolle Verwendungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

Für eine zielorientierte Forschungs- und Beratungstätigkeit des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) zu stofflichen Verwertungsmöglichkeiten von Biomasseaschen muss in einem ersten Schritt ein entsprechender Bereich in der Abteilung „Biogene Festbrennstoffe“ geschaffen und die dazugehörigen Kompetenzen ausgebaut werden. Das langfristig angelegte Projekt gliedert sich daher in zwei Phasen: In der ersten Projektphase (Februar 2018 bis Juli 2020) soll der Status quo der Aschenutzung in Bayern erhoben werden. Diese Arbeiten werden in dem hier dargestellten Bericht wiedergegeben. Wesentliche Schwerpunkte sind die umfangreiche Recherche und der Wissensaufbau sowie die Schaffung eines weitreichenden Netzwerks aus Akteuren der Land- und Forstwirtschaft, Industriepartnern aus der bayerischen Bioökonomie, der Politik und Verwaltung sowie anderen Forschungsinstituten. Ebenso finden in Phase 1 u. a. die Analyse typischer Nährstoff- und Schwermetallgehalte bayerischer Biomasseaschen sowie erste Versuche zur Aufbereitung und Qualitätssicherung der Aschefractionen, beispielsweise neue Analysemethoden für den Labor- und Feldeinsatz, sowie zu weiteren möglichen Forschungsschwerpunkten am TFZ statt. Neben technischen und rechtlichen Aspekten der Aschenutzung erfolgen in den Arbeitspaketen auch erste Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit der Verfahren.

Die Arbeiten bilden somit die Grundlage für den Ausbau der Forschungsschwerpunkte der Abteilung „Biogene Festbrennstoffe“. Ausgehend von Projektphase 1 wurde bereits gegen Ende der Projektlaufzeit ein praxisorientiertes Forschungsvorhaben für Projektphase 2 („AshUse 2“, Start: Oktober 2020) entwickelt.

Die Erweiterung der Forschungs- und Beratungsschwerpunkte in der Abteilung „Biogene Festbrennstoffe“ verstärkt den Fokus des TFZ auf stoffliche Nutzungspfade nachwachsender Rohstoffe und fördert somit maßgeblich die Bioökonomie im Freistaat Bayern. Das TFZ bietet sich für das gewählte Aufgabenspektrum „Stoffliche Verwertung von Biomasseaschen“ aufgrund seiner langjährigen Rolle als kompetenter Ansprechpartner für die Bereitstellung und Aufbereitung von Roh- und Brennstoffen für die energetische Biomassenutzung und aufgrund seiner bereits bestehenden engen Verknüpfung mit der bayerischen Land- und Forstwirtschaft, mit der Industrie sowie mit Behörden, Verbänden, Ministerien und weiteren Forschungsunternehmen an.



### 3 Stand des Wissens

Die stoffliche Verwertung von Biomasseaschen als Koppelprodukt der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe bietet viele Chancen für die bayerische Bioökonomie. Sie stellt die Praxis aber auch vor zahlreiche Herausforderungen bei der Umsetzung. Schwierigkeiten ergeben sich z. B. aus der inhomogenen Qualität der Materialien, die abhängig vom Brennstoff (Holzart, Holzsortiment oder sonstige Kulturart), dem Anfallort der Asche in der Feuerung (Rostasche, Zyklonasche, Elektrofilterasche etc.), der Verbrennungstechnik (Biomassefeuerung zur reinen Wärmeengewinnung, Holzgas-BHKW), der Vollständigkeit der Verbrennung oder der Anlagengröße variieren kann. Vor allem die Gehalte an Schwermetallen in Holzaschen können je nach Aschefraktion erheblich schwanken und sind dabei limitierend für deren Verwertung.

Eine grobe Abschätzung der im Freistaat Bayern jährlich anfallenden Aschemenge aus der Verbrennung von Holz ist über den Energieholzmarktbericht der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) [14] möglich. Durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) wurde im Jahr 2009, basierend auf diesen regelmäßig aktualisierten Daten, die anfallende Aschemenge auf 74.000 Tonnen beziffert (Bezugsjahr: 2005 [38]). Allerdings wurden dabei innerhalb des jeweiligen Einsatzbereichs (beispielsweise in der Kategorie „Heiz(kraft)werke“) keine Einschränkungen hinsichtlich der eingesetzten Brennstoffsortimente oder der Anlagengröße getroffen. Somit liefert diese Berechnung zwar das maximale Aschepotenzial (inklusive des Anfalls an Asche aus häuslichen Kaminöfen), sie ermöglicht aber nur bedingt Rückschlüsse auf das logistisch und damit technisch und wirtschaftlich erschließbare Potenzial. Auch erlaubt sie keine Differenzierung nach der inhaltstofflichen Qualität, der physikalischen Ausformung oder der Homogenität der Aschen. Eine detailliertere Berechnung anhand aktueller Daten zum Energieholzanfall in Bayern [14] und den in dieser Studie durchgeführten Befragungen bayerischer Biomasseheiz(kraft)werke ist in Kapitel 6 dargestellt.

#### 3.1 Stoffliche Verwertung von Holzaschen

Rechtlich zählt Asche aus der Verbrennung von Biomasse zunächst als Abfall im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG). Das Gesetz sieht, wenn möglich, die hochwertige Verwertung von Abfällen vor deren Entsorgung vor. Für die Verwertung von Aschen ist dabei, je nach gewünschtem Anwendungsfall, eine Reihe weiterer Gesetze und Verordnungen zu beachten, z. B. die Düngemittelverordnung (DüMV [6]), die Bioabfallverordnung (BioAbfV [7]), das Düngemittelgesetz (DüG), das Bayerische Waldgesetz (BayWaldG), die Versatzverordnung (VersatzV) oder die Deponieverordnung (DepV). Gerade die Vielzahl komplexer Vorschriften und Gesetze macht es für die Praxis nicht immer einfach, die optimalen Lösungsansätze für die hochwertige Verwertung von Biomasseaschen zu identifizieren. Einen Einblick in die rechtlichen Hintergründe gibt Kapitel 4 dieses Berichts.

Hilfestellungen für die Wahl des passenden Verwertungswegs bieten das mittlerweile veraltete Merkblatt „Verwertung und Beseitigung von Holzaschen“ des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) aus dem Jahr 2009 [38] oder das entsprechende Kapitel aus dem „Leitfaden Feste Biobrennstoffe“ der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) aus dem Jahr 2014 [12]. Diese beiden Veröffentlichungen liefern der Praxis Beispiele für Verwertungsmöglichkeiten, aber auch Hinweise bezüglich des rechtlichen Hintergrunds.

Biomasseaschen werden in Deutschland und anderen europäischen Ländern je nach technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Gegebenheiten und unter Berücksichtigung umweltrelevanter Aspekte zu unterschiedlichen Zwecken eingesetzt. 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 Trollius GmbH 2019 mit dem Nachhaltigkeitspreis der Deutschen Gesteinsindustrie für die Herstellung von Holzasche-Magnesiumkalk-Gemischen für landwirtschaftliche und forstliche Anwendungen ausgezeichnet [8]. Eine Anwendung in der Forstwirtschaft findet vor allem in Baden-Württemberg und in den skandinavischen Ländern statt, wo Asche oder Asche-Kalk- bzw. Asche-Kalkdolomit-Gemische zur Bodenverbesserung eingesetzt werden [15] [22] [54] [55]. Auch die Vermischung von Aschen mit Kompost ist ein manchmal in Deutschland genutzter 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 [53]. Im Gegensatz zu Deutschland werden in Österreich etwa 40 % der jährlich anfallenden Aschen von der Zement- und Baustoffindustrie weiterverarbeitet [53]. Auch der Einsatz der Aschen beim Straßen- und Wegebau wurde in Österreich und Finnland erfolgreich in Forschungsvorhaben getestet [3] [22] [35].

Weitere Verwertungspfade, beispielsweise die Rückgewinnung von Schwer- und Edelmetallen, befinden sich aktuell noch im Planungs- oder Versuchsstadium. Neben der Identifikation geeigneter Verwertungsmaßnahmen oder der Optimierung dieser Prozesse besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Aufbereitung und der Qualitätssicherung von Biomasseaschen sowie der Entwicklung geeigneter Logistikkonzepte.

### **3.2 Qualität und Aufbereitung von Holzaschen**

Je nachdem wo im Heizwerk die Asche anfällt, werden verschiedene Aschefraktionen 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 „Rost- und Kesselasche“. Nachdem das heiße Abgas den Wärmetauscher durchlaufen hat, passiert es in den meisten Heiz(kraft)werken einen Zyklon oder Multizyklon, in dem die „Zyklonasche“ (auch „Flugasche“, „Feinflugasche“) anfällt. Verfügt das Heiz(kraft)werk über einen Elektro- oder Gewebefilter oder eine Abgaskondensation, fällt als dritte Fraktion die „Filterasche“ (auch „Feinstflugasche“) bzw. der „Kondensatschlamm“ an [16].

Die Zusammensetzung der einzelnen Aschefraktionen ist abhängig von den Brennstoffen und der Anlagentechnik [34]. Die in naturbelassenem Holz enthaltenen chemischen Inhaltsstoffe, beispielsweise die enthaltenen Nähr- bzw. Schadstoffe, variieren je nach Holzart, Rindenanteil, Wuchsstandort oder Verschmutzungsgrad [10] [50] [24]. So ist z. B. für Brennstoffe aus Kurzumtriebsplantagen baumartenbedingt ein höherer Gehalt an Cadmium und Zink im Holz bekannt [25]. Ebenso stellten LIENEMANN & VOCK 2013 [29] fest, dass Aschen aus Fichte und Weißtanne generell höhere Schwermetallgehalte aufweisen als Aschen aus Buche. Der Zinkanteil in Aschen erhöht sich bei Fichte, wenn Rinde im Brennstoff enthalten ist. In derselben Studie konnten höhere Elementgehalte bei der Verbrennung von Resthölzern im Vergleich zu Stammholz in automatisch beschickten Anlagen aufgezeigt werden. Versuche mit Scheitholz in Kaminöfen führten zwar zu kaum nennenswerten Unterschieden im Elementgehalt der Aschen von Buche, Fichte, Tanne oder Eichen [51], nichtsdestotrotz ist davon auszugehen, dass die Holzart neben der Bildung von Emissionen oder Schlacke bei der Verbrennung [44] [58] auch auf die inhaltsstoffliche Qualität der Aschen einen wesentlichen Einfluss hat.

Haupt- und Spurenelemente (v. a. viele Schwermetalle) sind bei den im Brennraum herrschenden Temperaturen unterschiedlich flüchtig [34]. Sie reichern sich daher unterschiedlich stark in Rost-, Zyklon- oder Filterasche an [27] [29]. Zu den leicht flüchtigen Schwermetallen zählen Arsen, Cadmium, Blei, Zink und Quecksilber. Schwer flüchtige Elemente wie Chrom oder Kupfer verbleiben dagegen vermehrt in Rost- und Kesselaschen. Falls die Verbrennung unvollständig abläuft, können auch organische Schadstoffe entstehen, die sich v. a. in den Filteraschen anreichern. Folglich haben die Verbrennungsführung und damit die Temperatur in der Feuerung einen Einfluss auf die Aschequalität.

Ein typisches Schwermetall, das laut LIENEMANN & VOCK [29] aus den Stahlwerkstoffen in der Brennkammer automatisch beschickter Feuerungen v. a. durch Abrieb in die Asche eingetragen werden kann, ist Chrom. Die Vermutung, dass diese Anreicherung tatsächlich durch den Stahlabrieb bedingt ist, konnte zwar durch entsprechende Untersuchungen des Baden-Württembergischen Ministeriums für Umwelt und Verkehr (MUV) nicht bestätigt werden [32], nichtsdestotrotz ist ein erhöhter Chromgehalt, v. a. ein erhöhter Chrom(VI)-Wert, ein in Rost- und Kesselaschen häufig beobachtetes Phänomen (siehe auch Kapitel 7). Chrom(VI)-Verbindungen werden aufgrund ihrer Löslichkeit als grundwassergefährdend eingeordnet [43] [46]. In belebten organischen Oberböden ist Chrom(VI) allerdings nicht lange stabil und wird in unlösliches Chrom(III) umgewandelt und damit immobilisiert. Auch in angefeuchteter Asche baut sich Chrom(VI) zu Chrom(III) ab. Diesen Effekt können Heiz(kraft)werksbetreiber nutzen, indem sie ihre Rost- und Kesselaschen befeuchten oder eine Nassentaschung verwenden [11] [36]. Die Zugabe von Reduktionsmitteln wie Eisen(II)- oder Mangansulfat zu Holzaschen kann ebenso zu einem Abbau von Chrom(VI) führen, ohne die Löslichkeit anderer Schwermetalle zu erhöhen [43] [46]. Inwieweit eine Vorbehandlung der Aschen (Befeuchtung, Zugabe von Reduktionsmitteln) den Chrom(VI)-Wert größerer Aschechargen jedoch zuverlässig reduziert und mit welchem Lagerzeitraum diesbezüglich gerechnet werden muss, ist noch nicht abschließend geklärt.

Ein weiterer Prozess, der bei einer offenen Lagerung feuchter Aschen abläuft, ist die Karbonatisierung und damit die „Aushärtung“ der Aschen [47] [49]. Dieser Vorgang führt zu

einer Massenzunahme sowie zu einer Senkung des sehr hohen pH-Werts und es kommt, je nach Element, zu einer Verringerung der Auswaschrates. Der Prozess beruht auf der Umwandlung von Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ) und Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) zu Calciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), das unter Aufnahme von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) aus der Luft in einer exothermen Reaktion in Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) umgewandelt werden kann. Die Massenzunahme der Aschen beträgt, je nach Calciumoxidgehalt, bei offener Lagerung nach vier Wochen bis zu 28 % [29]. Offene Fragen bei der Karbonatisierung größerer Holzaschen-Chargen betreffen u. a. den optimalen Feuchtegehalt oder die Lagerdauer sowie die Homogenität der dabei ablaufenden Prozesse [49].

### 3.3 Eigenschaften von Holzaschen als Düngemittel

Aschen enthalten die Makronährstoffe Calcium, Magnesium, Kalium und Phosphor sowie zahlreiche Mikronährstoffe. REICHLÉ et al. 2009 [38] geben als durchschnittliche Gehalte für Rost- und Kesselaschen 25 bis 45 m-% Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ), jeweils 3 bis 6 m-% Magnesiumoxid ( $\text{MgO}$ ) und Kaliumoxid ( $\text{K}_2\text{O}$ ) und 2 bis 3 m-% Phosphat ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 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 basischen Bereich zwischen pH 11 und pH 13, weshalb Aschen als Bodenverbesserer, beispielsweise bei der Waldkalkung in Baden-Württemberg, eingesetzt werden.

KATZENSTEINER et al. 2011 [17] beschreiben die Pflanzenverfügbarkeit von Calcium und Kalium aus Holzaschen als „hoch“, die Magnesiumverfügbarkeit als „mittel“ und die Phosphorverfügbarkeit als „gering“. „Gering“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass weniger als 10 % des Gesamtphosphors aus Holzaschen im Anwendungsjahr für die Pflanze verfügbar sind. Bei Gefäßversuchen wiesen KEBLI et al. 2017 [18] und MALTAS et al. 2014 [31] 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 (siehe Abschnitt 3.2) 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-Württemberg sind zukünftig nur Waldkalkungsprodukte mit diesem DLG-Gütesiegel zugelassen [37]. Entsprechend wäre eine Zertifizierung nach DLG-Siegel für diesen Verwertungspfad notwendig.

## 4 Rechtliche Fragen

Die Entsorgung, v. a. aber auch die stoffliche Verwertung von Holzasche berührt viele Rechtsbereiche. Im Kontakt mit bayerischen Heizwerksbetreibern, z. B. im Rahmen der im Kapitel 6 durchgeführten Umfrage, wurde deutlich, dass die komplexe Rechtslage beim Aschemanagement vielen bayerischen Betreibern unbekannt ist. Da das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) derzeit an einer Neuauflage des Merkblatts „Verwertung und Beseitigung von Holzaschen“ aus dem Jahr 2009 [38] arbeitet, das v. a. den rechtlichen Bereich umfassend abdecken soll, wird in diesem Kapitel nur eine kurze Übersicht über die aktuelle rechtliche Situation der Ascheverwertung gegeben (Abbildung 1).

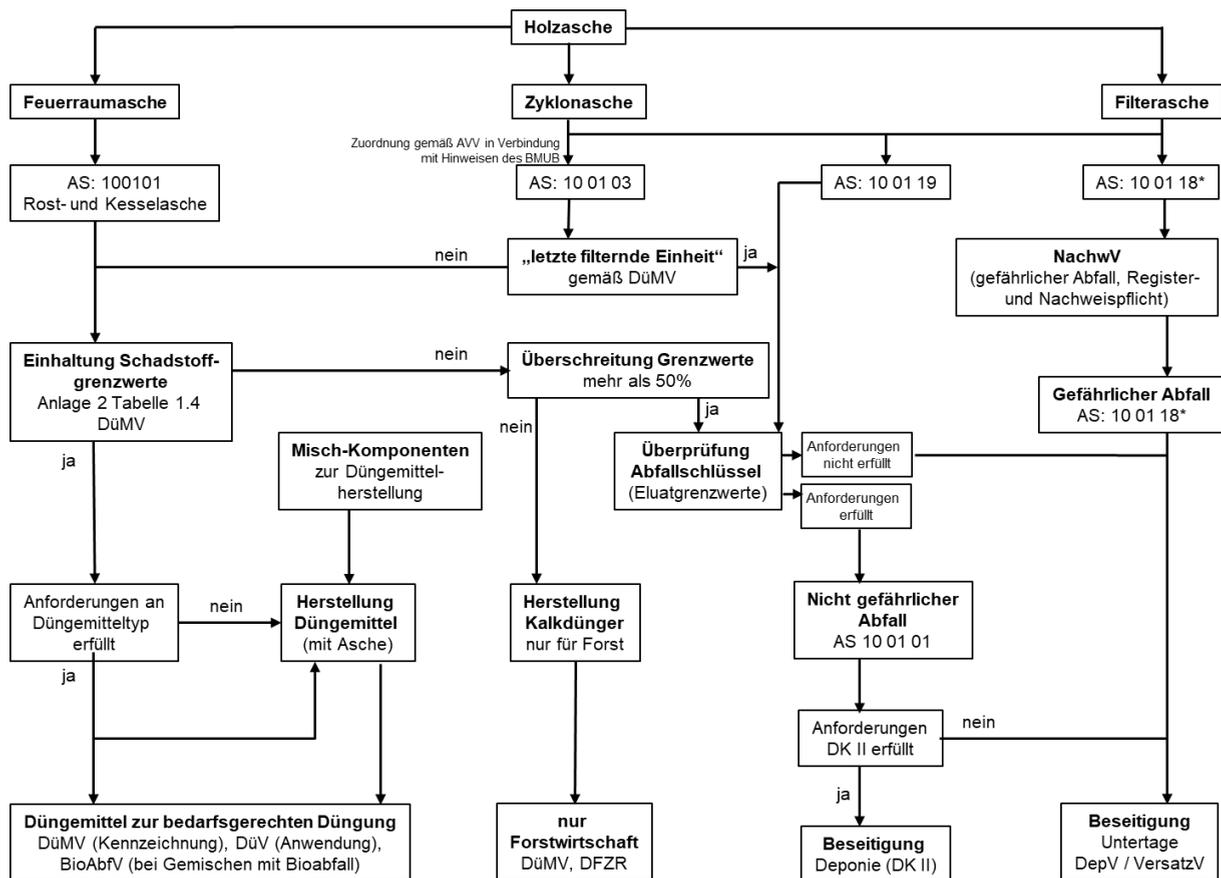


Abbildung 1: Prüfschema zur Holzaschenverwertung von unbehandeltem Holz nach FNR (2014) [12] (BMUB: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, AVV: Abfallverzeichnisverordnung, AS: Abfallschlüssel, DüMV: Düngemittelverordnung, DüV: Düngerverordnung, BioAbfV: Bioabfallverordnung, DFZR: Deutscher Forst-Zertifizierungsrat, DK: Deponieklasse, NachwV: Nachweisverordnung, DepV: Deponieverordnung, VersatzV: Versatzverordnung)

Die einzelnen Aschefractionen fallen als Abfall nach Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) an und werden, je nach ihrem Anfallort im Heiz(kraft)werk, unterschiedlichen Abfallschlüsseln nach Abfallverzeichnisverordnung (AVV) zugeordnet. Nach § 7 Abs. 2 KrWG hat die Verwertung von Abfall Vorrang vor dessen Beseitigung. Um eine möglichst hochwertige

Verwertung zu ermöglichen, sind die Abfälle getrennt zu halten (§ 9 Abs. 1 KrWG). Für Aschen bedeutet dies, dass die Vermischung getrennt anfallender Aschefractionen einer Feuerungsanlage unzulässig ist, wenn dadurch die Verwertbarkeit eingeschränkt oder verhindert wird [38]. Diese Verwertung hat im Einklang mit dem KrWG und anderen öffentlich-rechtlichen Vorschriften („ordnungsgemäß“) zu erfolgen und es darf dabei zu keiner Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf kommen („schadlos“) (§ 7 Abs. 3 KrWG). Eine stoffliche Verwertung liegt vor, falls der Hauptzweck die Nutzung des Abfalls und nicht die Beseitigung des Schadstoffpotenzials ist (§ 3 Abs. 23 KrWG). Die Ausbringung von Aschen auf land- oder forstwirtschaftlichen Flächen gilt dann als Verwertung, wenn ein bestehender Nährstoffbedarf gedeckt wird und eine Schadstoffanreicherung im Boden nicht zu befürchten ist [38]. Die DüMV und die BioAbfV sind die öffentlich-rechtlichen Vorschriften, die die Anforderungen an eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung nach § 7 Abs. 2 KrWG auf landwirtschaftlich, forstlich und gärtnerisch genutzten Böden festlegen. Im Folgenden wird die Anwendung von BioAbfV und DüMV bei der Ascheverwertung erläutert. Die Düngeverordnung (DüV), die die Anwendung von Düngern nach guter fachlicher Praxis regelt (Abbildung 1), ist zu beachten, wird aber hier nicht näher behandelt.

Die DÜNGEMITTELVERORDNUNG DÜMV [6] schreibt vor, dass Aschen, die zur Verwertung in Düngemitteln verwendet werden sollen, nur aus der Verbrennung naturbelassener pflanzlicher Ausgangsstoffe stammen dürfen (Anlage 2, Tabelle 7.1). Weil sich v. a. leicht flüchtige Schwermetalle in den Flugaschen stark anreichern, ist nur die Verwendung von Rost- und Kesselasche zulässig. Wenn der Zyklon nicht die letzte filternde Einheit im Abgasweg eines Heizwerks ist, wäre es darüber hinaus auch erlaubt, die Zyklonasche zu verwerten (DüMV, Anlage 2, Tabelle 7.3.1.6). Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) weist darauf hin, dass das in der DüMV verwendete Wort „Brennraumasche“ gleichzusetzen ist mit den allgemein benutzten Bezeichnungen „Feuerraumasche“, „Grobasche“ oder „Rostasche“ [38]. Im vorliegenden Bericht wird für diese Aschefraktion der Begriff „Rost- und Kesselasche“ verwendet.

Je nach Verwendungszweck müssen die Aschen unterschiedliche Grenzwerte einhalten. Die Grenzwerte der DüMV und der BioAbfV sind in Tabelle 1 dargestellt. Kupfer und Zink sind laut DüMV (Tabelle 1.4) keine Schadstoffe. Sie werden zu den Spurennährstoffen gezählt. Für diese gelten nach DüMV, Anlage 1, Abschnitt 4.1.1 eine Kennzeichnungsschwelle (ab 200 mg/kg TM) und Höchstgehalte. Für Kupfer (Cu) liegt dieser Höchstgehalt bei 900 mg/kg TM für die Ausbringung auf Ackerflächen bzw. bei 2.000 mg/kg TM für eine forstliche Anwendung. Der Höchstgehalt für Zink (Zn) beträgt 5.000 mg/kg TM.

*Tabelle 1: Grenzwerte bzw. Höchstgehalte (in Klammern) für Holzaschen nach der aktuellen DüMV und BioAbfV*

| 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           | –       |

Bei Einhaltung der Grenzwerte der DüMV darf die Asche als Komponente bei der Düngemittelherstellung oder direkt als Düngemittel eingesetzt werden. Für letzteren Fall muss die Asche bestimmte Nährstoffanforderungen an einen Düngemitteltyp erfüllen. Tabelle 2 listet mögliche Düngemitteltypen für Holzaschen nach DüMV. Als Dünger eingesetzte Stoffe müssen unbedenkliche Schadstoffgehalte aufweisen und gleichzeitig eine Düngewirkung entfalten. Aschen, die die Grenzwerte der DüMV um bis zu 50 % überschreiten, dürften, zumindest nach der DüMV und wenn sie entsprechend gekennzeichnet sind, auf forstlichen Standorten angewendet werden.

Erreichen die Aschen 15 % CaO in der Trockenmasse, können sie als Kalkdünger aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe angesprochen werden. Kohlensaurer Kalk darf maximal 30 % Rost- und Kesselaschen enthalten. Wenn Mindestgehalte an K<sub>2</sub>O und/oder P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> eingehalten werden, ist der Düngemitteltyp Kaliumdünger oder mineralischer PK-Dünger möglich. Erfüllt die Asche die Anforderungen an einen Düngemitteltyp, kann sie auch mit Kompost vermischt werden. Diese Vermischung mit Kompost führt zum Düngemitteltyp organisch-mineralischer PK-Dünger, für den allerdings die angegebenen Mindestgehalte enthalten sein müssen.

Auch eine Vermischung der Aschen mit Bioabfall ist erlaubt. Hier greift die Bioabfallverordnung (BioAbfV). Soll eine Ausbringung des entstehenden organisch-mineralischen Düngers im Geltungsbereich der BioAbfV erfolgen, sind zusätzlich zur DüMV auch die Grenzwerte der BioAbfV einzuhalten. Es gelten jedoch keine Nährstoff-Mindestgehalte.

**Tabelle 2:** Auswahl möglicher Düngemitteltypen für Holzaschen nach DüMV (verändert nach [13])

| Typenbezeichnung  | Mindestgehalte  | Wesentliche Zusammensetzung, Art der Herstellung, besondere Bestimmungen   | Fundstelle DüMV   |
|---|---|--|---|
| Kaliumdünger aus der Aufbereitung von Aschen                              | 10 % K <sub>2</sub> O   | Wasserlösliches Kaliumoxid; Brennraumaschen von naturbelassenen pflanzlichen Ausgangsstoffen   | Anlage 1, Abschnitt 1.3.4 i. V. m. Anlage 2, Tabelle 6.3., Z. 6.3.3 |
| Kohlensaurer Kalk   | 70 % CaCO <sub>3</sub>  | Calciumcarbonat, daneben auch Magnesiumcarbonat. Maximal 30 % Brennraumasche von unbehandelten Pflanzenteilen. Das Düngemittel muss mit dem Hinweis „Enthält basisch wirksame Pflanzenasche“ gekennzeichnet sein | Anlage 1, Abschnitt 1.4.1 i. V. m. Anlage 2, Tabelle 7.3, Z. 7.3.16 |
| Kalkdünger aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe                        | 15 % CaO in der TM  | Oxide, Hydroxide, Silicate oder Carbonate von Calcium und Magnesium; Brennraumaschen von naturbelassenen pflanzlichen Ausgangsstoffen; bei ausschließlicher Verwendung von Aschen pflanzlicher Herkunft          | Anlage 1, Abschnitt 1.4.6 i. V. m. Anlage 2, Tabelle 6.4, Z. 6.4.11 |
| Mineralischer PK-Dünger aus Asche aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe | 2 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub><br>3 % K <sub>2</sub> O       | Auf chemischem Wege, durch Mischen [...] gewonnenes Erzeugnis; auch unter ausschließlicher Verwendung von Aschen aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe. Bei trockenem Material Granulierung                    | Anlage 1, Abschnitt 2.3 i. V. m. Anlage 2, Tabelle 7.3., Z. 7.3.16  |
| Organisch-mineralischer PK-Dünger   | 0,5 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ,<br>1,0 % K <sub>2</sub> O | Auch Zugabe von Asche aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe  | Anlage 1, Abschnitt 3.2 i. V. m. Anlage 2, Tabelle 7.3, Z. 7.3.16   |

Sollte es anstelle einer Verwertung eine Beseitigung, beispielsweise eine Deponierung der Aschen notwendig sein, sind u. a. die Deponieverordnung (DepV) bzw. die Versatzverordnung (VersatzV) zu beachten (Abbildung 1).

## 5 Abschätzung des Ascheanfalls aus Biomasse in Bayern

Aktuell werden im Freistaat Bayern keine zentralen Daten zum Ascheanfall aus der Verbrennung von Biomasse bayerischer Heiz(kraft)werke erhoben. Das für stoffliche Verwertungswege zur Verfügung stehende Aschepotenzial ist daher größtenteils unbekannt. In diesem Kapitel soll der für stoffliche Verwertungswege jährlich zur Verfügung stehende Anfall an Asche mittels einer Potenzialabschätzung berechnet werden. Das Ergebnis ermöglicht Aussagen zu der theoretisch mobilisierbaren Masse an Holzasche, die für stoffliche Nutzungspfade im Rahmen der bayerischen Bioökonomie relevant sein könnte.

### 5.1 Material und Methoden

Die Potenzialberechnung zum Ascheanfall bayerischer Biomasseheiz(kraft)werke erfolgt als indirekte Abschätzung über den Energieholzverbrauch im Freistaat Bayern, über die Anlagenleistung der installierten Heizwerke und über den typischen Aschegehalt von Holzbrennstoffen. Als Quellen dienen der „Energieholzmarktbericht Bayern 2016“ [14] für den Energieholzverbrauch und die „Feste Regenerative Energieträger Datenbank“ (FRED) [50] von LfU und TFZ zur Abschätzung der durchschnittlichen Aschegehalte unterschiedlicher Holzbrennstoffe.

Die im Energieholzmarktbericht 2016 [14] berichteten Mengen an Energieholz sind zum einen das Ergebnis einer direkten Erhebung der eingesetzten Brennstoffe in bayerischen Heiz(kraft)werken, zum anderen wurden die Verbräuche auf Basis der installierten Leistung und einer angenommenen gesamtjährlichen Auslastung für die nicht befragten Anlagen hochgerechnet. Die Zahlen des Energieholzmarktberichts sind daher mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

Aus den Daten zum Energieholzverbrauch „Mittlere Holzfeuerungen und Biomasseheiz(kraft)werke“ wurden Untergruppen – vornehmlich anhand der installierten Leistung der Anlagen – ausgewählt, die für eine stoffliche Verwertung von Biomasseaschen interessant sein könnten. Aktuell stehen in Bayern für Rost- und Kesselaschen vor allem die Verwertungspfade als Dünger oder als Ausgangsstoff für Düngemittel zur Verfügung (siehe auch Kapitel 3 und 4). Für diese Verwendung sind nur Aschen aus der Verbrennung unbehandelter Hölzer zulässig. Daher wurden Aschen, die aus der Altholzverbrennung oder aus der Verbrennung von „Sonstigen Brennstoffen“ (z. B. Schwarzlauge) stammen, bei der nachfolgenden Berechnung nicht berücksichtigt. Die Rückstände von Holzvergäsern wurden ebenfalls nicht berücksichtigt, da sie erhöhte Gehalte organischer Schadstoffe aufweisen können [39].

Da die zur Verwertung notwendigen chemischen Analysen der Rost- und Kesselaschen nach DüMV oder BioAbfV relativ kostenintensiv sind, wurde angenommen, dass erst ab einer Anlagengröße mit einem Ascheaufkommen von > 5 bis 10 Tonnen pro Jahr von einer potenziellen Verwertung auszugehen ist. Das entspricht Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung  $\geq 1 \text{ MW}_{\text{therm}}$  (vgl. auch Kapitel 6). Anlagen ab  $50 \text{ kW}_{\text{therm}}$  bis  $1 \text{ MW}_{\text{therm}}$  können

ihre Rost- und Kesselasche aufgrund der geringen anfallenden Mengen in der Regel nicht wirtschaftlich sinnvoll verwerten. Somit bildet eine Anlagengröße ab  $1 \text{ MW}_{\text{therm}}$  die untere Grenze in der hier dargestellten Berechnung zum theoretischen Potenzial.

Für die unter obigen Annahmen berechnete Energieholzmenge wird ein zum eingesetzten Brennstoff passender Aschegehalt zugrunde gelegt, um die jährlich anfallende Gesamtmasse an Holzasche, die für die stoffliche Verwertung theoretisch interessant sein könnte, abzuschätzen. Dazu wurde auf durchschnittliche Werte aus der TFZ-Datenbank FRED [50] zurückgegriffen. Die verwendeten Werte wurden mit Informationen zum Ascheanfall, die bei der Befragung bayerischer Heizwerksbetreiber erhoben wurden, validiert (siehe Kapitel 6). Laut Rücksprache mit den zuständigen Autoren des Energieholzmarkt-Teilkapitels zum Holzverbrauch „Mittlere Holzfeuerungen und Biomasseheiz(kraft)werke“ [14] von C.A.R.M.E.N. e. V. konnte zudem für das Bezugsjahr 2018 ein um 15 % höherer Ascheanfall in der Berechnung zugrunde gelegt werden, als sich aus den Daten von 2016 ergeben würde. Der Mehranfall ergibt sich beispielsweise aus einer im Jahr 2018 höheren Anlagenauslastung, als er für die Studie zum Jahr 2016 angenommen wurde. Somit kann das Potenzial an Holzasche recht aktuell für das Jahr 2018 abgeschätzt werden.

## 5.2 Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 3 veranschaulicht den Energieholzverbrauch von Feuerungsanlagen  $> 50 \text{ kW}_{\text{therm}}$  im Jahr 2016 und die Anzahl der zu diesem Zeitpunkt laufenden Biomasseheiz(kraft)werke in Bayern mit einer installierten Leistung  $> 50 \text{ kW}_{\text{therm}}$  [14]. Insgesamt wurden im Jahr 2016 ca. 3.040.000  $t_{\text{atro}}$  an Energieholz in bayerischen Biomasseheiz(kraft)werken eingesetzt. Davon entfielen ca. 72 % auf Feuerungen  $> 1 \text{ MW}_{\text{therm}}$ . Ohne die Gruppe der Holzvergaser zu berücksichtigen, liefen in Bayern 2016 demnach 60 Heizkraftwerke und 160 Heizwerke mit einer Anlagengröße von  $> 1 \text{ MW}_{\text{therm}}$ .

*Tabelle 3: Energieholzverbrauch von Feuerungsanlagen  $> 50 \text{ kW}_{\text{therm}}$  in Bayern im Jahr 2016 nach GÖBWEIN et al. [14]*

| Anlagenart und Anlagengröße                         | Energieholzverbrauch 2016 in $t_{\text{atro}}$ | Anteil am Verbrauch in Bayern | Anlagenzahl in Bayern (gerundet) |
|---|--|-------------------------------|----------------------------------|
| <b>Biomasseheiz(kraft)werke</b>                     | <b>1.800.000</b>                               | <b>59 %</b>                   | <b>320</b>                       |
| (Heiz-)Kraftwerk (Dampf)                            | 1.380.000                                      | 45 %                          | 30                               |
| Heizkraftwerk (ORC)                                 | 310.000  | 10 %                          | 30                               |
| Holzgas-BHKW  | 110.000  | 4 %                           | 260                              |
| <b>Wärmeerzeuger 50 kW bis 1 MW</b>                 | <b>860.000</b>                                 | <b>28 %</b>                   | <b>19.500</b>                    |
| <b>Wärmeerzeuger <math>&gt; 1 \text{ MW}</math></b> | <b>380.000</b>                                 | <b>13 %</b>                   | <b>160</b>                       |
| <b>Summe</b>  | <b>3.040.000</b>                               | <b>100 %</b>                  | <b>ca. 20.000</b>                |

Der mittlere Aschegehalt der in bayerischen Heiz(kraft)werken eingesetzten Brennstoffe wird durch ein gewichtetes Mittel aus der Brennstoffmenge (und damit durch den Anteil am Gesamtverbrauch) und einen geschätzten Aschegehalt aus der TFZ-Datenbank FRED für den jeweiligen Brennstoff berechnet (Tabelle 4).

*Tabelle 4: Abschätzung des mittleren Aschegehalts der eingesetzten Brennstoffe auf wasserfreier Bezugsbasis (wf) in Bayern für Anlagen > 1 MW<sub>therm</sub> nach [14] (Altholz und sonstige Brennstoffe wurden bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt)*

| Brennstoff  | Brennstoff<br>in $t_{atro}$ | Anteil am Verbrauch in<br>Bayern | Aschegehalt<br>in m-% (wf) |
|---|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Altholz   | 790.000                     | 26 %                             | 5,0                        |
| <b>Waldhackschnitzel</b>  | <b>820.000</b>              | <b>27 %</b>                      | <b>2,0</b>                 |
| <b>Sägenebenprodukte</b>  | <b>420.000</b>              | <b>14 %</b>                      | <b>2,0</b>                 |
| <b>Rinde</b>  | <b>280.000</b>              | <b>9 %</b>                       | <b>4,0</b>                 |
| <b>Landschaftspflegeholz</b>  | <b>300.000</b>              | <b>10 %</b>                      | <b>3,5</b>                 |
| <b>Holzpellets</b>  | <b>250.000</b>              | <b>8 %</b>                       | <b>1,0</b>                 |
| Sonstige Brennstoffe  | 180.000                     | 6 %                              | 4,0                        |
| <b>Mittlerer Aschegehalt<br/>(gewichtetes Mittel ohne Altholz und sonstige Brennstoffe)</b> |                             |                                  | <b>2,37</b>                |
| <b>Summe naturbelassene<br/>Brennstoffe (2016)</b>  | <b>2.070.000</b>            |                                  |                            |

Ausgangspunkt der Berechnung sind die für die Energiegewinnung eingesetzten Brennstoffe. Als Ausgangsstoff für Düngemittel kommen nur Aschen infrage, die aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz, d. h. von Waldhackschnitzeln, chemisch unbehandelten Sägenebenprodukten, Rinde, Landschaftspflegeholz und Holzpellets stammen. Aschen aus der Altholzverbrennung, aus Holzvergasern und aus Feuerungen mit einer Wärmeerzeugung < 1 MW<sub>therm</sub> wurden nicht berücksichtigt (siehe oben). Aufgrund der Vermutung, dass in der FRED-Datenbank vor allem hochwertige, verschmutzungsarme Brennholzsortimente enthalten sind, wurden je Brennstoff Aschegehalte aus dem oberen Wertebereich der Datenbank gewählt. Als mittlerer Aschegehalt ergibt sich somit ein Wert von 2,37 m-% (auf wasserfreier Bezugsbasis). Die Summe der naturbelassenen Brennstoffe beläuft sich auf 2,07 Mio.  $t_{atro}$  im Jahr 2016.

Während die Datensätze in der FRED-Datenbank relativ niedrige Aschegehalte für naturbelassene Brennstoffe verzeichnen, teilten mehrere Heizwerkbetreiber aus ihren Erfahrungen heraus erheblich höhere durchschnittliche Aschegehalte von bis zu 10 m-% mit, vermutlich aufgrund schlechterer Brennstoffqualitäten im Heizwerk im Vergleich mit den Werten in der FRED-Datenbank. Die tatsächlich anfallende Menge an Rost- und Kesselasche, über die in diesem Kapitel berichtet wird, könnte somit für Bayern noch unterschätzt

werden. Daher wurde zusätzlich in einem zweiten Berechnungsschritt eine Verdopplung des durchschnittlichen Aschegehalts von 2,37 m-% (wf) auf 4,73 m-% (wf) verwendet.

Um die potenziell für eine stoffliche Verwertung und dabei v. a. die für Düngezwecke verfügbare Masse an Rost- und Kesselasche aus der Verbrennung naturbelassener Holzbrennstoffe für das Jahr 2018 zu berechnen, wurden zunächst von der Summe naturbelassener Brennstoffe aus Tabelle 4 aus dem Jahr 2016 der Verbrauch der kleineren Anlagen von 50 kW<sub>therm</sub> bis 1 MW<sub>therm</sub> sowie der Verbrauch der Holzvergaser abgezogen. Hieraus ergibt sich eine Gesamtsumme an 1.100.000 t<sub>atro</sub> (Bezugsjahr 2016, Tabelle 5).

*Tabelle 5: Berechnung der potenziell im Jahr 2018 angefallenen, für die stoffliche Verwertung nutzbaren Aschen aus naturbelassenen Brennstoffen bei der Verbrennung in Anlagen > 1 MW*

| Parameter   | t <sub>atro</sub> /a |
|---|----------------------|
| Summe naturbelassene Brennstoffe (2016)                           | 2.070.000            |
| abzüglich Verbrauch von 50 kW bis 1 MW                            | -860.000             |
| abzüglich Verbrauch Holzvergaser                                  | -110.000             |
| Summe naturbelassene Brennstoffe in Anlagen > 1 MW (2016)         | 1.100.000            |
| Zuschlag von 15 % aufgrund höherer Auslastung der Anlagen in 2018 | 1.265.000            |
| <b>Ascheanfall bei einem Aschegehalt von 2,37 m-% (wf)</b>        | <b>29.944</b>        |
| <b>Ascheanfall bei einem Aschegehalt von 4,73 m-% (wf)</b>        | <b>59.889</b>        |

Inklusive des oben erläuterten Zuschlags von 15 % für das Jahr 2018 errechnet sich eine Energieholzmenge von 1,265 Millionen t<sub>atro</sub>. Multipliziert mit dem berechneten mittleren Aschegehalt von 2,37 m-% (wf) erhält man eine Aschemenge von knapp 30.000 t<sub>atro</sub> für das Jahr 2018. Ausgehend von den ebenfalls oben berichteten, häufig höheren Aschegehalten im Praxisbetrieb wurde eine zweite Berechnung mit einem verdoppelten durchschnittlichen Aschegehalt von 4,73 m-% durchgeführt. Unter dieser Annahme würde die für stoffliche Verwertungswege nutzbare Aschemenge aus Bayern pro Jahr knapp 60.000 t<sub>atro</sub> betragen.

Mit den oben vorgenommenen Einschränkungen zu potenziell verwertbaren Aschen ergibt sich somit für das Bezugsjahr 2018 eine Aschemenge von 30.000 bis 60.000 Tonnen für stoffliche Verwertungswege, dabei v. a. für den Einsatz als Düngemittel.

REICHLÉ et al. 2009 [38] schätzten das Ascheaufkommen in Bayern für das Jahr 2005 mit 74.000 t<sub>atro</sub>/a höher ein als das Ergebnis der hier dargestellten Studie. Der Berechnung des LfU liegt ein Gesamtaufkommen an Energieholz (inkl. Brennholz) von 3,7 Millionen t<sub>atro</sub> mit einem mittleren Aschegehalt von 2 m-% zugrunde. Allerdings entspricht diese Aschemenge eher einem theoretischen Potenzial, da im Gegensatz zu der hier dargestellten Studie keine Einschränkungen bei der Verwertbarkeit der Aschen hinsichtlich der Brennstoffqualität, des Anlagentyps und der Anlagengröße vorgenommen wurden. Obwohl sich

der Energieholzverbrauch sowohl bayernweit als auch bundesweit von 2005 bis 2016 deutlich erhöht hat, ermittelt die vorliegende Studie aufgrund der oben genannten Annahmen eine niedrigere tatsächlich verwertbare Aschemenge.

Zusammenfassend besteht für Aschen aus naturbelassenen Hölzern, die jährlich bei der Verbrennung in bayerischen Biomasseheiz(kraft)werken  $> 1 \text{ MW}_{\text{therm}}$  anfallen, ein erhebliches Potenzial, das einer stofflichen Verwertung zugeführt werden könnte.



## 6 Aschemanagement bayerischer Biomasseheiz(kraft)werke

Bislang liegen nur wenige Daten darüber vor, wie Biomasseheiz(kraft)werke in Bayern ihre anfallenden Aschen entsorgen, welche Kosten dabei entstehen und welche Gründe aus Sicht der Betreiber einer Verwertung der Aschen entgegenstehen. Darüber hinaus erfordert die bayernweite Etablierung einer stofflichen Nutzung von Biomasseasche Kenntnisse über deren Menge, Qualität und regionale Verteilung. Ziel der in diesem Kapitel dargestellten Studie ist es, den Status quo des Umgangs mit Biomasseasche in bayerischen Biomasseheiz(kraft)werken zu erfassen und zu bewerten. Dieses Wissen bildet die Grundlage für die Entwicklung von Strategien für eine erhöhte Ascheverwertung.

### 6.1 Material und Methoden

Die Datenerhebung basiert auf einer Online-Umfrage, die in Zusammenarbeit mit der Greensurvey GmbH durchgeführt wurde. Insgesamt wurden 351 Biomasseheiz(kraft)werke aus ganz Bayern zur Teilnahme eingeladen. Hierbei wurde unter Einhaltung aktueller Datenschutzbestimmungen auf bestehende Kontakte der TFZ-Abteilung „Förderzentrum Biomasse“ sowie auf zusätzlich durchgeführte Adressrecherchen zurückgegriffen. Der Versand der Einladung mit der Aufforderung zur Beteiligung an der Umfrage erfolgte zu drei Zeitpunkten per Post, um einen möglichst hohen Rücklauf zu gewährleisten.

Auf Anlagenebene erhebt die Umfrage Qualität und Menge der Brennstoffe, den Anlagenbetrieb sowie technische Angaben zum Kessel, zur Abgasreinigung und zur Aufbereitung der verschiedenen Aschefraktionen. Weitere Fragen befassen sich mit den bestehenden Ascheentsorgungspfaden und den Kosten für das Aschemanagement. Aktuelle Probleme bei der Entsorgung von Asche werden ebenso abgefragt wie die Bereitschaft der Betreiber, Asche künftig zu verwerten, anstatt sie durch Deponierung zu beseitigen. Im abschließenden Teil der Befragung werden bestehende Qualitätssicherungsmaßnahmen im Heizwerk ermittelt. Diese Maßnahmen bilden eine wichtige Voraussetzung, um qualitätsgesicherte Asche für die Verwertung bereitzustellen.

Der detaillierte Fragebogen ist im Anhang wiedergegeben.

### 6.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Umfrage liefert detaillierte Informationen zum Aschemanagement bayerischer Biomasseheiz(kraft)werke. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Beteiligung an der Umfrage. Von den 351 zur Teilnahme eingeladenen Betreibern von Biomasseheizkraftwerken haben 114 den Fragebogen vollständig beantwortet. Dies entspricht einer Rücklaufquote von 32 %.

Drei Viertel der Anlagen ( $n = 86$ ), für die Fragebögen ausgefüllt wurden, haben eine installierte Wärmeleistung von weniger als 1 MW (Abbildung 2). Umgerechnet 16 % der

Anlagen haben eine thermische Leistung von 1 bis < 2,5 MW ( $n = 18$ ) und 9 % der Anlagen von 2,5 MW bis 50 MW ( $n = 10$ ). Die nachfolgenden Auswertungen beziehen sich häufig auf die in Abbildung 2 gezeigten Leistungsklassen.

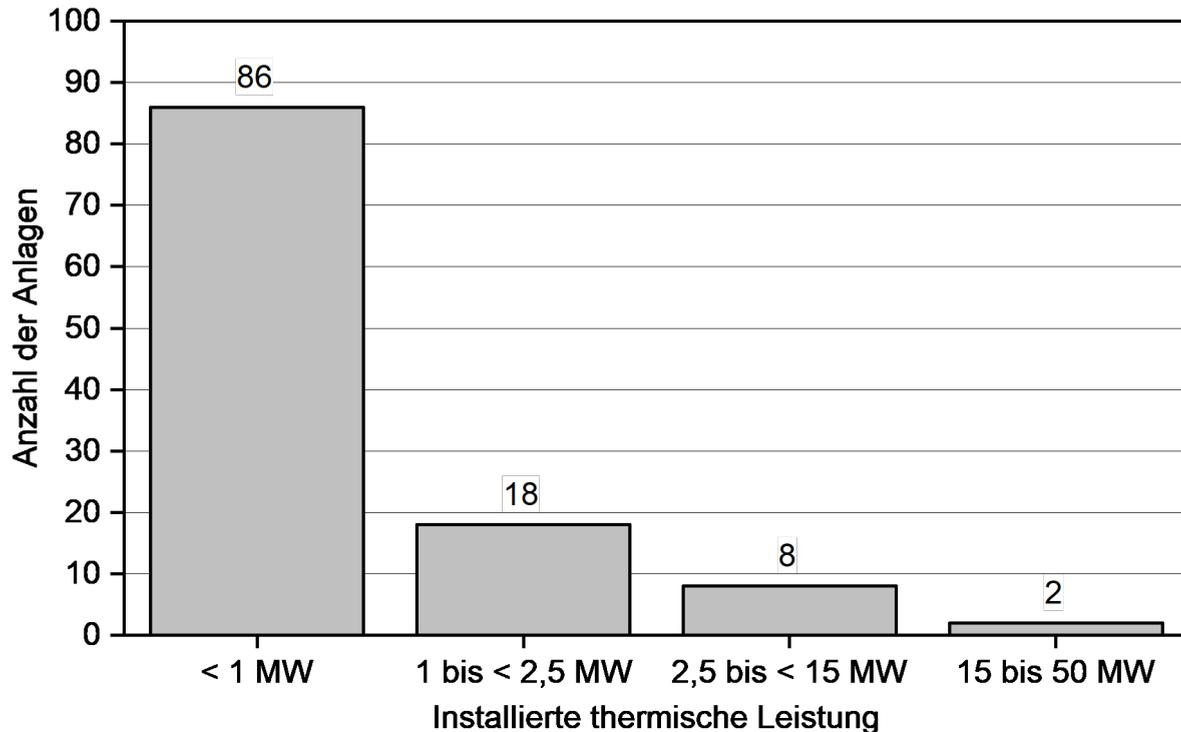


Abbildung 2: Klassifizierung der Heizwerke nach ihrer Wärmeleistung

Zur Beurteilung der Repräsentativität der Umfrage wurde die Verteilung der installierten Wärmeleistung der kontaktierten Anlagen mit der Verteilung aus den beantworteten Fragebögen verglichen (Abbildung 3). Insgesamt kann eine gute Übereinstimmung der Verteilung der installierten Wärmeleistung festgestellt werden. In der Umfrage ist die Leistungsklasse bis 1 MW etwas unterrepräsentiert, vermutlich weil für größere Anlagen die Entsorgung von Asche ein relevanteres Thema darstellt.

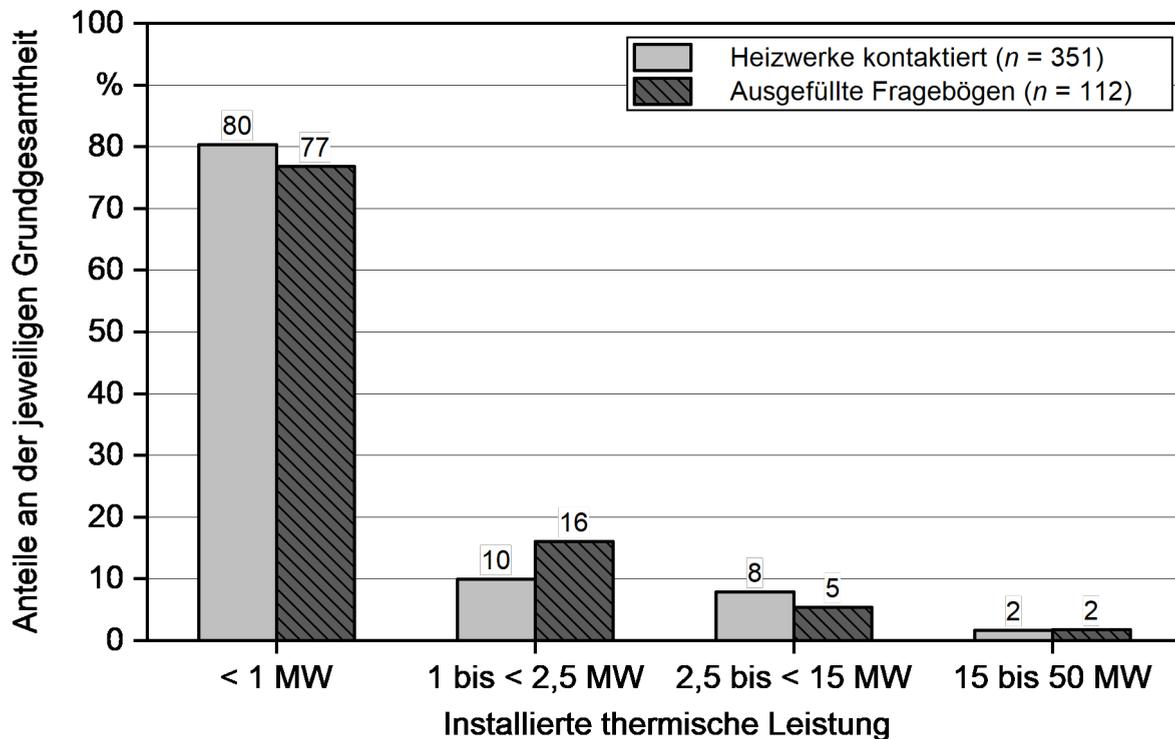


Abbildung 3: Verteilung der thermischen Leistung in der Grundgesamtheit (befragte Anlagen) und in den beantworteten Fragebögen

Der Energieholzmarktbericht Bayern [14] schätzt den Gesamtbestand der bayerischen Feuerungen  $> 50 \text{ kW}_{\text{therm}}$  auf ca. 20.000 Anlagen. Heiz(kraft)werke in der Leistungsklasse  $> 150 \text{ kW}_{\text{therm}}$  erzeugen dabei über 70 % der bereitgestellten Wärmemenge. Diese Leistungsklasse entspricht am ehesten der Grundgesamtheit in der hier dargestellten Umfrage. Ein Abgleich der Anlagenverteilung aus der AshUse-Umfrage mit dem im Energieholzmarktbericht abgeschätzten Anlagenbestand und der dort verwendeten Klassifizierung nach thermischer Leistung  $> 150 \text{ kW}_{\text{therm}}$  ist in Abbildung 4 wiedergegeben. Es zeigt sich deutlich, dass die höheren Leistungsklassen in der hier dargestellten Umfrage gegenüber dem Anlagenbestand im Energieholzmarktbericht überrepräsentiert sind. Das liegt hauptsächlich an der Auswahl der Anlagen, die vornehmlich durch die Kontakte über die TFZ-Abteilung „Förderzentrum Biomasse“ erfolgten, wodurch kleinere, v. a. häusliche Anlagen in der Grundgesamtheit der Umfrage weniger repräsentiert waren. Da eine stoffliche Verwertung von Biomasseaschen vor allem für größere Anlagen relevant ist (siehe weiter unten), wird diese Abweichung in der Grundgesamtheit der befragten Anlagen als unkritisch für die Auswertung der Ergebnisse betrachtet.

Die Anlagen wurden v. a. in den Jahren 1990–2018 in Betrieb genommen (Abbildung 5). Am häufigsten wurden die Inbetriebnahme betreffend die Jahre 2006–2011 genannt.

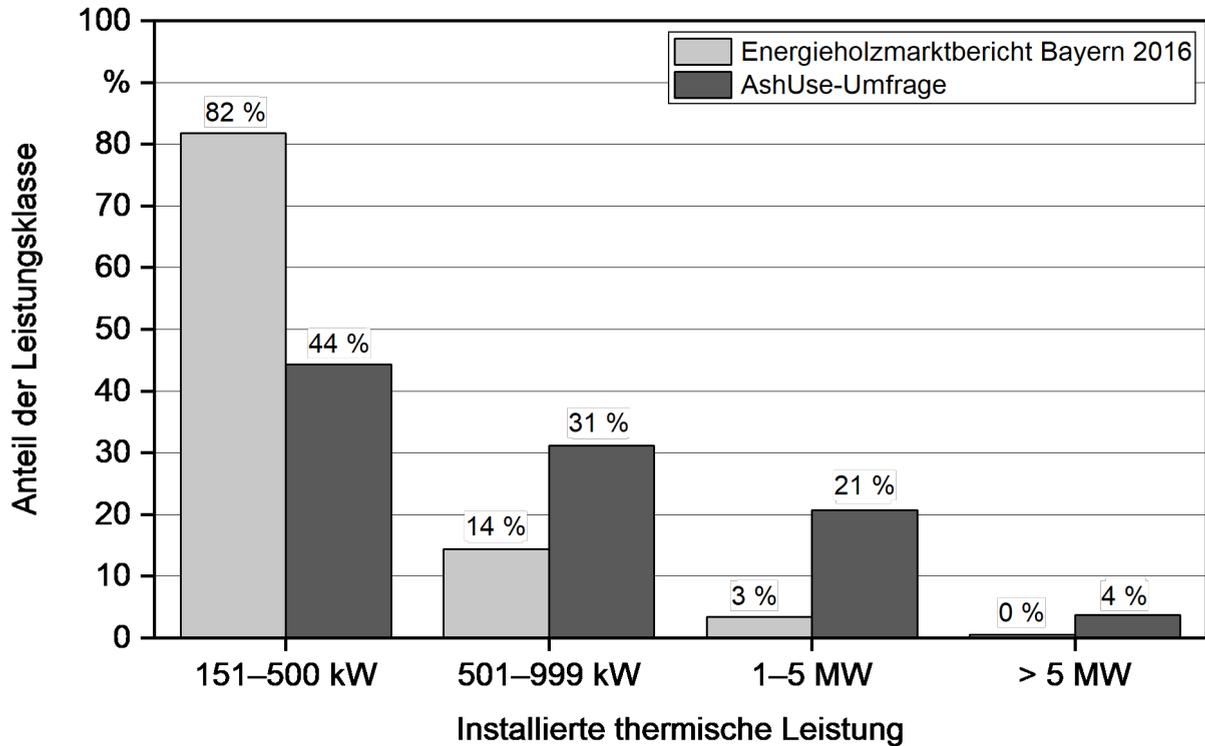


Abbildung 4: Verteilung der thermischen Leistungen in der Umfrage im Vergleich zu den Zahlen im Energieholzmarktbericht Bayern 2016 [14] für Anlagen > 150 kW<sub>therm</sub>

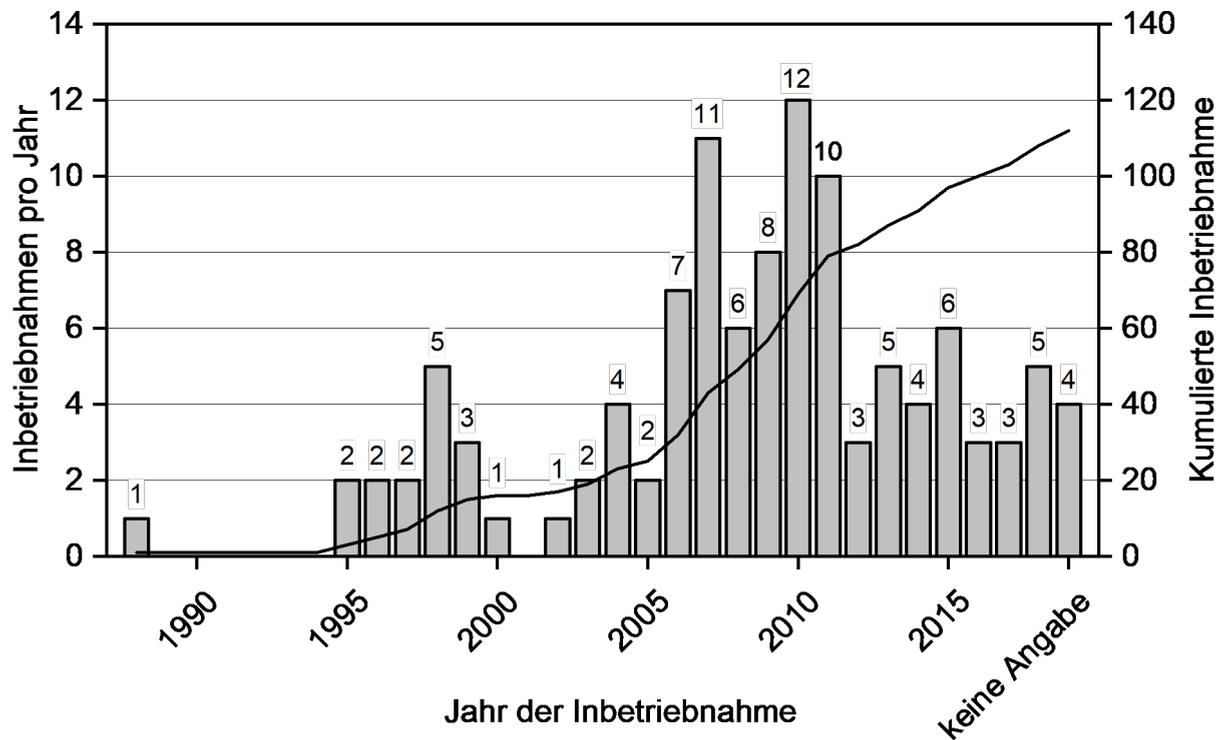


Abbildung 5: Inbetriebnahmejahr der Biomasseheizwerke, die an der Umfrage zum Aschemanagement teilgenommen haben (Balken = Inbetriebnahme pro Jahr, durchgezogene Linie = kumulierte Inbetriebnahme)

### 6.2.1 Technische Details der Heizwerke

Mit wenigen Ausnahmen arbeiten die befragten Anlagen mit Festbettfeuerung und Trockenentaschung. Bezüglich der Partikelreinigung im Abgas gaben 71 % der Betreiber an, dass ihre Anlage mit einem Zyklon ausgestattet ist (Abbildung 6). Weitere genannte Abgasreinigungsanlagen waren Elektrofilter (29 %), Gewebefilter (8 %) und Abgaskondensation (4 %). Ausgehend von den Antworten im Fragebogen nutzen 23 % der Anlagen eine Kombination aus mehreren Reinigungsstufen, um das Abgas zu reinigen. Am häufigsten besteht diese Kombination aus Zyklon und Elektrofilter (16 %).

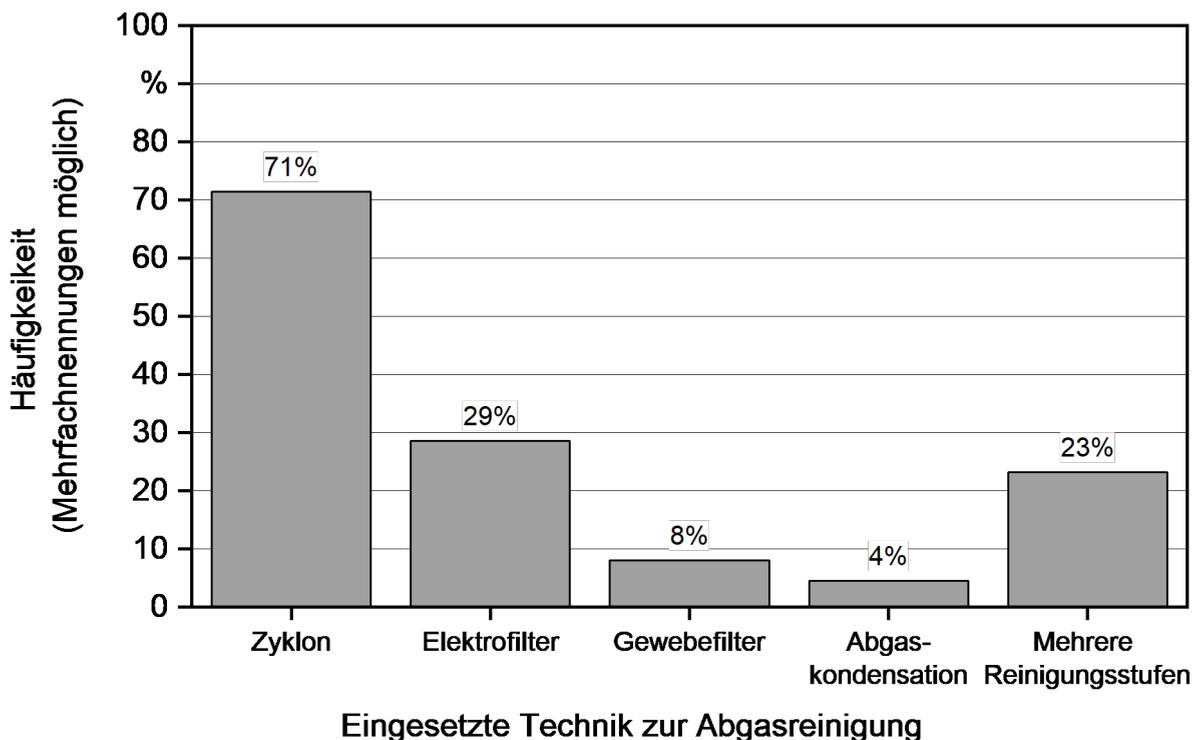


Abbildung 6: Techniken zur Abgasreinigung bei den befragten Heizwerken

### 6.2.2 Eingesetzte Brennstoffe

Die durchschnittliche Brennstoffzusammensetzung variierte zwischen den Leistungsklassen. Während die Anlagen im unteren Leistungsbereich (< 2,5 MW) vorwiegend Weichholzhackschnitzel (v. a. aus Nadelholz), naturbelassene Sägewerksnebenprodukte (ohne Rinde), Hartholzhackschnitzel und Pellets einsetzen, dominiert bei Anlagen mit einer thermischen Leistung von mehr als 2,5 MW Landschaftspflegematerial (Abbildung 7). Rinde als Brennstoff wird laut Umfrage in Anlagen unter 1 MW nicht eingesetzt. Anlagen, die gezielt Altholz einsetzen, wurden größtenteils nicht befragt.

Laut dem Energieholzmarktbericht Bayern 2016 [14] dominiert bei Biomasseheiz(kraft)werken und auch bei reinen Biomasseheizwerken neben Altholz der Brennstoff Waldhackschnitzel. Der Anteil an Landschaftspflegematerial ist v. a. bei Biomasseheiz(kraft)werken erhöht, da Kraftwerke, deren Stromerzeugung über das EEG 2004 und

das EEG 2009 vergütet wird, sich über den Einsatz von Landschaftspflegeholz den NaWaRo-Bonus sichern bzw. deren Zuordnung zu den entsprechenden Einsatzstoffvergütungsklassen nach EEG 2012 erfolgt.

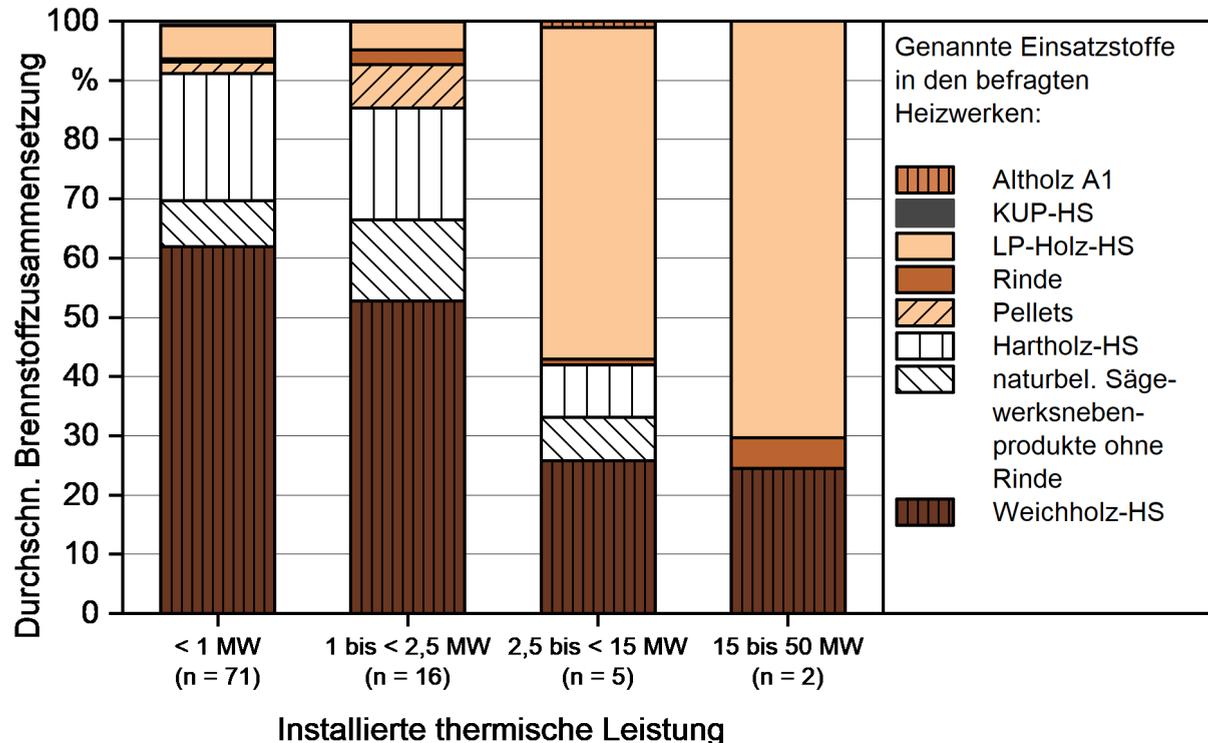


Abbildung 7: Mittlere Brennstoffzusammensetzung in Abhängigkeit von der installierten Leistung (HS = Hackschnitzel, KUP = Kurzumtriebsplantage, LP = Landschaftspflegematerial)

### 6.2.3 Rost- und Kesselaschen: Mengen, Management, Kosten

Die Hälfte der Heiz(kraft)werke produziert weniger als 10 t Rost- und Kesselasche pro Jahr. 10 % der Anlagen erzeugen jeweils mehr als 60 t pro Jahr (Abbildung 8). Diese größten 10 % der Anlagen (bezogen auf ihre thermische Leistung) erzeugen 90 % der gesamten über die Umfrage erfassten Aschemenge.

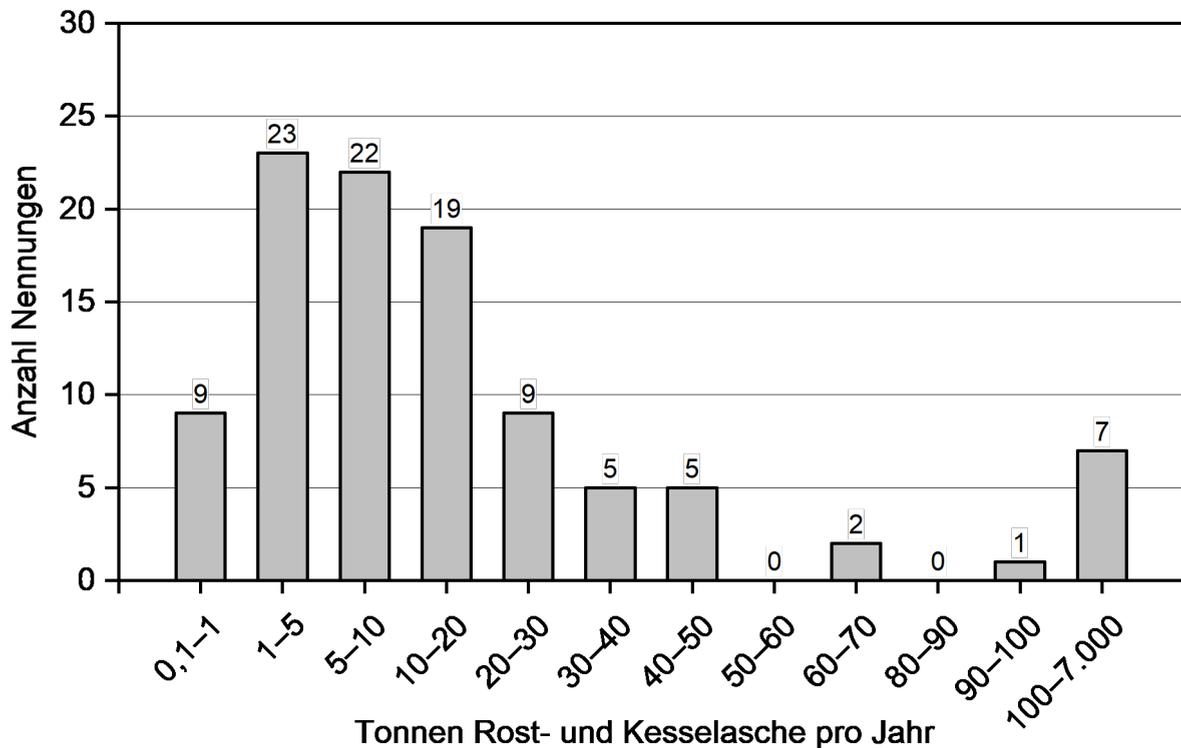


Abbildung 8: Menge trockener Rost- und Kesselasche pro Jahr, dargestellt als Häufigkeit der jeweiligen Gewichtsklassen

Niedrige Schwermetallgehalte sind für die meisten Ascheverwertungspfade eine Voraussetzung (vgl. Kapitel 3 und 4). Abbildung 9 fasst verschiedene Maßnahmen zusammen, die im Fall einer Ascheverwertung zur Qualitätssicherung verwendet werden können, um Schwermetallgehalte zu minimieren und relevante Grenzwerte, beispielsweise der DÜMV, einzuhalten. Demnach gaben 47 % der Anlagenbetreiber an, die unterschiedlichen Aschequalitäten getrennt zu lagern. In Zyklon- und Filterasche sind flüchtige Schwermetalle häufig deutlich erhöht (vgl. auch Kapitel 7). Vor allem die Konzentrationen flüchtiger Schwermetalle sollten demnach in einer Mischung der Aschefraktionen höher sein als in der reinen Rost- und Kesselasche. Da den verschiedenen Aschefraktionen unterschiedliche Abfallnummern zuzuordnen sind (vgl. Kapitel 4), ist eine Vermischung nach abfallrechtlichen Vorgaben, beispielsweise außerhalb der Feuerung, nicht ohne Weiteres erlaubt [38].

Weitere regelmäßig genannte Maßnahmen sind die Aufbewahrung von Rückstellproben der Aschen (9 %), die Dokumentation und Analyse der Aschen (24 %) sowie die Rückverfolgbarkeit zum Brennstoff (20 %) (Abbildung 9).

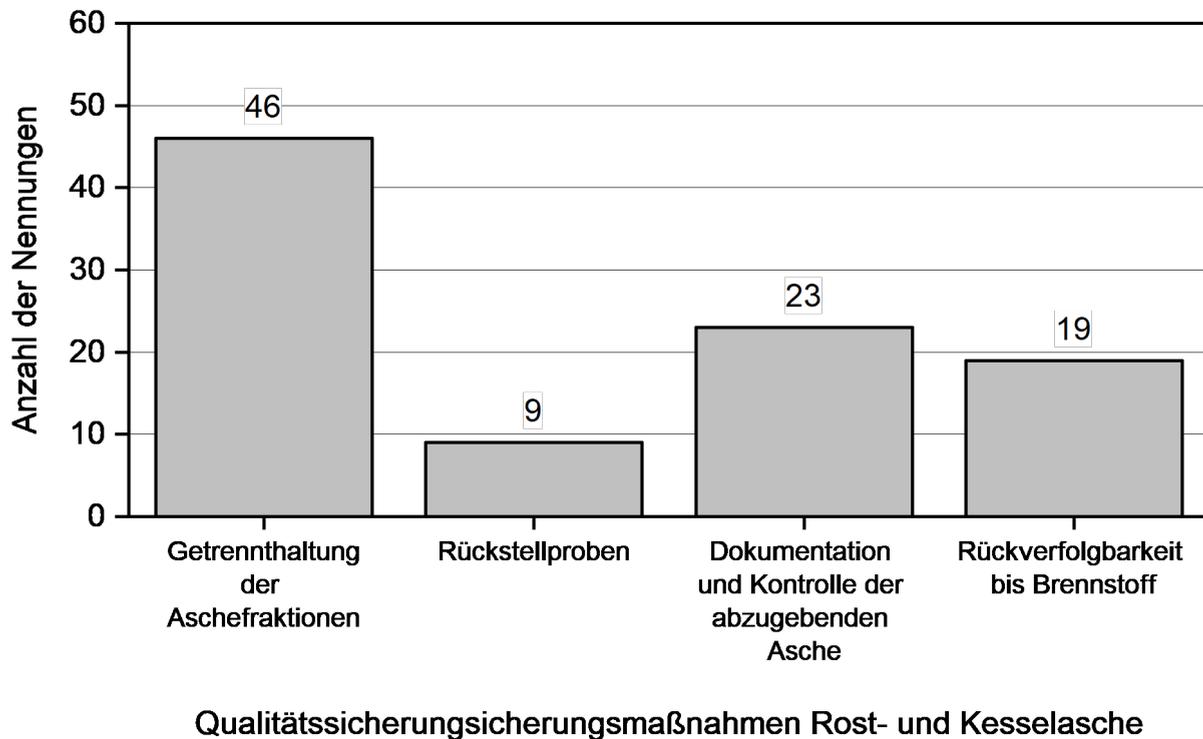


Abbildung 9: Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei Rost- und Kesselaschen

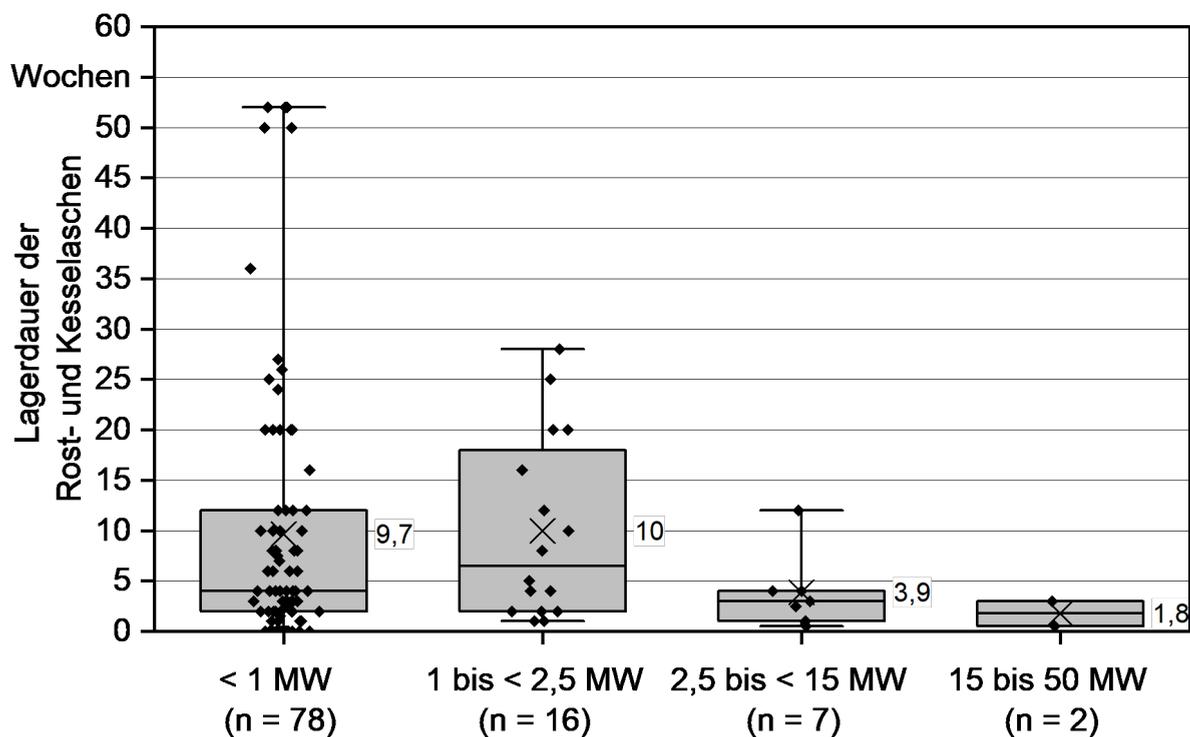


Abbildung 10: Lagerdauer der Rost- und Kesselaschen als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25%- und 75%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker)

Abbildung 10 zeigt Boxplots für die Lagerdauer der Rost- und Kesselaschen in den unterschiedlichen Leistungsklassen. Bei der gewählten Darstellungsweise zeigen die Whisker die Extremwerte an, die Linie in der Box bildet den Median ab und der arithmetische Mittelwert wird mit einem × dargestellt. Die Punkte zeigen die Einzelwerte, die dem Boxplot zugrunde liegen. Gerade im kleinen Leistungsbereich bis 1 MW geben viele Betreiber an, die Aschen nicht zu lagern. Die mittlere Lagerdauer der niedrigsten Leistungsklasse beträgt zehn Wochen. Auch in der nächsthöheren Leistungsklasse von 1 bis 2,5 MW beträgt die mittlere Lagerdauer zehn Wochen, wobei diese zwischen einer Woche und 30 Wochen schwankt. In den beiden höheren Leistungsklassen verkürzt sich die mittlere Lagerdauer auf ca. 3,9 bzw. ca. 1,8 Wochen.

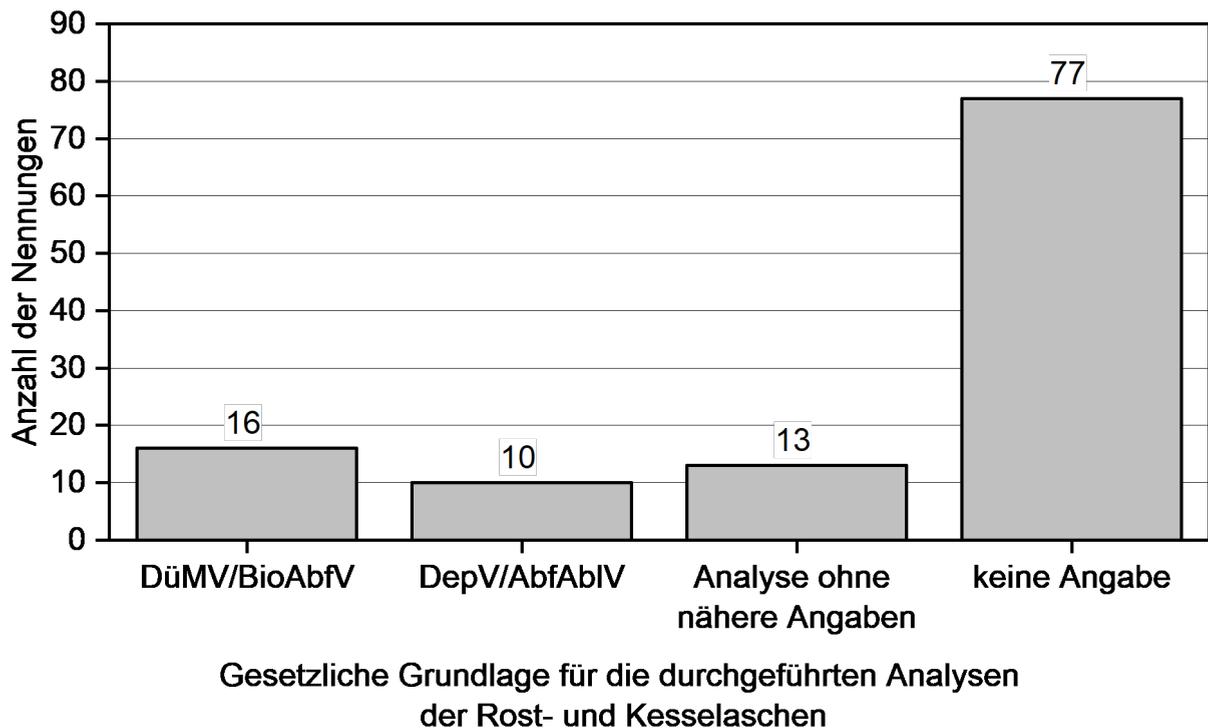


Abbildung 11: Gesetzliche Grundlagen für die durchgeführten Analysen der Rost- und Kesselaschen

Obwohl die Heizwerke naturbelassene Brennstoffe einsetzen, kann der Gehalt an Schwermetallen in der Rost- und Kesselasche oder in der Mischung aus Rost- und Kesselasche mit Zyklonasche die Grenzwerte der Bioabfall- bzw. der Düngemittelverordnung überschreiten (vgl. Kapitel 7). Auch Deponien haben Grenzwerte für bestimmte Inhaltsstoffe von Holzasche. Daher muss für beide Wege – Recycling oder Deponierung – die Qualität der Asche analysiert werden. Die meisten Anlagenbetreiber beantworteten die Frage nach den für sie relevanten gesetzlichen Vorgaben für die Ascheanalyse nicht (Abbildung 11). Insgesamt bei 11 % der Heizwerke wird Rost- und Kesselasche nach den Vorgaben der Deponieverordnung (DepV), bei 7 % nach der Düngemittelverordnung (DüMV) oder der Bioabfallverordnung (BioAbfV) analysiert. Betreiber letztgenannter Anlagen streben folglich an, die Asche zur Düngung oder als Ausgangsstoff für Düngemittel zu verwenden.

Weitere 11 % der Anlagebetreiber gaben an, die Aschen ebenfalls zu analysieren, ohne die gesetzliche Grundlage dafür zu nennen. Der hohe Anteil von 68 %, der keine Angaben zu Ascheanalysen macht, kann Entsorgungskonzepte umfassen, bei denen über den Hausmüll entsorgt wird (kleinere Heizwerke) oder bei denen das beauftragte Entsorgungsunternehmen seinerseits die Ascheanalyse durchführt, um den möglichen Recycling- oder Entsorgungsweg zu bestimmen.

Befragt nach den Hindernissen einer Verwertung von Rostasche haben die Anlagenbetreiber folgende Punkte genannt (häufigste Nennungen zuerst):

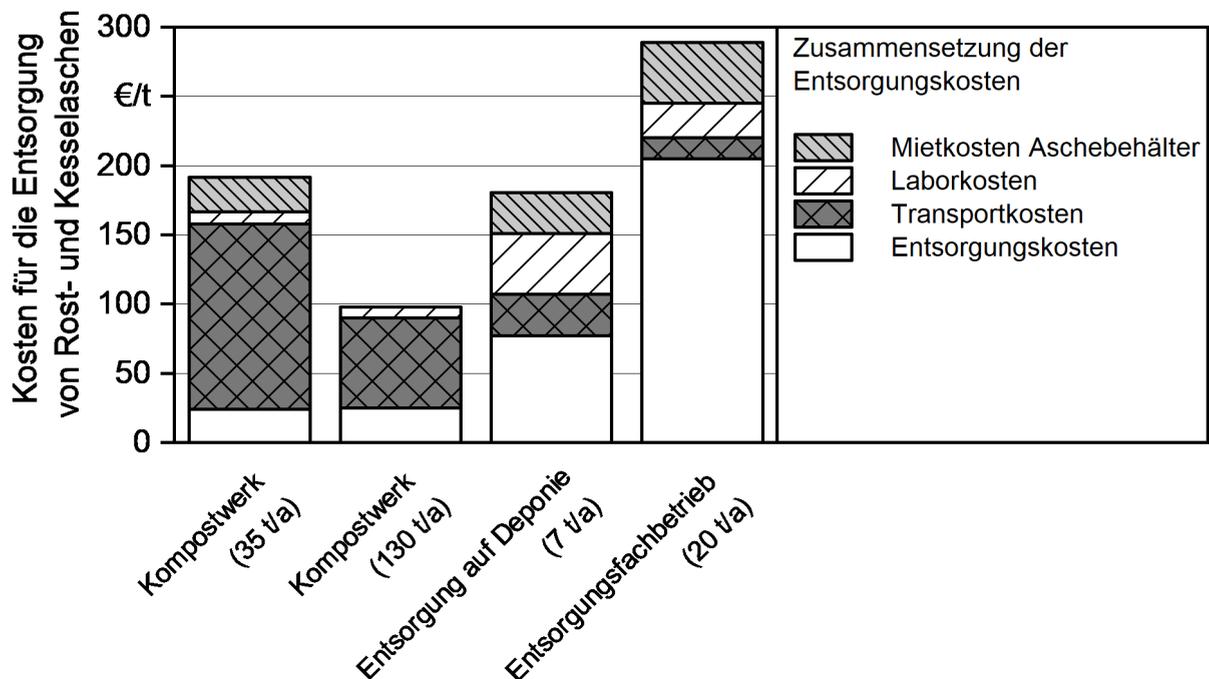
- geringe wirtschaftliche Vorteile wegen hoher Analysekosten und ineffizienter/teurer Logistik erwartet ( $n = 13$ ),
- zu hohe Chrom(VI)-Werte ( $n = 11$ ),
- weitere Schwermetallgehalte zu hoch ( $n = 5$ ),
- geringe Aschemenge ( $n = 5$ ),
- hoher Dokumentationsaufwand befürchtet ( $n = 5$ ),
- geringe Zahl an Ascheverwertern und/oder nur ein kleiner bestehender Markt für Dünger aus Holzasche ( $n = 3$ ),
- schwankende Qualität der Asche ( $n = 2$ ),
- Unsicherheit bezüglich der Gesetzeslage bei der Ascheverwertung ( $n = 2$ ).

Detaillierte Angaben zu den Kosten des Aschemanagements wurden nur in wenigen Fällen gemacht. Abbildung 12 zeigt exemplarisch vier Beispiele von Anlagen, die ihre Kosten detailliert aufschlüsseln konnten. Die Entsorgung erfolgt in den ersten beiden Fällen über eine Verwertung der Aschen, im dritten Fall wird die Asche beseitigt. Wie der Entsorgungsbetrieb im vierten Fall die Asche entsorgt, ist nicht bekannt.

In der ersten und zweiten Spalte sind die Kosten für Abgabe der Asche an ein Kompostwerk aufgeführt. Während die Entsorgungsgebühr bei beiden Biomasseheizwerken in etwa gleich hoch ist, variieren die Transportkosten pro Tonne Asche beträchtlich. Dabei kommt es fast zu einer Verdoppelung der Kosten für das kleinere Heizwerk von 100 €/t auf ca. 200 €/t. Kleinere Anlagen haben oft Probleme, effektive Logistikkonzepte zu etablieren, da nur geringe Mengen an Rost- und Kesselasche anfallen.

Die dritte Säule zeigt die Kostenstruktur einer Anlage, die die Rost- und Kesselasche direkt auf einer Deponie entsorgt. Obwohl nur sieben Tonnen Asche pro Jahr erzeugt werden und die Entsorgungskosten drei Mal höher sind als bei den beiden Verwertungspfaden im Kompostwerk, ergeben sich aufgrund der sehr niedrigen Transportkosten ähnlich hohe Kosten wie in Säule 1. Dass sich allerdings auch die Ascheentsorgungskosten in einem weiten Rahmen bewegen, zeigt Beispiel 4. Hier betragen die Gesamtkosten entsorgter Rost- und Kesselasche fast 300 €/t. Die Asche wird in diesem Fall an einen

Entsorgungsfachbetrieb geliefert. Dieser hat ebenfalls die Wahl, die Asche einer Verwertung oder einer Beseitigung zuzuführen.



#### Abnehmer der Rost- und Kesselasche (Jahrestonnen) von vier Heizwerken

Abbildung 12: Detaillierte Kostenaufstellungen für die Entsorgung von Asche – vier Beispiele

Abbildung 13 veranschaulicht, wie Rost- und Kesselaschen in den verschiedenen Wärmeleistungsklassen typischerweise entsorgt werden. Der Anteil des Ascherecyclings steigt mit installierter Leistung von ca. einem Drittel in den unteren Klassen auf eine 100%ige Recyclingrate für die Anlagen > 15 MW. Die Ausbringung auf eigenen landwirtschaftlichen oder forstlichen Flächen und die Abgabe der Asche an den Brennstofflieferanten wird von Anlagen < 2,5 MW in geringerem Umfang praktiziert. Ascheverwertung in Kompostierungsanlagen ist in allen Leistungsklassen üblich. Die Abgabe an Kalkwerke zur Vermischung mit Kalk erfolgte nur in wenigen Heizwerken < 1 MW. Der Anteil beider Recyclingpfade nimmt mit der installierten Wärmeleistung zu. Bei Anlagen bis zu 15 MW erhöht sich der Anteil der Rost- und Kesselasche, die an Entsorgungsunternehmen abgegeben wird, auf bis zu 50%. In den meisten Fällen leiten diese Entsorgungsunternehmen die Asche auf Deponien weiter. In einzelnen Fällen kann eine stoffliche Verwertung der Aschen auch ohne Wissen des Anlagenbetreibers erfolgen, weshalb die Darstellung keine belastbaren Aussagen zur tatsächlichen Verwertungsquote erlaubt.

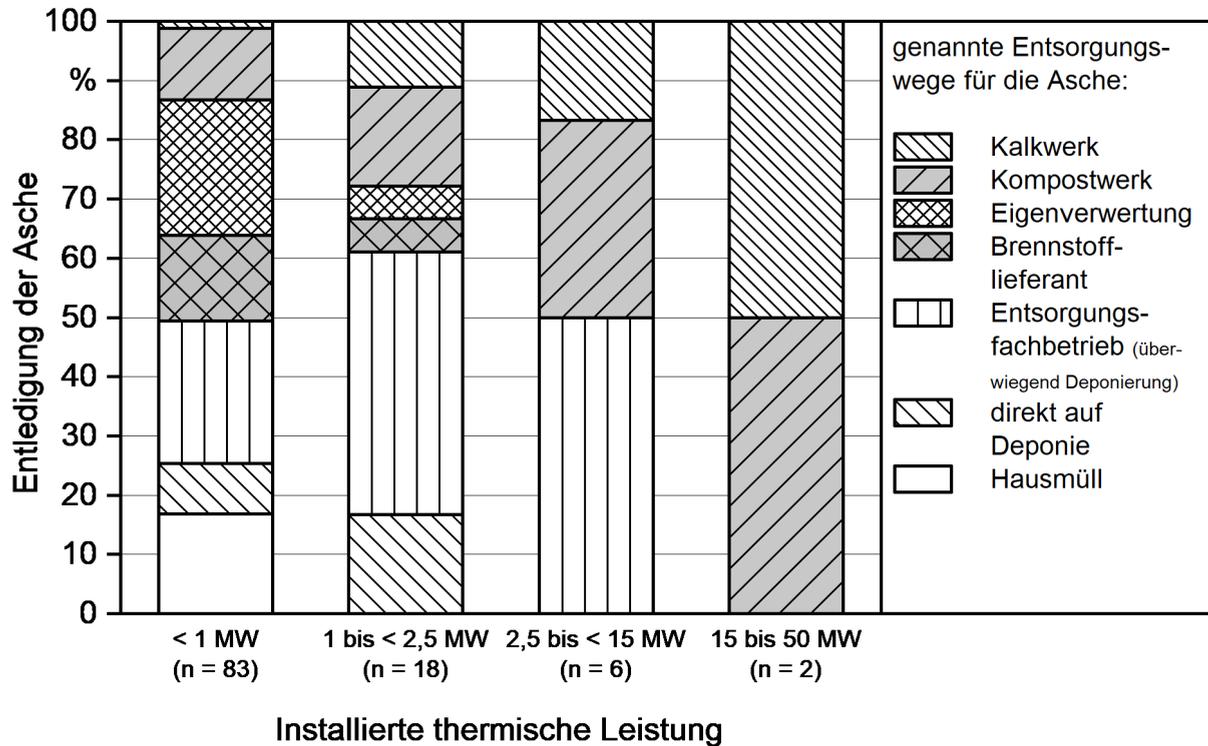


Abbildung 13: Entsorgungswege der Asche in den thermischen Leistungsklassen

#### 6.2.4 Einstellung der Heizwerksbetreiber gegenüber angebotener Aschezertifizierung

Die Heizwerksbetreiber wurden zu ihrer Einstellung gegenüber der Aschezertifizierung durch die Bundesgütegemeinschaft Holzrasche e. V. (RAL Gütezeichen GZ 252) befragt (Abbildung 15). Die Anlagenbetreiber sind gegenüber einer Zertifizierung der Rost- und Kesselasche als „Holz- und Pflanzenasche als Ausgangsstoff für Dünger“ überwiegend entweder positiv (28 %) oder neutral (59 %) eingestellt. Gleichzeitig ist aber den meisten Anlagenbetreibern das Gütezeichen gar nicht bekannt (82 %). Eine Abfrage bezüglich des DLG-Gütesiegels für „Dolomit-Holzrasche-Gemische für die Bodenschutzkalkung“ fand im Rahmen der Umfrage nicht statt, da dieses Zeichen zum Zeitpunkt der Umfrage noch nicht verfügbar war.

In Kommentaren haben einige Betreiber die Befürchtung geäußert, dass einem hohen Aufwand und höheren Kosten für den Erhalt des Gütesiegels gleichzeitig nur ein geringer Mehrwert durch die Zertifizierung der Aschen gegenüberstehe. Insbesondere Betreiber von Anlagen mit nur wenigen Tonnen an Rost- und Kesselasche pro Jahr vertreten diese Meinung. Einzelne Betreiber erwarten sich durch die Zertifizierung ein verbessertes Image und eine Kosteneinsparung.

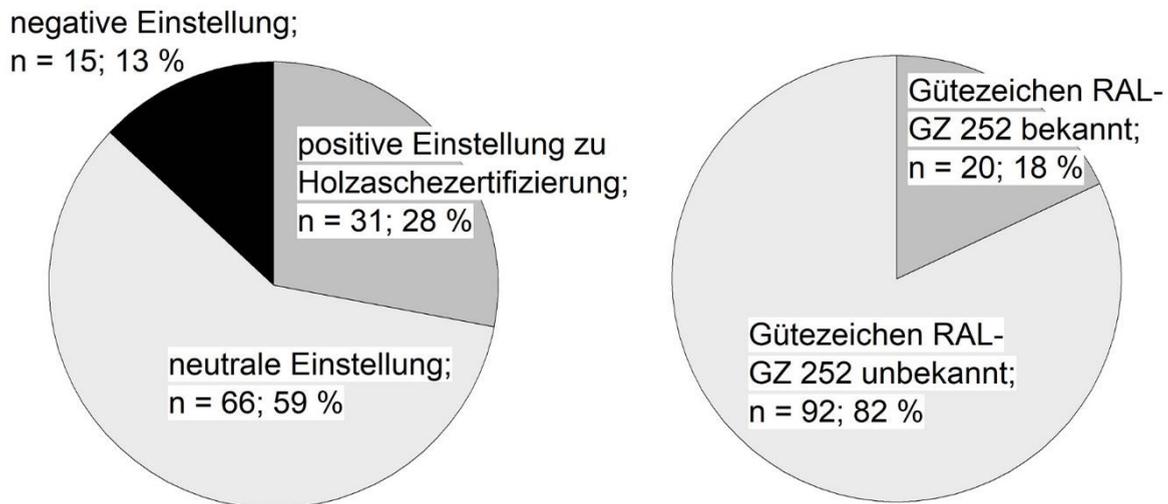


Abbildung 14: Antworten auf die Frage nach der Kenntnis des Gütezeichens RAL-GZ 252 für Rost- und Kesselaschen als Düngemittel und Ausgangsstoff für Düngemittel und Einstellung zur dafür notwendigen Zertifizierung (rechts)

### 6.2.5 Einstellungen und Erfahrungen der Heizwerksbetreiber gegenüber bzw. mit der Verwertung von Rost- und Kesselasche

Am Ende des Fragebogens konnten die Betreiber über Probleme beim Aschemanagement und Erwartungen an eine Verwertung der Rost- und Kesselasche in einem Kommentarfeld berichten. Die Auswertung erfolgte qualitativ. Die Antworten decken sich teilweise mit den Kommentaren zur Aschezertifizierung im vorhergehenden Abschnitt.

Bezüglich der Aschezusammensetzung berichten einige Betreiber von Überschreitungen von Schwermetallgrenzwerten (v. a. Chrom(VI)) und schwankenden Aschequalitäten. Beim Umgang mit den Aschen berichten vereinzelte Betreiber zudem von Problemen mit Schlacke, Klumpenbildung bei feuchter Asche, Staubentwicklung beim Umladen und Problemen wegen nicht konformer Aschebehälter. Auch Unsicherheit über die Rechtslage beim Umgang mit Aschen und hohe Entsorgungskosten wurden genannt.

Gegen eine Ascheverwertung sprechen aus Sicht einzelner Betreiber hohe Analysekosten und ein schlechtes Kosten-Nutzen-Verhältnis, wenn nur geringe Mengen Rost- und Kesselasche erzeugt werden. Darüber hinaus gaben die Betreiber an, dass es nur wenige Abnehmer für Asche zur stofflichen Verwertung gebe und bei direkter Ausbringung keine geeignete Ausbringtechnik zur Verfügung stehe. Weiterhin sei der Düngewert gering und für Fremdstoffe in der Asche müsse gehaftet werden. Einzelne Betreiber befürchteten Einschränkungen bei der Brennstoffauswahl, wenn eine höhere Aschqualität angestrebt werden soll.

Einige Betreiber stehen einer Ascheverwertung hingegen sehr positiv gegenüber und führten als Vorteile Kosteneinsparungen und eine positive öffentliche Wahrnehmung an.

### 6.2.6 Schlussfolgerungen

Obwohl in bayerischen Biomasseheiz(kraft)werken nennenswerte Mengen an Rost- und Kesselasche anfallen, die einer stofflichen Verwertung zugeführt werden könnten, zeigen sich durch die Ergebnisse der Umfrage doch erhebliche Herausforderungen für deren Umsetzung. Diese umfassen u. a. rechtliche Unsicherheiten seitens der Betreiber, schwankende Aschequalitäten und als gering erwartete wirtschaftliche Anreize. Die Recyclinggebühren für Rost- und Kesselasche sind zwar oft niedriger als die Kosten für eine Beseitigung, höhere Transportkosten können diesen Vorteil aber zunichtemachen. Für kleine Anlagen mit geringen Aschemengen ist es bislang wenig attraktiv, Rost- und Kesselasche zu verwerten, da umfangreiche chemische Analysen erforderlich sind und der Transport wenig effizient und daher teuer ist. In diesen Fällen bietet das Aschenrecycling bislang keinen finanziellen Vorteil.

Um das mit dem Projekt „AshUse“ verbundene Ziel einer effizienten Erhöhung der Recyclingrate für Rost- und Kesselaschen zu erreichen, sollte sich der erste Ansatz auf Anlagen im Leistungsbereich von 1 bis 15 MW konzentrieren. Einerseits werden in diesem Leistungsbereich die anfallenden Rostaschen häufig deponiert und andererseits ist die Aschemenge ausreichend groß, um den ggf. höheren Aufwand für Qualitätssicherung und Logistik durch verminderte Entsorgungskosten zu decken.

## 7 Bewertung der Nährstoff- und Schwermetallgehalte bayerischer Holzaschen

In diesem Kapitel 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 sowie reine Zyklonaschen untersucht. Am Heizwerk des TFZ wurde die Verteilung der Ascheinhaltsstoffe auf die Rost- und Kesselasche und die Zyklonasche durch parallele Beprobungen sowie die Qualitätsschwankungen innerhalb einer Heizperiode näher betrachtet.

Wie die in Kapitel 6 dargestellte Umfrage bayerischer Heizwerkbetreiber ergeben hat, ist die Verwertung von Rost- und Kesselaschen als Düngemittel bzw. als Ausgangsstoff für Düngemittel ein zumindest teilweise schon etablierter Verwertungspfad in Bayern. Eine wichtige Voraussetzung für diese Art der Verwertung ist die Einhaltung der Schwermetallgrenzwerte in der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV) sowie der 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) eingehalten werden [20]. Tabelle 1 in Kapitel 4 fasst diese Grenzwerte zusammen. Die DüMV enthält darüber hinaus noch Grenzwerte für organische Verbindungen (perfluorierte Tenside, Dioxine und dioxinähnliche Stoffe, siehe Tabelle 1). Diese Gehalte wurden im vorliegenden Projekt nicht untersucht, da sie üblicherweise in Aschen aus Biomasseheiz(kraft)werken nicht enthalten sind [38]. Dies gilt nicht für Rückstände von Holzvergasungsanlagen, bei denen die organischen Schadstoffe erhöht sein können [39]. Rückstände von Holzvergasungsanlagen sind allerdings nicht Bestandteil der vorliegenden Untersuchung, weshalb auf organische Schadstoffe nicht weiter eingegangen wird.

### 7.1 Material und Methoden

#### 7.1.1 Auswahl der zu beprobenden Biomasseheiz(kraft)werke

Die zu beprobenden Heiz(kraft)werke wurden basierend auf den Angaben im Fragebogen (Kapitel 6) ausgewählt. Drei Kriterien wurden zur Auswahl herangezogen:

- eine installierte Feuerungswärmeleistung  $> 1 \text{ MW}_{\text{therm}}$ ,
- Interesse des Betreibers an Ascheverwertung und
- vorherige Zustimmung des Betreibers zu einer Ascheprobeentnahme am Heizwerk.

Insgesamt wurden 18 Heizwerke mit einer installierten Feuerungswärmeleistung  $> 1 \text{ MW}_{\text{therm}}$  sowie eine Aschesammelstelle mehrerer kleiner Heizwerke für die Beprobung ausgewählt. Die Qualität der Aschen kann aufgrund unterschiedlicher Brennstoffe, Anlagentypen oder Betriebsparameter der Feuerung variieren. An den meisten Standorten wurden reine Rost- und Kesselaschen und in einigen Fällen auch Mischungen aus Rost- und Kesselaschen mit Zyklonaschen beprobt.

### 7.1.2 Vorgehensweise bei der Probenahme und Analyse

Um aussagekräftige Analyseergebnisse zu erhalten, war es notwendig, aus den jeweils an den Heizwerken gelagerten Aschen eine Mischprobe zu erstellen. Die Probenahme erfolgte direkt am Heizwerk gemäß der Probenahmевorschrift LAGA PN 98 [4] 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 0,5 bis 10 Liter. Proben fein gekörnter Aschen haben ein niedrigeres Mindestvolumen als grobkörnige Aschen. Die Mindestanzahl der Einzelproben ergibt sich aus der Grundmenge der gelagerten Rost- und Kessel- bzw. Zyklonasche. Bis zu einem Volumen von 30 m<sup>3</sup> sollen nach LAGA PN 98 beispielsweise mindestens acht Einzelproben gezogen werden.

Bei den Probenahmen an den Heizwerken wurden die Einzelproben fotografisch festgehalten (Abbildung 15). 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 Viertel wurden verworfen. Die beiden übrigen Viertel wurden erneut zusammengeführt und sorgfältig durchmischt und daraus die Laborprobe gezogen. Jede Probenahme wurde auf einem Probenahmeprotokoll dokumentiert.

Eine Ausnahme hinsichtlich der Probenahme bildet das TFZ-eigene Heizwerk, bei dem die Schwankung der Aschequalität innerhalb einer Heizperiode und die Aufteilung der Ascheinhaltsstoffe zwischen Rostasche und Zyklonasche im Fokus standen. Aus diesem Grund wurden keine Mischproben des gesamten Aschecontainers des TFZ erstellt. Stattdessen wurden gezielt Ascheproben gewonnen, die einer Reihe ausgewählter Brennstoffchargen zugeordnet werden konnten. Mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test, einem nicht parametrischen Test für zwei gepaarte Stichproben, wurden die Elementgehalte in den Rost- und Kesselaschen mit den Gehalten in der Zyklonaschen verglichen und auf signifikante Unterschiede hin untersucht.

Um bei der Auswertung der Rost- und Kesselaschen des TFZ-Heizwerks im Vergleich mit den übrigen Heizwerken eine Verzerrung der Ergebnisse zu vermeiden, wurden die Ergebnisse des TFZ-Heizwerks durch Mittelwertbildung zu einer theoretischen Mischprobe für die gesamte Heizperiode zusammengefasst.



Abbildung 15: Probenahme von Rost- und Kesselasche nach LAGA PN 98 [4]

Alle Proben wurden vom Labor der 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) zudem die Gehalte der Mikronährstoffe Kobalt (Co), Eisen (Fe), Mangan (Mn), Molybdän (Mo), Natrium (Na) und Selen (Se). 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.

Bei Analyseergebnissen, die unter der Nachweis- bzw. Bestimmungsgrenze lagen, wurde jeweils die unterschrittene Konzentration als Analyseergebnis gesetzt. Die Untersuchungsmethode umfasste u. a. die Königswasserextraktion nach DIN EN 13657:2003-01, die ICP-OES-Messung nach DIN EN 11885:2009-09 bzw. eine ICP-MS-Messung nach VDLUFA-MB VII, 2.2.3.3:2019-03. Chrom(VI) wurde nach VDLUFA-MB II.1, 9.4.2 bestimmt. In einem Ringversuch von LEITERER et al. (2020) [28] wurde nachgewiesen, dass diese Analysemethoden gut reproduzierbare Ergebnisse für die Inhaltsstoffe von Pflanzenaschen liefern. Abweichende Ergebnisse gab es nur bei den in wässrigen Ascheextrakten bestimmten Chrom(VI)-Gehalten.

### 7.1.3 Probenahmestellen

Insgesamt wurden 50 Ascheproben an 18 Heiz(kraft)werken und an einer Aschesammelstelle mehrerer kleinerer Heizwerke gezogen (Tabelle 6). 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.

An zehn Anlagen (Heiz(kraft)werke Nr. 2 bis Nr. 11 und Nr. 18) erfolgte die Probenahme in zwei unterschiedlichen Heizperioden (2018/2019 sowie 2019/2020). Sieben Anlagen und das Aschesammellager wurden nur einmal beprobt. Am TFZ-eigenen Heizwerk (Heizwerk Nr. 1) wurde über eine gesamte Heizperiode hinweg eine Serie von insgesamt 20 Ascheproben gewonnen (zwölfmal Rost- und Kesselaschen, achtmal Zyklonaschen, siehe Tabelle 6).

Für die vergleichende Auswertung der Rost- und Kesselaschen in Bayern wurde für das TFZ-Heizwerk der Mittelwert der Einzelproben berechnet. Die weiteren Rost- und Kesselascheproben werden als unabhängig betrachtet, da Proben zwar vom selben Heizwerk, allerdings aus unterschiedlichen Heizperioden stammen. In der Diskussion wird jedoch darauf hingewiesen, inwieweit sich bestimmte Parameter (z. B. Grenzwertüberschreitungen) bei mehrfacher Probenahme wiederholten.

Das Heiz(kraft)werk Nr. 6 verfügt über zwei Kessel mit getrennter Ascheerfassung, die bei der ersten Probenahme gemeinsam beprobt wurden. Einer der Kessel wurde zwischen den beiden Heizperioden von getrennter Sammlung der Rost- und Kesselasche und der Zyklonasche auf eine gemeinsame Entaschung umgebaut. Aus diesem Grund wurden für diese Anlage bei der zweiten Probenahme die Kessel separat beprobt, einmal die reine Rost- und Kesselasche (Kessel 1) und im anderen Fall eine Mischung aus Rost-, Kessel- und Zyklonasche (Kessel 2). An drei weiteren Probenahmestellen wurden gezielt Gemische aus Rost- und Kesselasche mit Zyklonasche beprobt: Beim Heiz(kraft)werk Nr. 12 wurde bei der ersten Probenahme eine Mischung aus Rost- und Zyklonasche beprobt. Beim Heiz(kraft)werk Nr. 18 wurden anlagenbedingt die Zyklon- sowie die Rost- und Kesselasche gemeinsam gesammelt. In einem Fall wurde ein gemeinsames Aschelager verschiedener kleinerer Heizwerke beprobt. Die dort gesammelten Aschen bestanden aus einem Gemisch aus Rost-, Kessel- und Zyklonaschen.

*Tabelle 6: Übersicht der Probenahmen der Rost- und Kesselaschen, der Gemische aus Rost-, Kessel- und Zyklonaschen sowie der reinen Zyklonaschen (die zwölf Einzelproben der Rost- und Kesselasche vom TFZ-Heizwerk wurden rechnerisch zu einer Probe gemittelt; daraus resultieren die Angaben in Klammern)*

| Probenahmeort                         | Rost- und Kesselasche | Gemisch aus Rost- und Kesselasche mit Zyklonasche | Zyklonasche |
|---------------------------------------|-----------------------|---|-------------|
| Heiz(kraft)werk Nr. 1 (TFZ)           | 12 (1)1               | –   | 8           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 2                 | 1                     | –   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 3                 | 2                     | –   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 4                 | 2                     | –   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 5                 | 2                     | –   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 6                 | 2                     | 1   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 7                 | 2                     | –   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 8                 | 2                     | –   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 9                 | 2                     | –   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 10                | 2                     | –   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 11                | 2                     | –   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 12                | 1                     | 1   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 13                | 1                     | –   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 14                | 1                     | –   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 15                | 1                     | –   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 16                | 1                     | –   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 17                | 1                     | –   | –           |
| Heiz(kraft)werk Nr. 18                | –                     | 2   | –           |
| Aschesammelstelle kleinerer Heizwerke | –                     | 1   | –           |
| Summe                                 | 37 (26)               | 5   | 8           |

<sup>1</sup> Die zwölf Einzelproben der Rost- und Kesselasche vom TFZ-Heizwerk wurden rechnerisch zu einer Probe gemittelt. Daraus resultieren die Angaben in Klammern.

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

### **7.2.1 Qualität der Rost- und Kesselaschen**

Die Analyse der Aschen umfasste Schwermetalle, Nährstoffe, pH-Wert, Wassergehalt und Glühverlust. Tabelle 7 fasst die Ergebnisse für die Rost- und Kesselaschen zusammen. Neben den Analyseergebnissen sind auch die Überschreitungen der Grenzwerte der BioAbfV und der DüMV für ackerbauliche und forstliche Anwendung angegeben (vgl. Tabelle 1). Zunächst sollen die Ergebnisse zu den Schwermetallen näher betrachtet werden.

**Tabelle 7:** Analyseergebnisse für 26 Rost- und Kesselaschen aus bayerischen Heizwerken mit einer installierten Leistung > 1 MW (TM = Trockenmasse)

| Parameter  | Einheit  |       |            |        |            |            |        |                                    |                                    |                                 |
|--|----------|-------|------------|--------|------------|------------|--------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
|  |          | Min   | 1. Quantil | Median | Mittelwert | 3. Quantil | Max    | Anzahl Überschreitung DüMV (Acker) | Anzahl Überschreitung DüMV (Forst) | Anzahl Überschreitung (BioAbfV) |
| Arsen (As)                                       | mg/kg TM | 5,0   | 5,0        | 5,0    | 6,5        | 5,6        | 27,0   | 0                                  | 0                                  | –                               |
| Blei (Pb)  | mg/kg TM | 2,0   | 2,8        | 5,0    | 20,2       | 11,0       | 260,0  | 1                                  | 1                                  | 1                               |
| Cadmium (Cd)                                     | mg/kg TM | 0,2   | 0,4        | 0,4    | 1,0        | 1,2        | 4,8    | 3                                  | 3                                  | 3                               |
| Chrom (Cr)                                       | mg/kg TM | 29,0  | 39         | 45     | 59         | 58         | 200    | –                                  | –                                  | 4                               |
| Chrom(VI) (Cr(VI))                               | mg/kg TM | 1,0   | 1,3        | 2,7    | 7,2        | 5,5        | 42,3   | 16                                 | –                                  | –                               |
| Kupfer (Cu)                                      | mg/kg TM | 5,8   | 39         | 60     | 64         | 90         | 150    | 0                                  | 0                                  | 5                               |
| Nickel (Ni)                                      | mg/kg TM | 18,0  | 28         | 37     | 37         | 43         | 78     | 0                                  | 0                                  | 2                               |
| Quecksilber (Hg) <sup>1</sup>                    | mg/kg TM | 0,1   | 0,1        | 0,1    | 0,1        | 0,1        | 0,1    | 0                                  | 0                                  | 0                               |
| Thallium (Tl)                                    | mg/kg TM | 0,2   | 0,2        | 0,2    | 0,3        | 0,4        | 0,8    | 0                                  | 0                                  | 0                               |
| Zink (Zn)  | mg/kg TM | 26    | 95         | 145    | 205        | 250        | 900    | 0                                  | 0                                  | 4                               |
| Kalk (CaO)                                       | m-% TM   | 15,0  | 18,5       | 24,0   | 28,9       | 37,5       | 56,0   | –                                  | –                                  | –                               |
| Basisch wirks. Stoffe (CaO)                      | m-% TM   | 15,5  | 23,5       | 30,1   | 32,9       | 33,5       | 75,2   | –                                  | –                                  | –                               |
| Phosphat gesamt (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | m-% TM   | 0,9   | 2,1        | 2,6    | 2,6        | 3,1        | 5,2    | –                                  | –                                  | –                               |
| Kaliumoxid ges. (K <sub>2</sub> O)               | m-% TM   | 2,3   | 4,6        | 6,3    | 6,3        | 7,5        | 12,0   | –                                  | –                                  | –                               |
| Magnesiumoxid ges. (MgO)                         | m-% TM   | 1,4   | 2,4        | 3,9    | 3,9        | 4,5        | 10,0   | –                                  | –                                  | –                               |
| 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) <sup>1</sup>                          | 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    | –                                  | –                                  | –                               |

### 7.2.1.1 Schwermetalle

Die gemessenen Schwermetallkonzentrationen in den Rost- und Kesselaschen sind grafisch aufbereitet in Abbildung 16 zusammengefasst. Je Element sind die Einzelergebnisse als Punktwolke und als Boxplot mit Minimum und Maximum dargestellt. Die zwölf Ascheproben des TFZ-Heizwerks gehen 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 sind die Grenzwerte für landwirtschaftliche und forstliche Anwendung nach DüMV und die Grenzwerte der BioAbfV eingezeichnet (vgl. Tabelle 1).

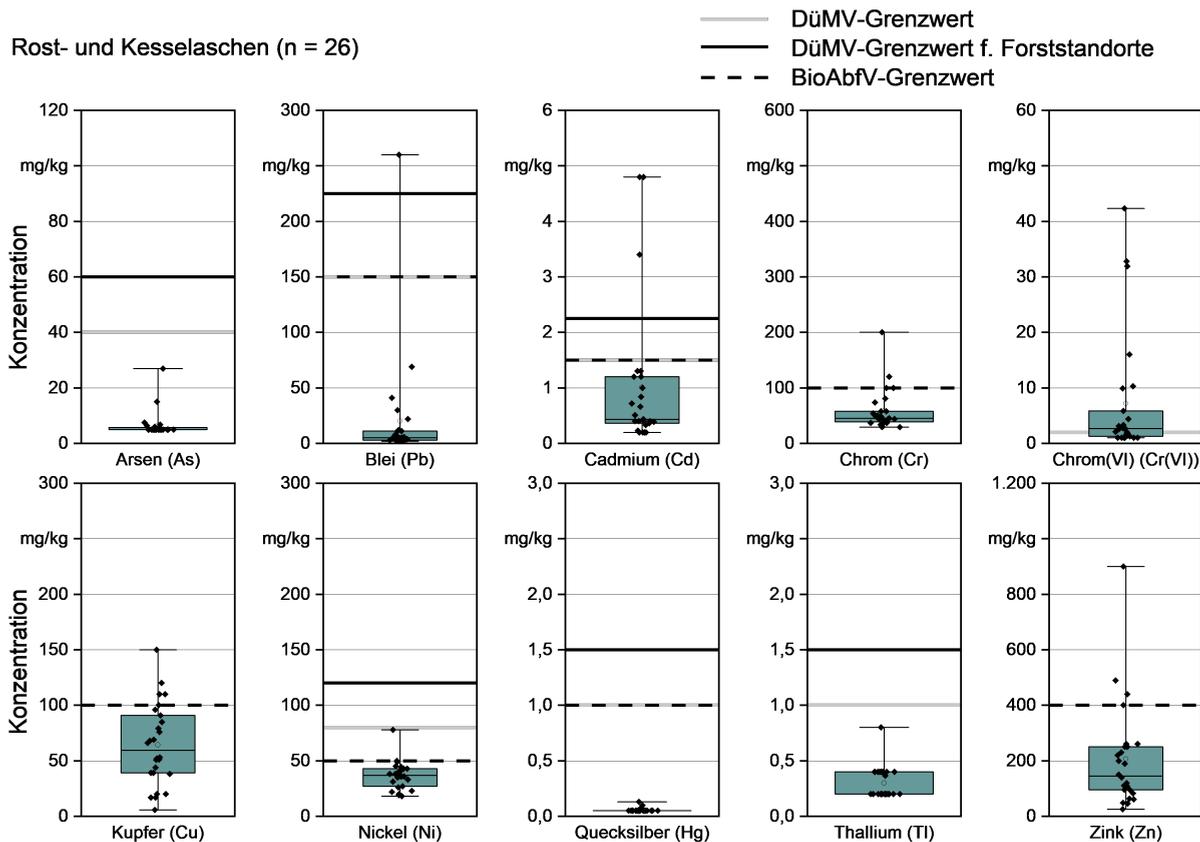


Abbildung 16: Schwermetallgehalte (auf wasserfreier Bezugsbasis) der 26 Rost- und Kesselaschen als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25%- und 75%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker) (horizontale Linien geben die jeweiligen Grenzwerte nach DüMV und BioAbfV wieder)

Abbildung 17 zeigt die eingehaltenen und überschrittenen Grenzwerte in der DüMV und der BioAbfV als prozentuale Anteile der Gesamtprobenzahl ( $n = 26$ ).

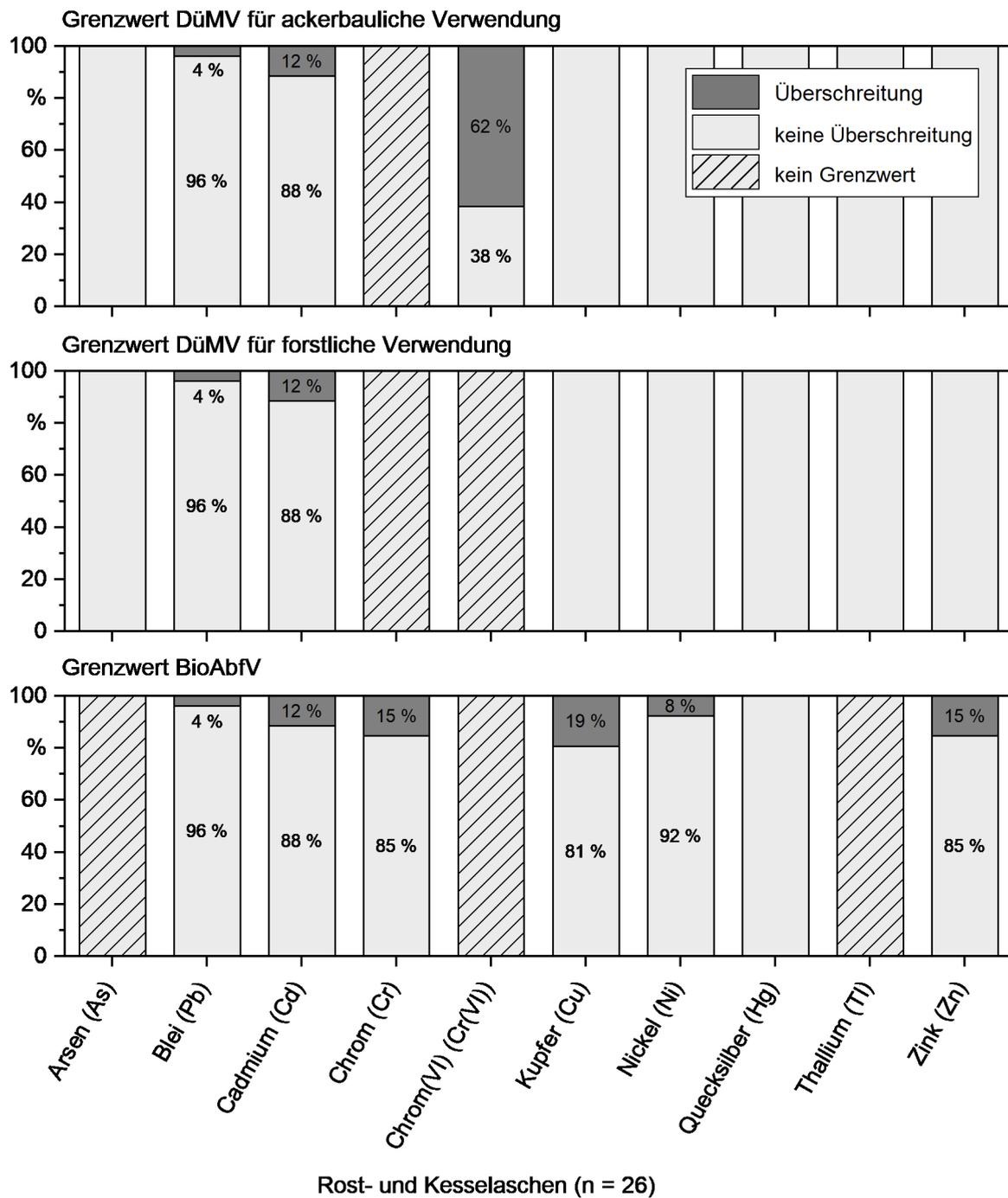


Abbildung 17: Relative Häufigkeit der eingehaltenen und überschrittenen Grenzwerte nach DüMV für ackerbauliche und forstliche Anwendung sowie nach Bio-AbfV in den beprobten Rost- und Kesselaschen

Die zulässigen Werte der DüMV werden in einem Fall für Blei (3 %) und in drei Fällen für Cadmium (8 %) überschritten (Abbildung 17). Diese Überschreitungen gelten sowohl für die ackerbauliche als auch die forstliche Anwendung, obwohl für Letztere 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 von REICHLÉ et al. (2009) [38], 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. Aus diesem Grund kommt es hier zu Überschreitungen bei Kupfer (19 %,  $n = 5$ ), Nickel (8 %,  $n = 2$ ) und Zink (15 %,  $n = 4$ ).

Zehn Heizwerke wurden doppelt beprobt (Tabelle 8). Nur zwei Heizwerke halten in beiden Proben den Grenzwert für Chrom(VI) ein. Dabei handelt es sich um Anlagen mit Nass-entäschung, wohingegen alle anderen Anlagen trocken entaschen. Hier überschreitet mindestens eine Probe je Heizwerk den Grenzwert für Chrom(VI). Bei drei Anlagen wird 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 [11].

Der Grenzwert für Cadmium wurde von zwei Anlagen überschritten. Dabei kam es bei einer Anlage in beiden Proben zu einer Überschreitung. Die Betreiber der anderen Anlage stellten hingegen zwischen den beiden Probenahmen eine undichte Stelle in der Rahmenkühlung des Rosts 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 kein überhöhtes Cadmium 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) [42] zeigen, korreliert sowohl der Zink- als auch der Cadmiumgehalt in Rostaschen negativ mit der Brennraumtemperatur. Das Auftreten hoher Gehalte dürfte also mit niedrigen Brennraumtemperaturen zusammenhängen.

Insgesamt hielten nur acht der beprobten Rost- und Kesselaschen alle Schwermetallgrenzwerte nach DüMV und BioAbfV ein (Tabelle 8). Geht man davon aus, dass sich Chrom(VI) durch geeignete Aufbereitungsmaßnahmen, z. B. durch Anfeuchten der Aschen, ausreichend stark reduzieren lässt (vgl. Abschnitt 3.2), würden 85 % der Aschen ( $n = 22$ ) die weiteren Grenzwerte der DüMV einhalten. Insgesamt 54 % der Aschen ( $n = 14$ ) halten zusätzlich auch die Anforderungen der BioAbfV hinsichtlich der maximal zulässigen Schwermetallkonzentrationen ein.

**Tabelle 8:** Auswertung der Grenzwertüberschreitungen bei Schwermetallen in Rost- und Kesselaschen nach DüMV (hellgrau) und BioAbfV (dunkelgrau) bezogen auf Heizwerke und Einzelproben (Schwermetalle ohne Überschreitungen und TFZ-Heizwerk nicht angezeigt)

| Heiz(kraft)werk Nr. | Probe Nr. | Blei (Pb) | Cadmium (Cd) | Chrom(VI) (Cr(VI)) | Kupfer (Cu) | Nickel (Ni) | Zink (Zn) |
|---------------------|-----------|-----------|--------------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
| 1                   | 1         |           |              |                    |             |             |           |
| 2                   | 1         |           |              |                    |             |             |           |
| 3                   | 1         |           |              |                    |             |             |           |
|                     | 2         |           |              |                    |             |             |           |
| 4                   | 1         |           |              |                    |             |             |           |
|                     | 2         |           |              |                    |             |             |           |
| 5                   | 1         |           |              |                    |             |             |           |
|                     | 2         |           |              |                    |             |             |           |
| 6                   | 1         |           |              |                    |             |             |           |
|                     | 2         |           |              |                    |             |             |           |
| 7                   | 1         |           |              |                    |             |             |           |
|                     | 2         |           |              |                    |             |             |           |
| 8                   | 1         |           |              |                    |             |             |           |
|                     | 2         |           |              |                    |             |             |           |
| 9                   | 1         |           |              |                    |             |             |           |
|                     | 2         |           |              |                    |             |             |           |
| 10                  | 1         |           |              |                    |             |             |           |
|                     | 2         |           |              |                    |             |             |           |
| 11                  | 1         |           |              |                    |             |             |           |
|                     | 2         |           |              |                    |             |             |           |
| 12                  | 1         |           |              |                    |             |             |           |
| 13                  | 1         |           |              |                    |             |             |           |
| 14                  | 1         |           |              |                    |             |             |           |
| 15                  | 1         |           |              |                    |             |             |           |
| 16                  | 1         |           |              |                    |             |             |           |
| 17                  | 1         |           |              |                    |             |             |           |

### 7.2.1.2 Nährstoffe und weitere Parameter

In Rost- und Kesselaschen ist eine Vielzahl von 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 Abbildung 18 als Punktwolken sowie als Boxplots dargestellt. Die Gehalte der darüber hinaus enthaltenen Spurennährstoffe und weitere Parameter zeigt Tabelle 7.

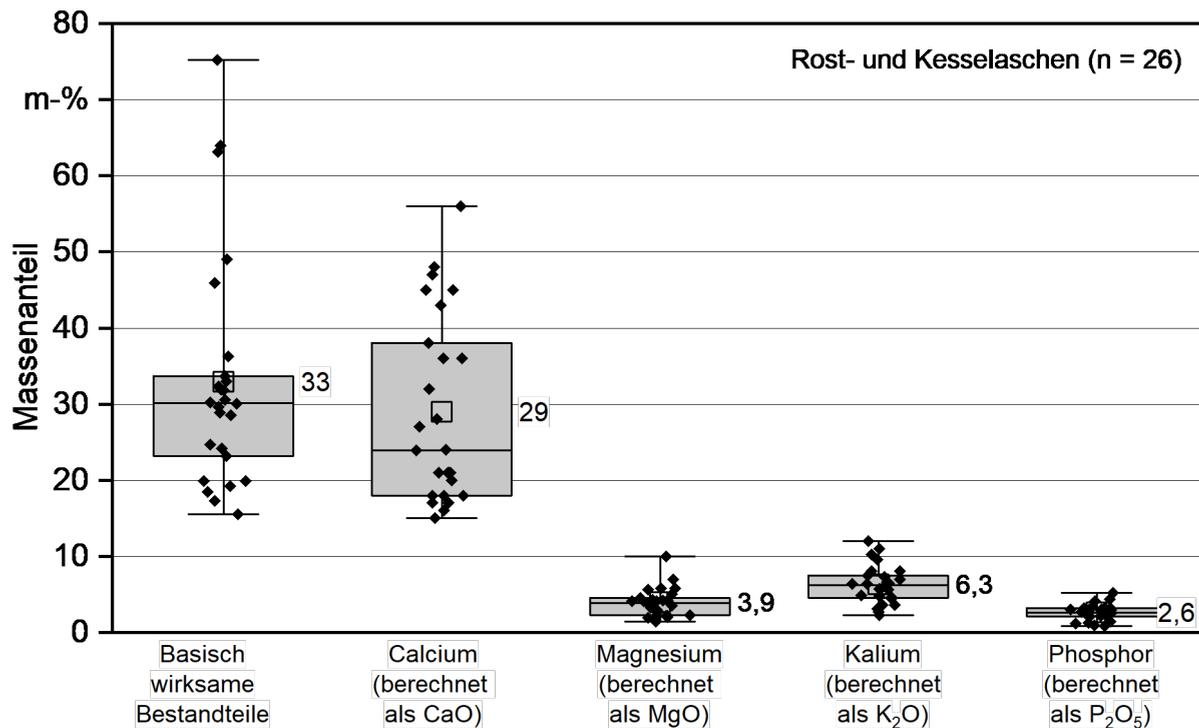


Abbildung 18: Hauptnährstoffe der 26 Rost- und Kesselaschen (bezogen auf die Trockenmasse) als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25%- und 75%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker) (Zahlen neben den Boxplots sind jeweils die Mittelwerte)

Laut REICHLÉ ET AL. (2009) [38] liegen die durchschnittlichen Nährstoffgehalte von Rost- und Kesselaschen aus der Verbrennung von Holz bei 25 bis 45 m-% TM Calciumoxid (CaO), jeweils 3 bis 6 m-% TM Kalium- und Magnesiumoxid ( $K_2O$ , MgO) und 2 bis 3 m-% TM Phosphat ( $P_2O_5$ ). Für CaO, MgO und  $P_2O_5$  liegt auch die Mehrheit der hier analysierten Rost- und Kesselaschen in diesem Bereich. Höhere Werte wurden aber für Kaliumoxid gemessen. Hier liegt der Mittelwert bei 6,3 m-% TM und 50 % der Analyseergebnisse liegen zwischen 4,5 und 7,5 m-% TM (25 %- und 75 %-Quantil). OBERNBERGER (1997) [33] gibt als Durchschnittswert für den Gehalt von Kaliumoxid in zwölf Rostaschen aus der Verbrennung von Holzhackschnitzeln ebenfalls einen höheren Wert als das LfU an, nämlich 6,7 m-% TM. Der mittlere Phosphatgehalt liegt bei OBERNBERGER [33] 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“ [12] für Feuerraumaschen aus der Verbrennung von Biomasse von großen Schwankungsbereichen zwischen 0,2 und 14,4 m-% TM für  $K_2O$  bzw. 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  $P_2O_5$  sind wiederum gut mit den in Abbildung 18 wiedergegebenen eigenen Werten vergleichbar.

Die pH-Werte der untersuchten Aschen variieren von pH 12,3 (Minimum) bis pH 13,3 (Maximum) (Tabelle 7). Sie schwanken damit recht eng um den Mittelwert von pH 12,8 und liegen innerhalb der Bandbreite von pH 11 bis pH 13, die REICHLE et al. (2009) [38] für Holzaschen angeben.

Die meisten Aschen waren sehr trocken (Median = 0,5 m-% Wassergehalt). Nur die beiden Anlagen mit Nassentaschung heben den mittleren Wassergehalt auf 6,2 m-%. Bei den nass entaschenden Anlagen variiert der Wassergehalt zwischen 21 und 33 m-%.

Die meisten Aschen sind komplett ausgebrannt und weisen einen geringen Glühverlust auf. Dieser betrug im Mittel 0,6 m-% und erreichte maximal 3,6 m-%. Damit blieben alle Aschen unter dem Wert von 5 m-%. Unterhalb dieses Werts kann davon ausgegangen werden, dass sich keine organischen Schadstoffe in der Asche befinden [38].

### **7.2.2 Qualität der Rost- und Kesselaschen des TFZ-Heizwerks**

Tabelle 9 fasst die Ergebnisse der zwölf Rost- und Kesselascheproben aus dem TFZ-Heizwerk zusammen. Diese Proben wurden gezielt nach wechselnden Brennstoffchargen gezogen, um den typischen Einfluss einer ständig wechselnden Brennstoffqualität innerhalb einer Heizperiode darstellen zu können.

**Tabelle 9:** Analyseergebnisse von zwölf Rost- und Kesselaschen aus dem TFZ-Heizwerk mit einer installierten Leistung  $2 \times 650 \text{ kW}_{\text{therm}}$ . Grau hinterlegte Felder kennzeichnen eine Erhöhung der Gehalte in den Rost- und Kesselaschen des TFZ im Vergleich mit der Übersicht aller Heizwerke (siehe Tabelle 7)

| Parameter  | Einheit  |        |            |        |            |            |        |                                    |                                    |                                 |
|--|----------|--------|------------|--------|------------|------------|--------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
|  |          | Min    | 1. Quantil | Median | Mittelwert | 3. Quantil | Max    | Anzahl Überschreitung DüMV (Acker) | Anzahl Überschreitung DüMV (Forst) | Anzahl Überschreitung (BioAbfV) |
| Arsen (As) <sup>1</sup>                          | mg/kg TM | 5,0    | 5,0        | 5,0    | 5,0        | 5,0        | 5,0    | 0                                  | 0                                  | –                               |
| Blei (Pb) <sup>1</sup>                           | mg/kg TM | 2,0    | 5,0        | 5,0    | 4,7        | 5,0        | 5,0    | 0                                  | 0                                  | 0                               |
| Cadmium (Cd)                                     | mg/kg TM | 0,2    | 0,4        | 0,4    | 0,4        | 0,5        | 0,6    | 0                                  | 0                                  | 0                               |
| Chrom (Cr)                                       | mg/kg TM | 30,0   | 36         | 40     | 40         | 45         | 49     | –                                  | –                                  | 0                               |
| Chrom(VI) (Cr(VI))                               | mg/kg TM | 1,0    | 1,2        | 1,8    | 2,0        | 2,2        | 5,1    | 4                                  | –                                  | –                               |
| Kupfer (Cu)                                      | mg/kg TM | 4,2    | 14         | 41     | 51         | 74         | 140    | 0                                  | 0                                  | 2                               |
| Nickel (Ni)                                      | mg/kg TM | 26,0   | 40         | 46     | 45         | 50         | 57     | 0                                  | 0                                  | 3                               |
| Quecksilber (Hg) <sup>1</sup>                    | mg/kg TM | 0,1    | 0,1        | 0,1    | 0,1        | 0,1        | 0,1    | 0                                  | 0                                  | 0                               |
| Thallium (Tl) <sup>1</sup>                       | mg/kg TM | 0,2    | 0,4        | 0,4    | 0,4        | 0,4        | 0,4    | 0                                  | 0                                  | 0                               |
| Zink (Zn)  | mg/kg TM | 61     | 82         | 110    | 110        | 125        | 190    | 0                                  | 0                                  | 0                               |
| Kalk (CaO)                                       | m-% TM   | 13,0   | 17,8       | 24,5   | 23,9       | 28,3       | 37,0   | –                                  | –                                  | –                               |
| Basisch wirks. Stoffe (CaO)                      | m-% TM   | 17,6   | 25,2       | 35,4   | 33,7       | 40,8       | 50,1   | –                                  | –                                  | –                               |
| Phosphat gesamt (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | m-% TM   | 2,0    | 2,3        | 2,6    | 3,2        | 3,5        | 7,6    | –                                  | –                                  | –                               |
| Kaliumoxid ges. (K <sub>2</sub> O)               | m-% TM   | 6,6    | 7,9        | 9,4    | 10,2       | 12,5       | 16,0   | –                                  | –                                  | –                               |
| Magnesiumoxid ges. (MgO)                         | m-% TM   | 2,8    | 3,4        | 4,4    | 4,2        | 4,8        | 5,6    | –                                  | –                                  | –                               |
| Schwefel gesamt (S)                              | m-% TM   | 0,1    | 0,1        | 0,1    | 0,1        | 0,1        | 0,2    | –                                  | –                                  | –                               |
| Bor (B)  | mg/kg TM | 140    | 178        | 210    | 208        | 250        | 270    | –                                  | –                                  | –                               |
| Eisen (Fe)                                       | mg/kg TM | 11.000 | 14.000     | 16.500 | 26.083     | 20.000     | 81.000 | –                                  | –                                  | –                               |
| Kobalt (Co)                                      | mg/kg TM | 8,4    | 19,5       | 22,5   | 22,4       | 25,8       | 33,0   | –                                  | –                                  | –                               |
| Mangan (Mn)                                      | mg/kg TM | 3.900  | 13.000     | 18.500 | 17.567     | 22.500     | 26.000 | –                                  | –                                  | –                               |
| Molybdän (Mo)                                    | mg/kg TM | 2,0    | 2,0        | 2,1    | 2,6        | 2,5        | 5,0    | –                                  | –                                  | –                               |
| Natrium (Na)                                     | mg/kg TM | 2.900  | 3.400      | 3.900  | 4.442      | 5.575      | 6.500  | –                                  | –                                  | –                               |
| Selen (Se) <sup>1</sup>                          | mg/kg TM | 5,0    | 5,0        | 5,0    | 5,0        | 5,0        | 5,0    | –                                  | –                                  | –                               |
| pH-Wert  |          | 12,4   | 12,6       | 12,7   | 12,7       | 12,8       | 13,1   | –                                  | –                                  | –                               |
| Wassergehalt                                     | m-%      | 0,0    | 0,0        | 0,0    | 0,1        | 0,0        | 0,5    | –                                  | –                                  | –                               |
| Glühverlust                                      | m-% TM   | 0,0    | 0,0        | 0,0    | 0,1        | 0,0        | 0,5    | –                                  | –                                  | –1                              |

<sup>1</sup> Die Messwerte lagen durchweg unter der Bestimmungs- bzw. Nachweisgrenze.

Während der Versuche wurden überwiegend verschiedene Qualitäten von Nadelholzhackschnitzeln verfeuert. In einem Fall handelt es sich um die Asche von Pappelhackschnitzeln aus dem Kurzumtrieb. Für weitere Details zu den Brennstoffinhaltsstoffen und sonstigen Brennstoffeigenschaften siehe auch [44]. Der Phosphatgehalt ( $P_2O_5$ ) und der Kaligehalt der Pappelasche liegen mit 7,6 m-% TM bzw. 16,0 m-% TM deutlich über den anderen Proben (Mittelwerte: 2,8 m-% TM für  $P_2O_5$  und 9,7 m-% TM für  $K_2O$ ). Ansonsten sind die Inhaltsstoffe der Rost- und Kesselaschen recht homogen. Im Vergleich zu den gesamten Rost- und Kesselaschen aller beprobten Heizwerke (siehe Abschnitt 7.2.1) fällt auf, dass die Gehalte für  $K_2O$  und die Spurennährstoffe in den TFZ-Aschen höher liegen als der Mittelwert aller im Projekt untersuchten Proben (vgl. Tabelle 8). Die höheren Werte sind in Tabelle 9 grau markiert.

In den Rost- und Kesselaschen aus dem TFZ-Heizwerk werden die Grenzwerte für Cadmium und Blei sicher eingehalten (Abbildung 19). Die Bedingungen im Brennraum scheinen also einerseits das Verdampfen der flüchtigen Schwermetalle zu ermöglichen. Gleichzeitig verbleiben die Nährstoffe P und K zu einem überdurchschnittlich hohen Teil in der Rost- und Kesselasche. Dies deutet auf eine für die stoffliche Verwertung optimal ausgerichtete Verbrennung hin. Das TFZ-Heizwerk würde sich somit für weiterführende Untersuchungen zur stofflichen Nutzung von Rost- und Kesselaschen eignen.

Rost- und Kesselaschen  
TFZ-Heizwerk (n = 26)

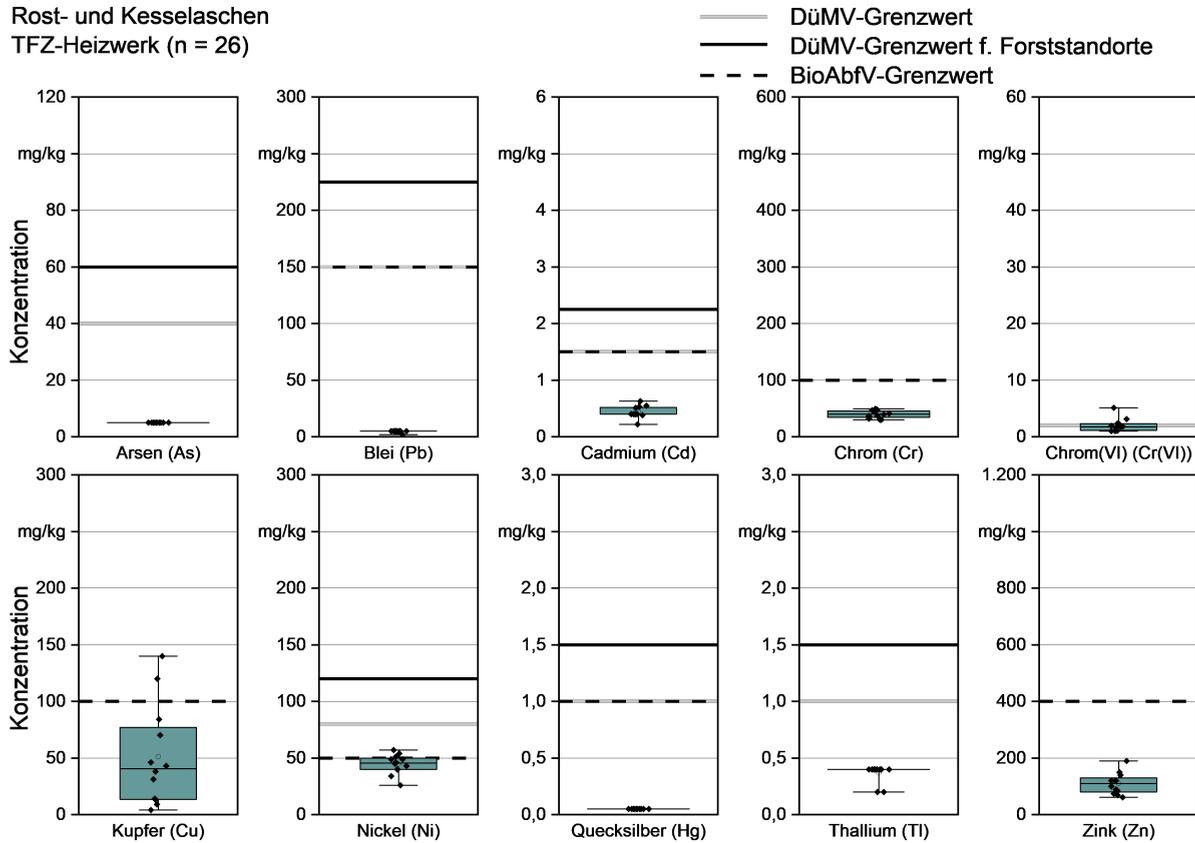
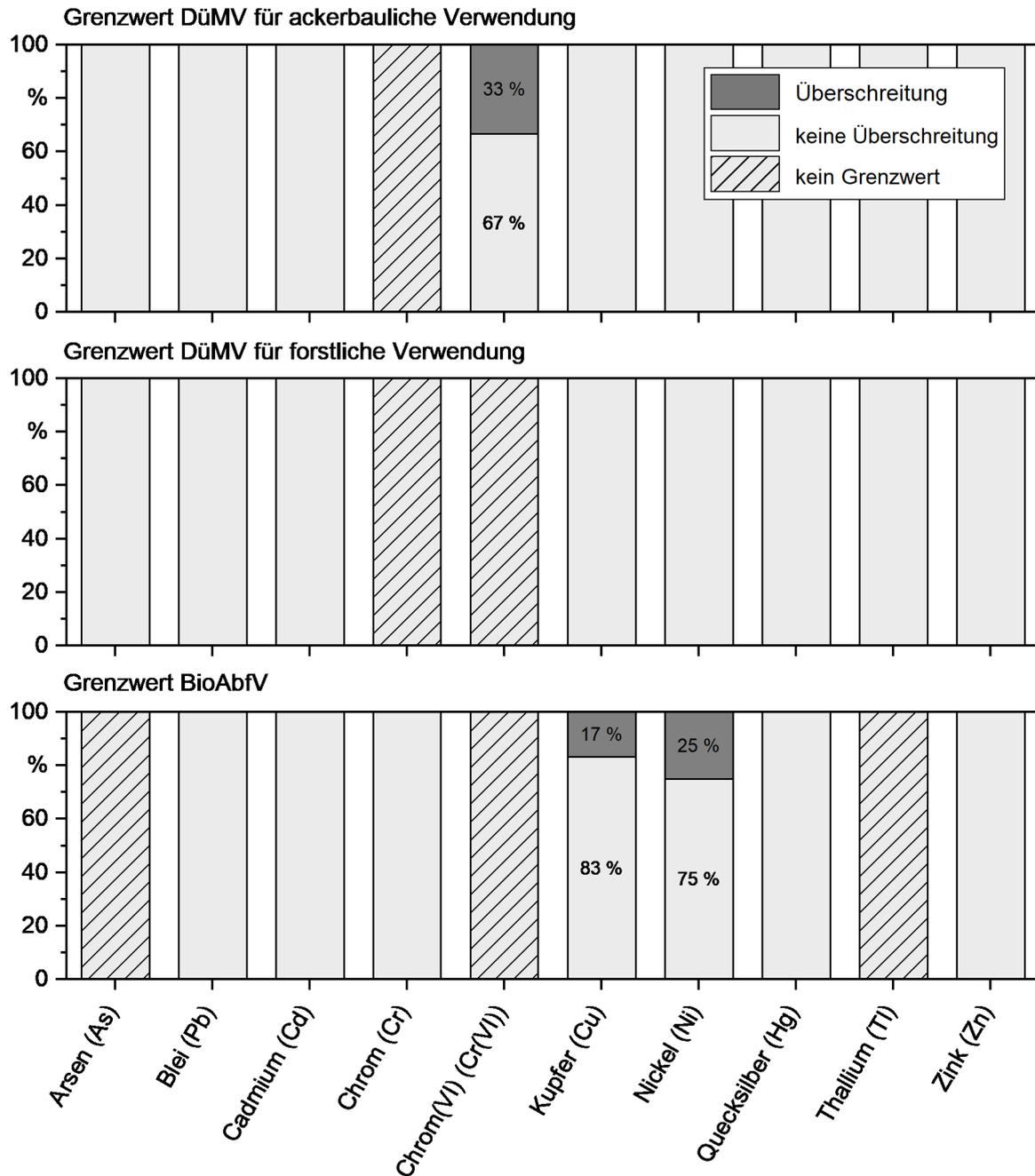


Abbildung 19: Schwermetallgehalte (auf wasserfreier Bezugsbasis) der zwölf Rost- und Kesselaschen vom TFZ-Heizwerk als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25%- und 75%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker) (horizontale Linien geben die jeweiligen Grenzwerte nach DüMV und BioAbfV wieder)

33 % der Proben überschritten den Chrom(VI)-Grenzwert (Abbildung 20). Das entspricht allerdings nur halb so vielen Überschreitungen wie beim Durchschnitt aller Rost- und Kesselaschen (siehe Abschnitt 1.1.1.1). Zu weiteren Überschreitungen kam es bei den Grenzwerten der BioAbfV für Kupfer (17 %,  $n = 2$ ) und Nickel (25 %,  $n = 3$ ).



Rost- und Kesselaschen TFZ Heizwerk (n = 12)

Abbildung 20: Relative Häufigkeit der eingehaltenen und überschrittenen Grenzwerte nach DüMV für ackerbauliche und forstliche Anwendung sowie nach Bio-AbfV in den beprobten Rost- und Kesselaschen des TFZ-Heizwerks

Abbildung 21 illustriert die Verteilung der Hauptnährstoffe in den Rost- und Kesselaschen des TFZ-Heizwerks. Während die basisch wirksamen Bestandteile CaO und MgO etwa auf dem Niveau aller beprobten Rost- und Kesselaschen liegen (siehe Abschnitt 7.2.1.2), fallen vor allem die höheren Werte bei K<sub>2</sub>O und P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> auf. Wie die nachfolgende Auswertung der Zyklonaschen zeigt (siehe Abschnitt 7.2.3), dürften diese günstigen Werte auf ein

positives Zusammenspiel nährstoffreicherer Brennstoffe und nicht zu hoher Brennraumtemperaturen zurückzuführen sein.

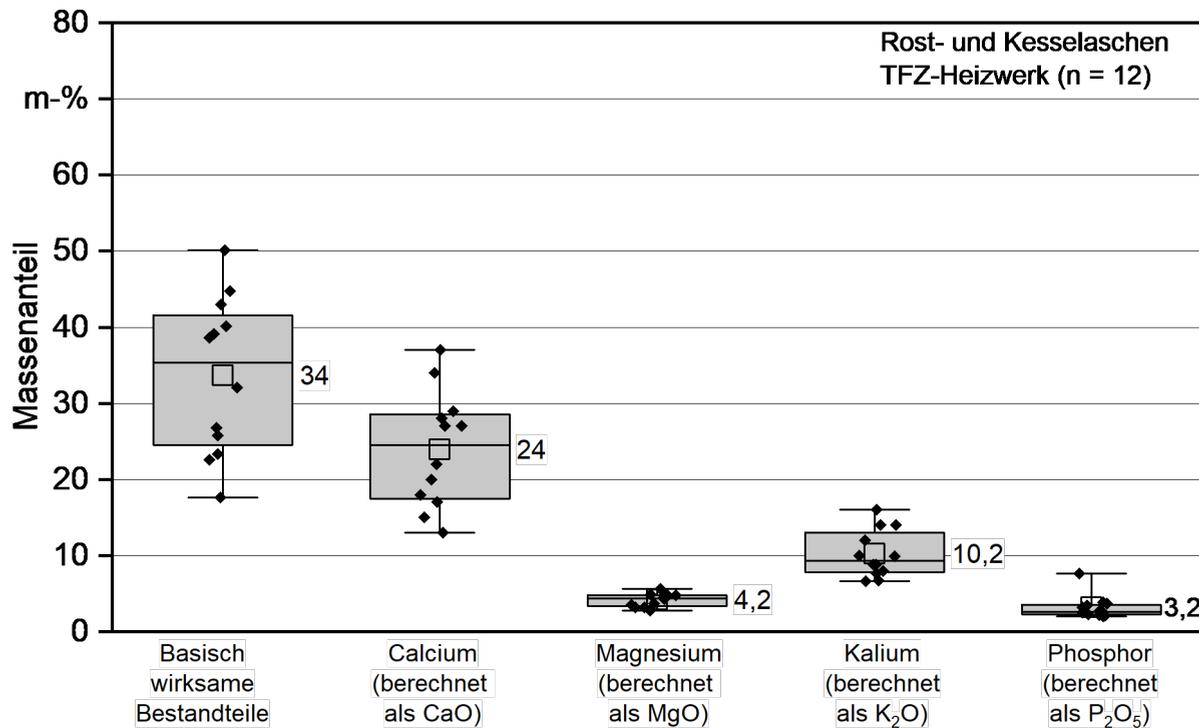


Abbildung 21: Hauptnährstoffe der zwölf Rost- und Kesselaschen vom TFZ-Heizwerk (bezogen auf die Trockenmasse) als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25%- und 75%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker) (Zahlen neben den Boxplots sind jeweils die Mittelwerte)

Ein Einfluss der Brennstoff-Elementgehalte auf den Nährstoffgehalt in der Asche konnte für Phosphor nicht eindeutig nachgewiesen werden. Nur die hohe P-Konzentration in den Pappel-Hackschnitzeln bildet sich auch unmittelbar in der Rostasche und der Zyklonasche ab. In Abbildung 22 sind die entsprechenden Werte eingekreist. Für weitere Nährstoffe wie Kalium, Magnesium und Calcium gibt es noch weniger Anhaltspunkte für einen Zusammenhang mit den Brennstoff-Elementgehalten. Ursachen für die fehlende Übereinstimmung könnten nicht repräsentative Brennstoffproben aus großen Hackschnitzellieferungen sein. Auch war es schwierig, die Aschen präzise einem Brennstoff zuzuordnen, da die Verweilzeit im Ascheaustragssystem bei der betrachteten Anlage mehrere Tage beträgt und erst danach beprobt werden konnte.

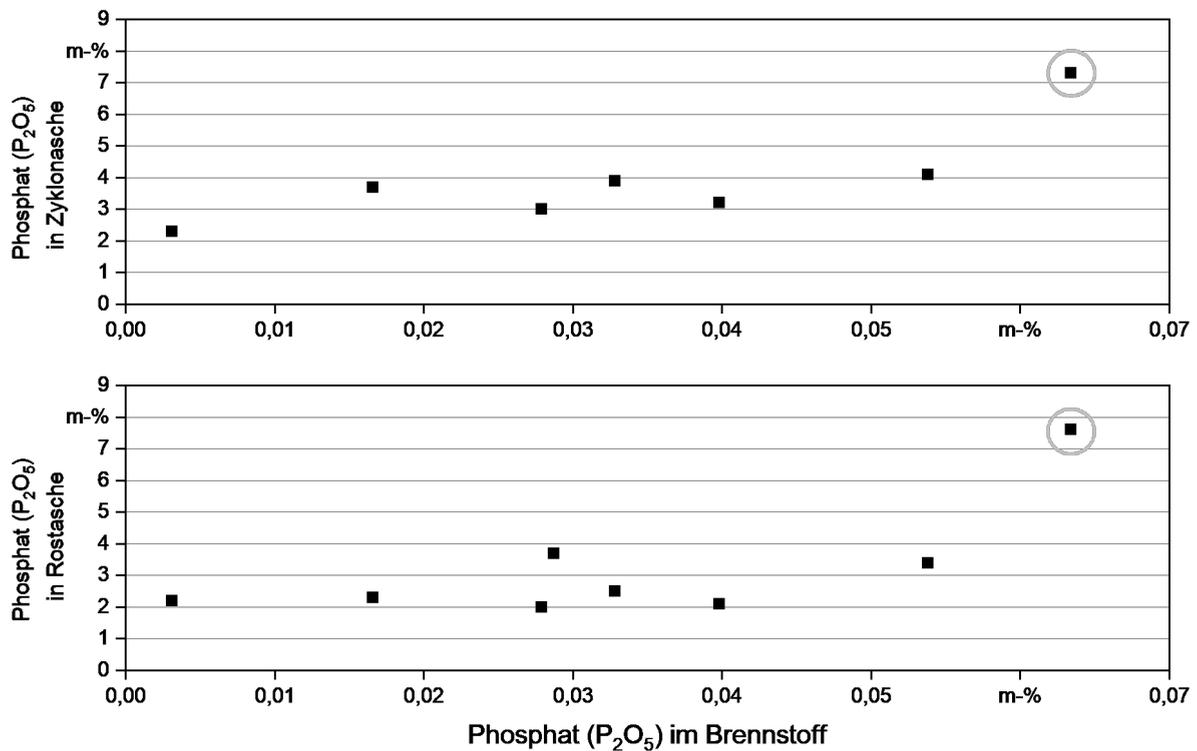


Abbildung 22: Phosphatkonzentration im Brennstoff bezogen auf die entsprechenden Gehalte in der Rostasche (unten) und in der Zyklonasche (oben)

### 7.2.3 Qualität der Zyklonaschen des TFZ-Heizwerks

Im folgenden Abschnitt wird die Qualität von acht zu unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb einer Heizperiode gewonnenen Zyklonaschen aus der Verbrennung unterschiedlicher Brennstoffe am TFZ-Heizwerk untersucht. Die Probenahme erfolgte zeitgleich zu der Gewinnung der in Abschnitt 7.3.2 dargestellten Proben aus Rost- und Kesselasche. Da beim TFZ-Heizwerk keine weitere Abgasreinigungsstufe vorhanden ist, wäre eine Verwendung dieser Zyklonaschen zu Düngezzwecken nach DüMV ausgeschlossen. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den bisherigen Ergebnissen werden aber auch in diesem Abschnitt die Grenzwerte der DüMV und der BioAbfV als Bezugsgrößen verwendet. Tabelle 10 gibt einen Überblick über die Schwermetallgehalte, enthaltene Makro- und Mikronährstoffe sowie die sonstigen Eigenschaften der Zyklonaschen des TFZ-Heizwerks.

**Tabelle 10:** Analyseergebnisse von acht Zyklonaschen aus dem TFZ-Heizwerk mit einer installierten Leistung  $2 \times 650 \text{ kW}_{\text{therm}}$

| Parameter   | Einheit  |        |            |        |            |            |        |                                    |                                    |                                 |
|---|----------|--------|------------|--------|------------|------------|--------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
|   |          | Min    | 1. Quantil | Median | Mittelwert | 3. Quantil | Max    | Anzahl Überschreitung DüMV (Acker) | Anzahl Überschreitung DüMV (Forst) | Anzahl Überschreitung (BioAbfV) |
| Arsen (As)  | mg/kg TM | 5,0    | 6,4        | 9,1    | 8,7        | 11,0       | 12,0   | 0                                  | 0                                  | –                               |
| Blei (Pb)   | mg/kg TM | 73,0   | 89,8       | 97,0   | 123,3      | 117,5      | 290,0  | 1                                  | 1                                  | 1                               |
| Cadmium (Cd)                                      | mg/kg TM | 38,0   | 48,8       | 53,5   | 56,3       | 58,0       | 90,0   | 8                                  | 8                                  | 8                               |
| Chrom (Cr)  | mg/kg TM | 43,0   | 49         | 53     | 54         | 56         | 78     | –                                  | –                                  | 0                               |
| Chrom(VI) (Cr(VI))                                | mg/kg TM | 1,0    | 1,7        | 2,1    | 2,1        | 2,4        | 3,5    | 4                                  | –                                  | –                               |
| Kupfer (Cu)                                       | mg/kg TM | 50,0   | 60         | 74     | 77         | 94         | 110    | 0                                  | 0                                  | 0                               |
| Nickel (Ni)                                       | mg/kg TM | 34,0   | 49         | 54     | 52         | 58         | 63     | 0                                  | 0                                  | 0                               |
| Quecksilber (Hg)                                  | mg/kg TM | 0,2    | 0,3        | 0,4    | 0,4        | 0,5        | 0,8    | 0                                  | 0                                  | 0                               |
| Thallium (Tl)                                     | mg/kg TM | 2,3    | 4,3        | 5,4    | 5,5        | 6,2        | 10,0   | 8                                  | 8                                  | 8                               |
| Zink (Zn)   | mg/kg TM | 2.900  | 3.175      | 3.450  | 3.788      | 4.425      | 5.100  | 1                                  | 0                                  | 8                               |
| Kalk (CaO)  | m-% TM   | 3,6    | 24,8       | 27,5   | 25,3       | 29,8       | 34,0   | –                                  | –                                  | –                               |
| Basisch wirks. Stoffe (CaO)                       | m-% TM   | 31,9   | 35,9       | 41,2   | 40,5       | 42,7       | 52,3   | –                                  | –                                  | –                               |
| Phosphat, gesamt (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | m-% TM   | 2,3    | 3,2        | 3,8    | 3,9        | 4,0        | 7,3    | –                                  | –                                  | –                               |
| Kaliumoxid ges. (K <sub>2</sub> O)                | m-% TM   | 6,4    | 6,5        | 7,6    | 8,5        | 8,5        | 16,0   | –                                  | –                                  | –                               |
| Magnesiumoxid ges. (MgO)                          | m-% TM   | 4,1    | 4,4        | 5,1    | 5,3        | 5,8        | 7,1    | –                                  | –                                  | –                               |
| Schwefel gesamt (S)                               | m-% TM   | 1,3    | 1,6        | 1,8    | 1,8        | 1,9        | 2,2    | –                                  | –                                  | –                               |
| Bor (B)   | mg/kg TM | 340    | 368        | 435    | 435        | 483        | 570    | –                                  | –                                  | –                               |
| Eisen (Fe)  | mg/kg TM | 19.000 | 27.500     | 33.500 | 35.125     | 42.500     | 53.000 | –                                  | –                                  | –                               |
| Kobalt (Co)                                       | mg/kg TM | 11,0   | 23,3       | 25,5   | 29,9       | 34,3       | 55,0   | –                                  | –                                  | –                               |
| Mangan (Mn)                                       | mg/kg TM | 4.700  | 17.000     | 25.000 | 24.213     | 31.500     | 39.000 | –                                  | –                                  | –                               |
| Molybdän (Mo)                                     | mg/kg TM | 3,0    | 4,4        | 4,8    | 4,7        | 5,3        | 5,8    | –                                  | –                                  | –                               |
| Natrium (Na)                                      | mg/kg TM | 1.900  | 2.550      | 2.850  | 2.788      | 2.950      | 3.700  | –                                  | –                                  | –                               |
| Selen (Se)  | mg/kg TM | 5,0    | 5,0        | 5,0    | 5,0        | 5,0        | 5,0    | –                                  | –                                  | –                               |
| pH-Wert   |          | 12,7   | 12,8       | 12,9   | 12,9       | 12,9       | 13,4   | –                                  | –                                  | –                               |
| Wassergehalt                                      | m-%      | 0,0    | 0,0        | 0,0    | 0,0        | 0,0        | 0,2    | –                                  | –                                  | –                               |
| Glühverlust                                       | m-% TM   | 0,0    | 0,0        | 0,0    | 0,0        | 0,0        | 0,0    | –                                  | –                                  | –                               |

Hinsichtlich der Schwermetallgehalte kam es zu extrem hohen Konzentrationen bei den beiden leicht flüchtigen Elementen Cadmium und Thallium. Alle Zyklonaschen überschritten dabei die Grenzwerte aus Tabelle 1 um ein Vielfaches. Auch die sehr hohen Werte für Zink sind auffällig (Abbildung 23 und Abbildung 24). Bei Zink wird allerdings nur von einer der Zyklonaschen der Höchstgehalt der DüMV überschritten. Der viel niedrigere Grenzwert

der BioAbfV liegt jedoch weit unter dem niedrigsten Zn-Gehalt der Zyklonaschen. Der Wert für Quecksilber bleibt trotz hoher Flüchtigkeit unter den Grenzwerten. Das deutet darauf hin, dass entweder der Gehalt im Brennstoff insgesamt sehr niedrig war oder das Quecksilber im Zyklon nicht abgeschieden wurde. Für Letzteres spricht folgender Zusammenhang: Während Laubholz nur sehr geringe Gehalte an Quecksilber enthält, beträgt die mittlere Quecksilberkonzentration des im TFZ-Heizwerk überwiegend eingesetzten Fichtenholzes 0,04 mg/kg TM [16]. Bei einem Zyklonaschegehalt von beispielsweise 0,5 % und einem vollständigen Verbleib in der Zyklonasche würde sich das Quecksilber auf 8 mg pro kg Zyklonasche aufkonzentrieren.

Der pH-Wert der Zyklonaschen war leicht höher als der pH-Wert der Rost- und Kesselaschen. Wassergehalt und Glühverlust lagen fast bei 0 m-% TM.

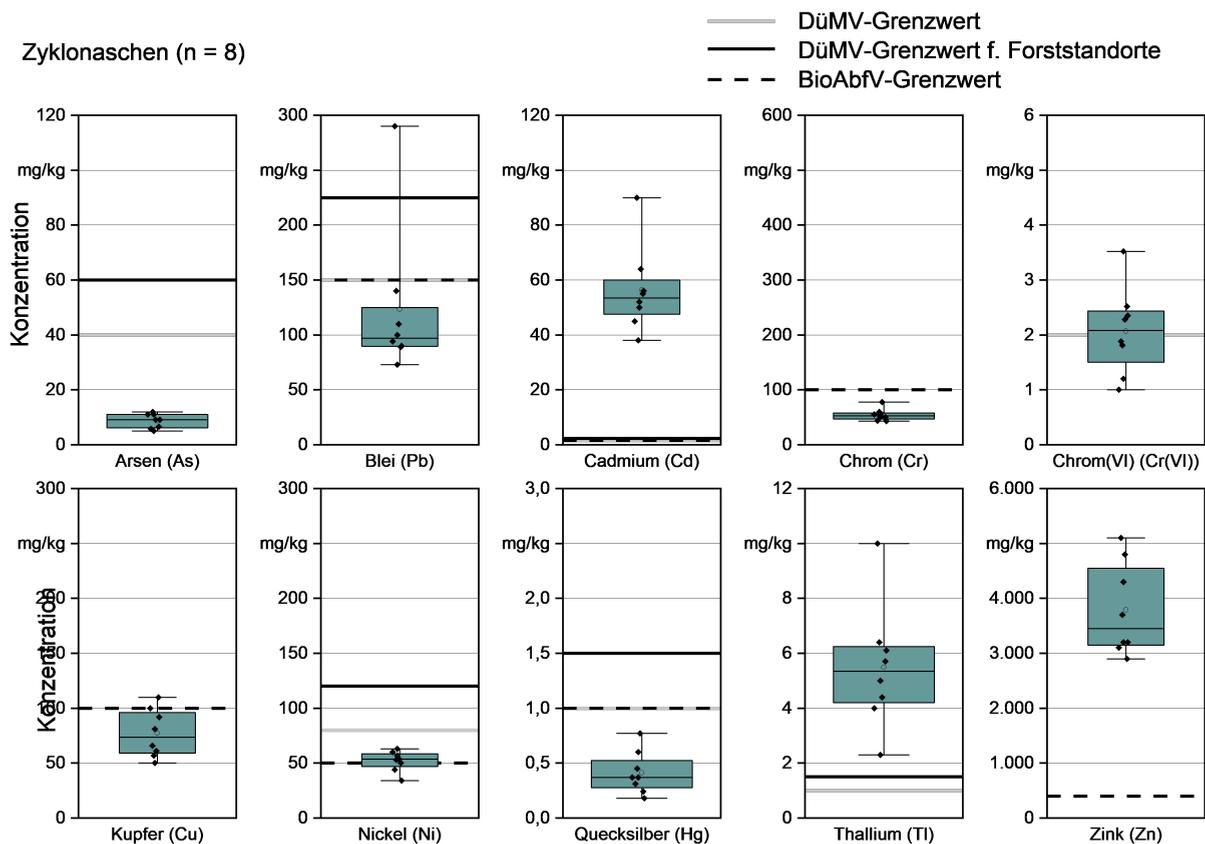


Abbildung 23: Schwermetallgehalte (auf wasserfreier Bezugsbasis) der acht Zyklonaschen vom TFZ-Heizwerk als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25%- und 75%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker) (horizontale Linien geben die jeweiligen Grenzwerte nach DüMV und BioAbfV wieder)

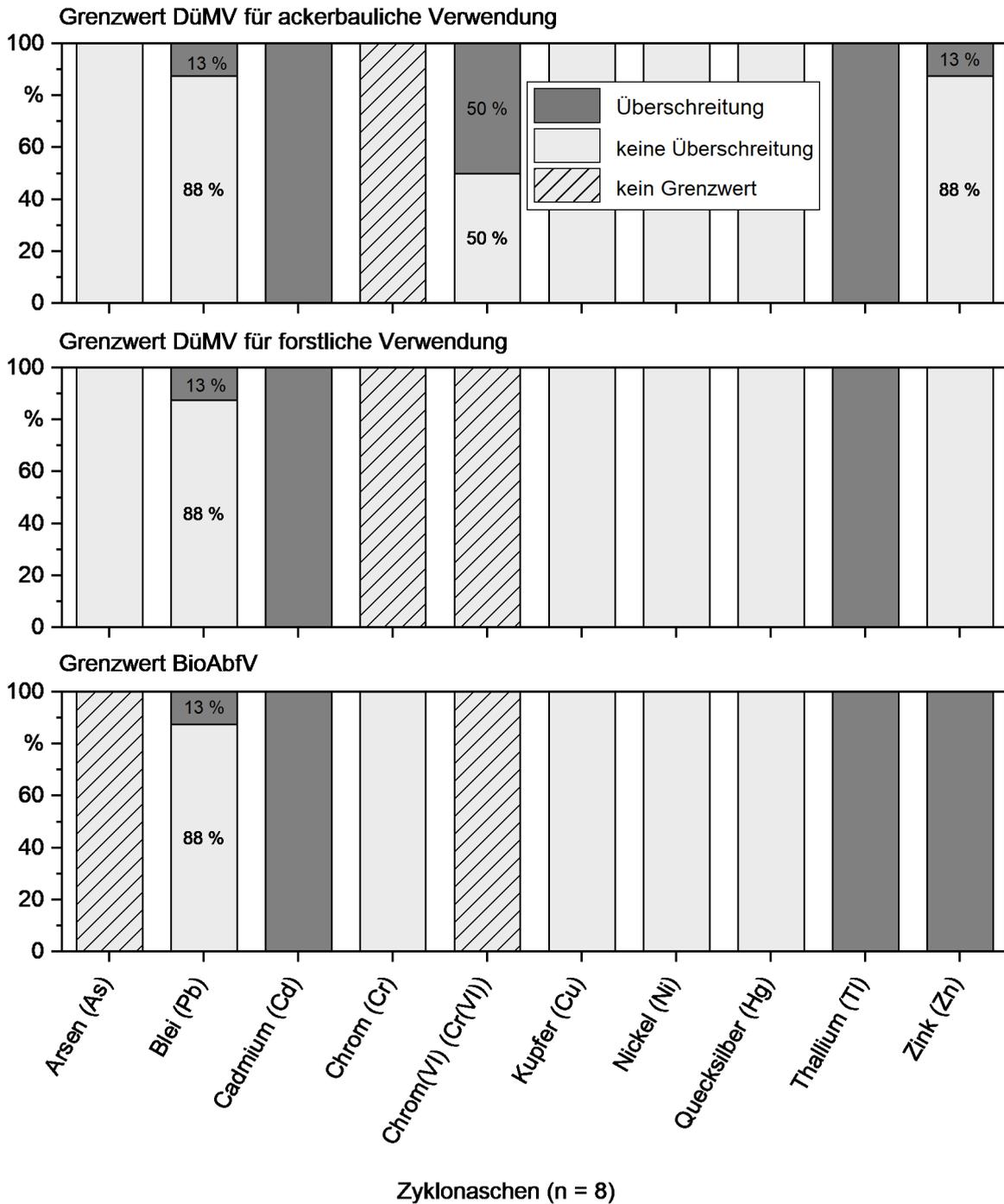


Abbildung 24: Relative Häufigkeit der eingehaltenen und überschrittenen Grenzwerte nach DüMV für ackerbauliche und forstliche Anwendung sowie nach Bio-AbfV in den beprobten Zyklonaschen vom TFZ-Heizwerk

Die Nährstoffkonzentrationen der Makronährstoffe in den Zyklonaschen (Abbildung 25) unterscheiden sich nur gering von den Konzentrationen in den zugehörigen Rost- und Kesselaschen (vgl. Abschnitt 7.2.2). Das deutet an, dass der Transport der schwer flüchtigen Verbindungen vom Rost wohl überwiegend ohne Verdampfung, sondern über direkten Teilchenausstrag erfolgte.

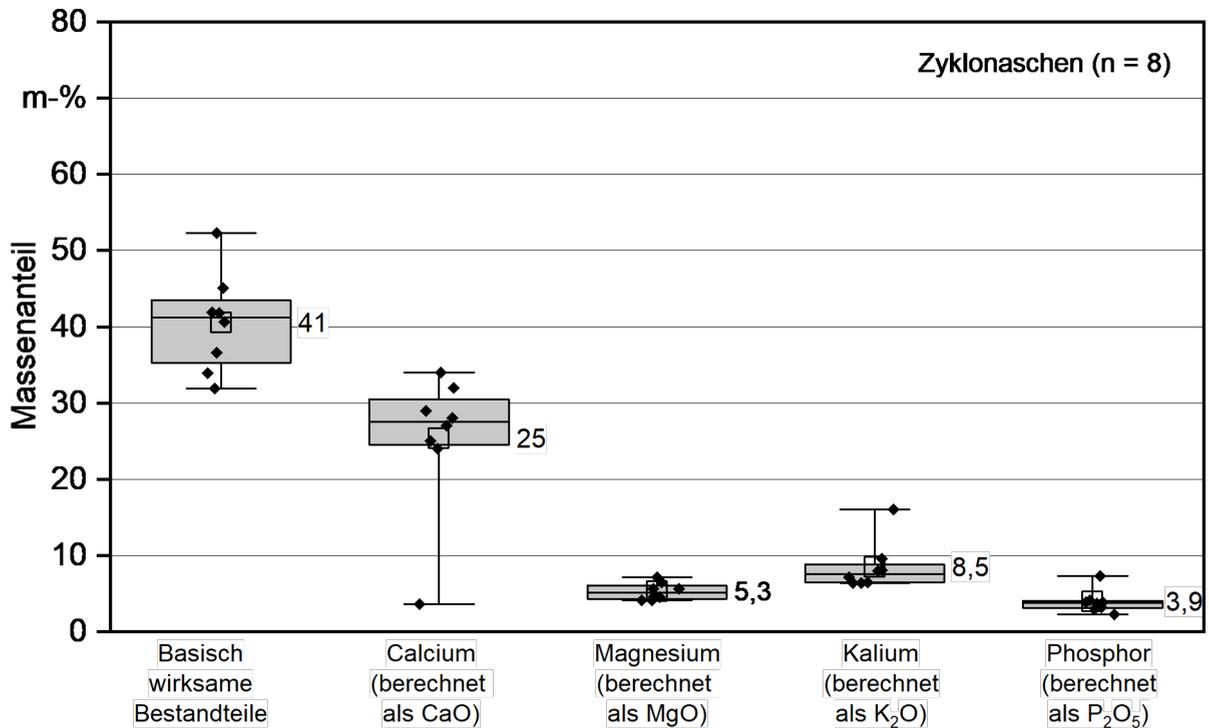


Abbildung 25: Hauptnährstoffe der acht Zyklonaschen vom TFZ-Heizwerk (bezogen auf die Trockenmasse) als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25%- und 75%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker) (Zahlen neben den Boxplots sind jeweils die Mittelwerte)

#### 7.2.4 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 wurden zu 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 [38]. Aus diesem Grund können flüchtige Bestandteile aus dem heißen Glutbett austreten und sich nach anschließender Abkühlung und Kondensation in der Zyklonasche anreichern. Die Folge sind erhöhte Konzentrationen in der Zyklonasche im Vergleich zur Rost- und Kesselasche. Anhand des Datensatzes der am TFZ-Heizwerk gewonnenen Proben sollte sich dieser Zusammenhang direkt nachprüfen lassen.

Tabelle 11 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 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.

**Tabelle 11:** *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            | Std.-abw. | Mittelwert    | Std.-abw. |
| Arsen (As)                                       | mg/kg TM | <b>5,0</b>            | 0,0       | <b>8,7</b>    | 2,5       |
| Blei (Pb)  | mg/kg TM | <b>5,0</b>            | 0,0       | <b>123,3</b>  | 65,6      |
| Cadmium (Cd)                                     | mg/kg TM | <b>0,5</b>            | 0,1       | <b>56,3</b>   | 14,7      |
| Chrom (Cr)                                       | mg/kg TM | <b>41,1</b>           | 7,3       | <b>54,4</b>   | 10,4      |
| Chrom(VI) (Cr(VI))                               | mg/kg TM | 1,9                   | 1,3       | 2,1           | 0,7       |
| Kupfer (Cu)                                      | mg/kg TM | <b>32,9</b>           | 27,8      | <b>77,1</b>   | 20,5      |
| Nickel (Ni)                                      | mg/kg TM | 46,0                  | 9,1       | 51,9          | 8,7       |
| Quecksilber (Hg)                                 | mg/kg TM | <b>0,1</b>            | 0,0       | <b>0,4</b>    | 0,2       |
| Thallium (Tl)                                    | mg/kg TM | <b>0,4</b>            | 0,0       | <b>5,5</b>    | 2,1       |
| Zink (Zn)  | mg/kg TM | <b>110</b>            | 25,4      | <b>3.787</b>  | 788,1     |
| Kalk (CaO)                                       | m-% TM   | <b>20,9</b>           | 5,9       | <b>25,3</b>   | 8,8       |
| Basisch wirks. Stoffe (CaO)                      | m-% TM   | 30,7                  | 10,4      | 40,5          | 6,1       |
| Phosphat gesamt (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | m-% TM   | <b>3,3</b>            | 1,8       | <b>3,9</b>    | 1,4       |
| Kaliumoxid ges. (K <sub>2</sub> O)               | m-% TM   | 10,1                  | 3,3       | 8,5           | 3,0       |
| Magnesiumoxid ges. (MgO)                         | m-% TM   | <b>4,0</b>            | 0,9       | <b>5,3</b>    | 1,1       |
| Schwefel gesamt (S)                              | m-% TM   | <b>0,1</b>            | 0,0       | <b>1,8</b>    | 0,3       |
| Bor (B)  | mg/kg TM | <b>191,3</b>          | 40,8      | <b>435,0</b>  | 72,6      |
| Eisen (Fe)                                       | mg/kg TM | <b>16.125</b>         | 3.370     | <b>35.125</b> | 11.263    |
| Kobalt (Co)                                      | mg/kg TM | <b>20,6</b>           | 6,5       | <b>29,9</b>   | 13,4      |
| Mangan (Mn)                                      | mg/kg TM | <b>15.850</b>         | 7.284     | <b>24.213</b> | 11.097    |
| Molybdän (Mo)                                    | mg/kg TM | <b>2,2</b>            | 0,2       | <b>4,7</b>    | 0,9       |
| Natrium (Na)                                     | mg/kg TM | <b>4.525</b>          | 1.253     | <b>2.788</b>  | 491       |

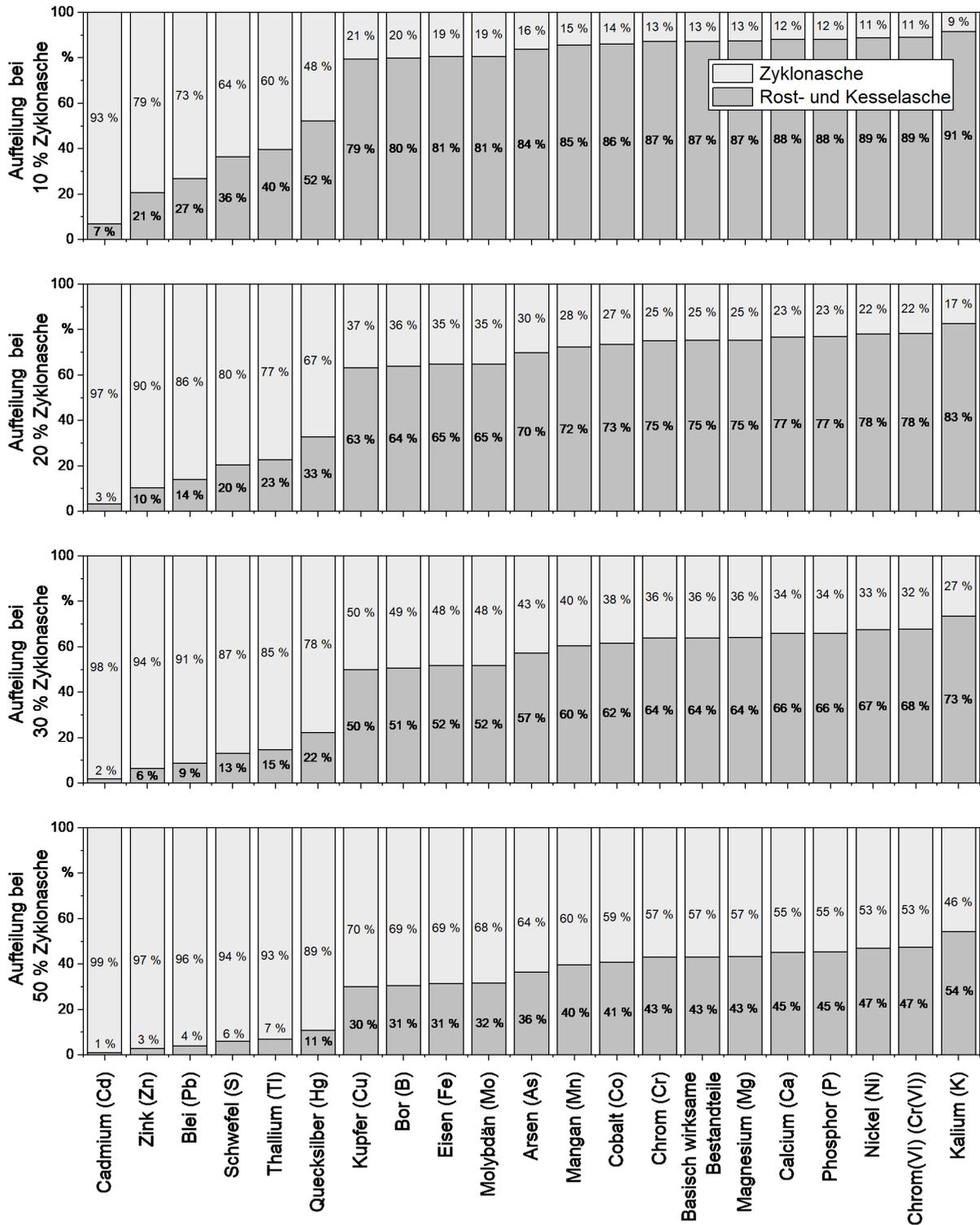


Abbildung 26: Verhältnis der Elementfrachten in Rost- und Kesselasche sowie Zyklonasche bei hypothetischen Mischungsverhältnissen mit Zyklonascheanteilen von 10 m-%, 20 m-%, 30 m-% und 50 m-%

Um die Verteilung der tatsächlichen Frachten der einzelnen Elemente zwischen der Rost- und Kesselasche sowie der Zyklonasche zu quantifizieren, müsste der Massenanteil der im Zyklon aufgefangenen Flugasche am Gesamtaschenanfall bekannt sein. Hierzu können jedoch lediglich sinnvolle Annahmen getroffen werden. Für Festbettfeuerungen wird

üblicherweise ein Anteil von 10 bis 30 m-% Zyklonasche angenommen [12] [17] [32] [59]. Der tatsächliche Anteil der Zyklonasche hängt von unterschiedlichen Faktoren ab, beispielsweise von der Turbulenz der Primärluft im Glutbett oder der Feinheit des Brennstoffs, wie ein Vergleich der Aschefraktionen aus Holzhackschnitzeln bzw. Sägespänen als Brennstoff zeigt [33]. Anhand entsprechender Annahmen lässt sich aus den acht paarweise durchgeführten Analysen der Rost- und Kesselasche sowie der Zyklonasche (Tabelle 11) für das TFZ-eigene Heizwerk ableiten, wie sich die Frachten der Schwermetalle und Nährstoffe zwischen den Aschefraktionen in etwa aufteilen könnten. Dies erfolgt in Abbildung 26, wo neben dem 1:1-Mischungsverhältnis (unterstes Säulendiagramm) die Aufteilung der Frachten bei 10 m-%, 20 m-% und 30 m-% Zyklonasche an der Gesamtasche dargestellt ist. Weitere, möglicherweise in den feinen Flugaschen (d. h. in Partikelemissionen) enthaltene Elementkonzentrationen wurden nicht berücksichtigt.

Schwermetallverbindungen, die Blei, Cadmium, Thallium, Quecksilber, und Zink enthalten, sind leicht flüchtig und finden sich in allen Berechnungsvarianten zum überwiegenden Teil in der Zyklonasche wieder. Beispielsweise reichert sich Cadmium auch beim kleinsten angenommenen Zyklonascheanteil von 10 m-% mit bis zu 93 % in der Zyklonasche an. Arsen ist ebenfalls leicht flüchtig. Weil aber die Konzentrationen in Rost- und Zyklonasche insgesamt sehr niedrig waren und daher häufig der Wert der Nachweis- bzw. Bestimmungsgrenze als Konzentration in den Aschefraktionen angesetzt werden musste, werden die Rost- und Kesselascheanteile für dieses Element überschätzt (vgl. Abschnitte 7.2.2 und 7.2.3).

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 bewirken. Bestimmte Elementkombinationen können zudem die Flüchtigkeit von Schwermetallen erhöhen. So weisen LIENEMANN et al. (2003) [29] darauf hin, dass hohe Chlorgehalte, beispielsweise in Straßenbegleitholz, zur Bildung von Blei- und Zinkchloriden führen, die leichter flüchtig sind als die entsprechenden Oxide. Kupfer, Chrom und Nickel sind schwerer flüchtig und finden sich, je nach Berechnung, nur zu 11–50 % in der Zyklonasche wieder. Sie verbleiben somit überwiegend in der Rost- und Kesselasche.

Nach KALTSCHMITT et al. 2016 [16] liegen Calcium und Magnesium in Rost- und Kesselasche auch bei hohen Temperaturen als stabile Oxide in fester Form vor. Die Autoren führen weiter aus, dass Phosphor zu leicht flüchtigen Oxidverbindungen und Kalium und Natrium zu flüchtigen Hydroxiden reagieren. In der Folge sollten P, K und Na in der Zyklonasche höhere Werte einnehmen als in der Rost- und Kesselasche. Die untersuchten Aschen vom TFZ-Heizwerk belegen die angenommenen hohen Verdampfungsverluste von P, K und Na allerdings nicht. Die berechneten Frachten in der Zyklonasche sind gering und auch die eigentlichen Konzentrationen von Rost- und Kesselasche sowie Zyklonasche unterscheiden sich nicht wesentlich (vgl. Tabelle 11). Es könnte allerdings sein, dass diese Verbindungen im Zyklon des TFZ aufgrund ihrer sehr geringen Partikelgröße nicht als Partikel abgeschieden werden. Dann würden sie als feine Flugasche in einem Feinaschenfilter aufgefangen werden bzw. mit dem Abgasstrom in die Atmosphäre gelangen. OBERNBERGER (1997) [33] zeigt für Holzhackschnitzel grundsätzlich ähnliche Verhältnisse

zwischen Rost- und Kesselasche sowie 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 Zyklontemperaturen der von OBERNBERGER [33] untersuchten Heizwerke liegen kann. Die Feuerraumtemperaturen nahe dem Glutbett sind für das TFZ-Heizwerk nicht bekannt.

### 7.2.5 Qualität von Mischungen aus Rost- und Kesselasche mit Zyklonasche

In einigen Heizwerken werden die Rost- und Kesselasche sowie die Zyklonasche bauartbedingt in einem gemeinsamen Behälter gesammelt. Die Qualität dieser Mischungen aus Rost- und Kesselaschen mit Zyklonaschen wird im folgenden Abschnitt genauer betrachtet.

Eines der beprobten Heizwerke betreibt im selben Gebäude zwei identische Kessel. In Heizperiode 1 verfügten beide Kessel über eine getrennte Erfassung der Rost- und Kesselasche sowie der Zyklonasche. Bis zur nächsten Probenahme erfolgte ein Umbau der Entaschung an einem der beiden Kessel, sodass nun die Rost- und Kesselasche zusammen mit der Zyklonasche in einem Behälter gesammelt werden. Da beide Kessel mit vergleichbaren Parametern betrieben und mit gleichem Brennstoff beschickt werden, bietet diese Konstellation die Möglichkeit, die Auswirkungen einer getrennten Erfassung von Rost- und Kesselasche und deren Mischung mit Zyklonasche auf die Inhaltsstoffe der Asche zu betrachten. Die entsprechenden Proben wurden gleichzeitig gezogen.

Tabelle 12 zeigt die Inhaltsstoffe der Mischung aus den Aschen im Vergleich zu der reinen Rost- und Kesselasche. Die Mischung enthält erwartungsgemäß deutlich höhere Gehalte der leicht flüchtigen Schwermetalle Arsen, Blei, Cadmium und Zink. Bei Cadmium führt die zugegebene Zyklonasche zu einer fünffachen Überschreitung des Grenzwerts der DüMV von 1,5 mg/kg TM für ackerbauliche Anwendung.

**Tabelle 12:** Vergleich der Aschequalität aus zwei parallel betriebenen Kesseln: in einem Fall gemeinsame Sammlung von Rost-, Kessel- und Zyklonasche, im anderen Fall nur Rost- und Kesselasche

| Aschefraktion                                    | Einheit  | Gemisch aus Rost-, Kessel- und Zyklonasche | Nur Rost- und Kesselasche |
|--|----------|--|---------------------------|
| Arsen (As)                                       | mg/kg TM | 11   | 5                         |
| Blei (Pb)  | mg/kg TM | 15   | 5,7                       |
| Cadmium (Cd)                                     | mg/kg TM | 7,6  | 0,4                       |
| Chrom (Cr)                                       | mg/kg TM | 47   | 45                        |
| Chrom(VI) (Cr(VI))                               | mg/kg TM | 4,03                                       | 1                         |
| Kupfer (Cu)                                      | mg/kg TM | 94   | 85                        |
| Nickel (Ni)                                      | mg/kg TM | 36   | 36                        |
| Quecksilber (Hg)                                 | mg/kg TM | 0,09                                       | 0,05                      |
| Thallium (Tl)                                    | mg/kg TM | 0,55                                       | 0,4                       |
| Zink (Zn)  | mg/kg TM | 990  | 95                        |
| Kalk (CaO)                                       | m-% TM   | 20   | 18                        |
| Basisch wirks. Stoffe (CaO)                      | m-% TM   | 29,65                                      | 28,56                     |
| Phosphat gesamt (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | m-% TM   | 2,5  | 2,5                       |
| Kaliumoxid ges. (K <sub>2</sub> O)               | m-% TM   | 6,1  | 6,1                       |
| Magnesiumoxid ges. (MgO)                         | m-% TM   | 3,3  | 3,6                       |
| Schwefel gesamt (S)                              | m-% TM   | 0,41                                       | 0,032                     |
| Bor (B)  | mg/kg TM | 220  | 120                       |
| Eisen (Fe)                                       | mg/kg TM | 16.000                                     | 16.000                    |
| Kobalt (Co)                                      | mg/kg TM | 11   | 13                        |
| Mangan (Mn)                                      | mg/kg TM | 13.000                                     | 13.000                    |
| Molybdän (Mo)                                    | mg/kg TM | 2  | 2                         |
| Natrium (Na)                                     | mg/kg TM | 4.000                                      | 5.400                     |
| Selen (Se)                                       | mg/kg TM | 5  | 5                         |
| pH-Wert  |          | 12,5                                       | 12,7                      |
| Wassergehalt                                     | m-%      | 29,3                                       | 15,1                      |
| Glühverlust                                      | % TM     | 10,2                                       | 1,9                       |

Tabelle 13 fasst die Laboranalysen von fünf Mischaschen zusammen. Vier der Aschen stammen aus drei unterschiedlichen Heizwerken. Bei einer Asche handelt es sich um die Probe aus einem Sammelcontainer für Mischaschen kleinerer Heizwerke. Alle Mischaschen überschritten den DüMV-Grenzwert für Cadmium. Weitere Überschreitungen traten bei Chrom(VI) ( $n = 4$ ), Thallium ( $n = 1$ ) und Blei ( $n = 1$ ) auf.

**Tabelle 13:** Analyseergebnisse von fünf Mischungen aus Brennraum- und Zyklonsche aus Heizwerken mit einer installierten Leistung > 1 MW

| Parameter  | Einheit  |        |            |        |            |            |        |                                    |                                    |                                 |
|--|----------|--------|------------|--------|------------|------------|--------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
|  |          | Min    | 1. Quantil | Median | Mittelwert | 3. Quantil | Max    | Anzahl Überschreitung DüMV (Acker) | Anzahl Überschreitung DüMV (Forst) | Anzahl Überschreitung (BioAbfV) |
| Arsen (As)                                       | mg/kg TM | 5,0    | 5,0        | 8,9    | 8,2        | 11,0       | 11,0   | 0                                  | 0                                  | –                               |
| Blei (Pb)  | mg/kg TM | 12,0   | 12,0       | 15,0   | 56,6       | 64,0       | 180,0  | 1                                  | 0                                  | 1                               |
| Cadmium (Cd)                                     | mg/kg TM | 3,8    | 4,7        | 7,6    | 11,6       | 15,0       | 27,0   | 5                                  | 5                                  | 5                               |
| Chrom (Cr)                                       | mg/kg TM | 46,0   | 47         | 48     | 68         | 69         | 130    | –                                  | –                                  | 1                               |
| Chrom(VI) (Cr(VI))                               | mg/kg TM | 1,0    | 2,7        | 4,0    | 7,0        | 5,5        | 21,8   | 4                                  | –                                  | –                               |
| Kupfer (Cu)                                      | mg/kg TM | 34,0   | 48         | 76     | 72         | 94         | 110    | 0                                  | 0                                  | 1                               |
| Nickel (Ni)                                      | mg/kg TM | 36,0   | 40         | 42     | 41         | 44         | 44     | 0                                  | 0                                  | 0                               |
| Quecksilber (Hg)                                 | mg/kg TM | 0,1    | 0,1        | 0,1    | 0,1        | 0,1        | 0,1    | 0                                  | 0                                  | 0                               |
| Thallium (Tl)                                    | mg/kg TM | 0,2    | 0,6        | 0,7    | 1,0        | 0,9        | 2,7    | 1                                  | 1                                  | 0                               |
| Zink (Zn)  | mg/kg TM | 320    | 420        | 990    | 866        | 1.100      | 1.500  | 0                                  | 0                                  | 4                               |
| Kalk (CaO)                                       | m-% TM   | 17,0   | 20,0       | 31,0   | 31,2       | 35,0       | 53,0   | –                                  | –                                  | –                               |
| Basisch wirks. Stoffe (CaO)                      | m-% TM   | 27,5   | 29,7       | 37,0   | 35,3       | 40,2       | 42,2   | –                                  | –                                  | –                               |
| Phosphat gesamt (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | m-% TM   | 2,3    | 2,4        | 2,5    | 2,6        | 2,5        | 3,2    | –                                  | –                                  | –                               |
| Kaliumoxid ges. (K <sub>2</sub> O)               | m-% TM   | 5,1    | 6,1        | 6,1    | 6,9        | 6,1        | 11,0   | –                                  | –                                  | –                               |
| Magnesiumoxid ges. (MgO)                         | m-% TM   | 3,0    | 3,3        | 3,3    | 3,4        | 3,3        | 4,3    | –                                  | –                                  | –                               |
| Schwefel gesamt (S)                              | m-% TM   | 0,3    | 0,3        | 0,4    | 0,6        | 0,8        | 1,4    | –                                  | –                                  | –                               |
| Bor (B)  | mg/kg TM | 140    | 220        | 220    | 224        | 260        | 280    | –                                  | –                                  | –                               |
| Eisen (Fe)                                       | mg/kg TM | 14.000 | 14.000     | 16.000 | 16.800     | 17.000     | 23.000 | –                                  | –                                  | –                               |
| Kobalt (Co)                                      | mg/kg TM | 11,0   | 13,0       | 14,0   | 15,0       | 16,0       | 21,0   | –                                  | –                                  | –                               |
| Mangan (Mn)                                      | mg/kg TM | 7.700  | 8.700      | 13.000 | 13.480     | 15.000     | 23.000 | –                                  | –                                  | –                               |
| Molybdän (Mo)                                    | mg/kg TM | 2,0    | 2,0        | 3,1    | 3,4        | 5,0        | 5,0    | –                                  | –                                  | –                               |
| Natrium (Na)                                     | mg/kg TM | 2.200  | 2.300      | 3.500  | 3.340      | 4.000      | 4.700  | –                                  | –                                  | –                               |
| Selen (Se)                                       | mg/kg TM | 5,0    | 5,0        | 5,0    | 5,0        | 5,0        | 5,0    | –                                  | –                                  | –                               |
| pH-Wert  |          | 12,5   | 12,8       | 12,8   | 12,8       | 12,8       | 13,1   | –                                  | –                                  | –                               |
| Wassergehalt                                     | m-%      | 0,0    | 0,0        | 0,2    | 6,1        | 1,0        | 29,3   | –                                  | –                                  | –                               |
| Glühverlust                                      | m-% TM   | 0,0    | 0,0        | 2,2    | 2,3        | 2,2        | 7,2    | –                                  | –                                  | –                               |

Die gemessenen Schwermetallgehalte sind als Boxplots und Punktwolken in Abbildung 27 dargestellt. Einhaltung bzw. Überschreitungen der Grenzwerte in DüMV und BioAbfV

veranschaulicht Abbildung 28. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass für Biomasseheiz(kraft)werke, die naturbelassenes Holz einsetzen, eine getrennte Sammlung von Rost- und Kesselasche und von Zyklonasche erforderlich 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 sowie Zyklonasche die Grenzwerte der DüMV dagegen häufig einhalten [1]. Dies liegt an den i. d. R. geringeren Schwermetallgehalten der Agrarbrennstoffe im Vergleich mit Holzbrennstoffen.

Mischung aus Rost- und Kesselaschen  
mit Zyklonaschen (n = 5)

— DüMV-Grenzwert  
— DüMV-Grenzwert f. Forststandorte  
- - - BioAbfV-Grenzwert

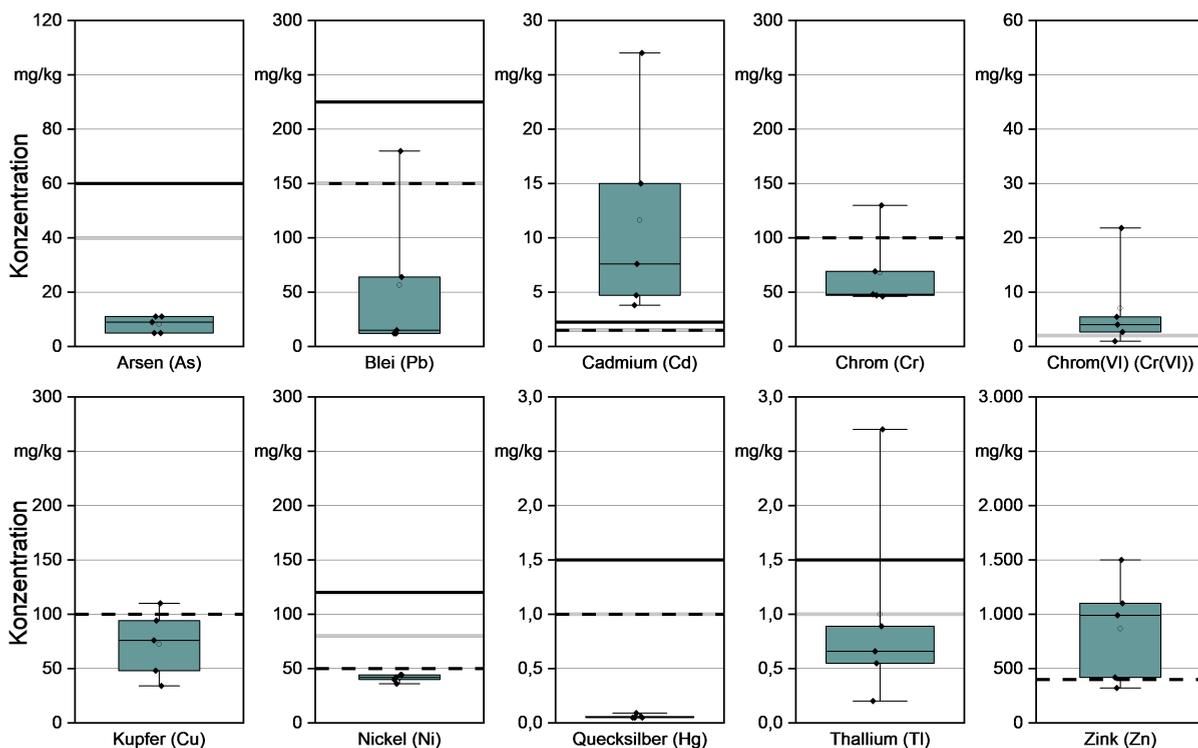
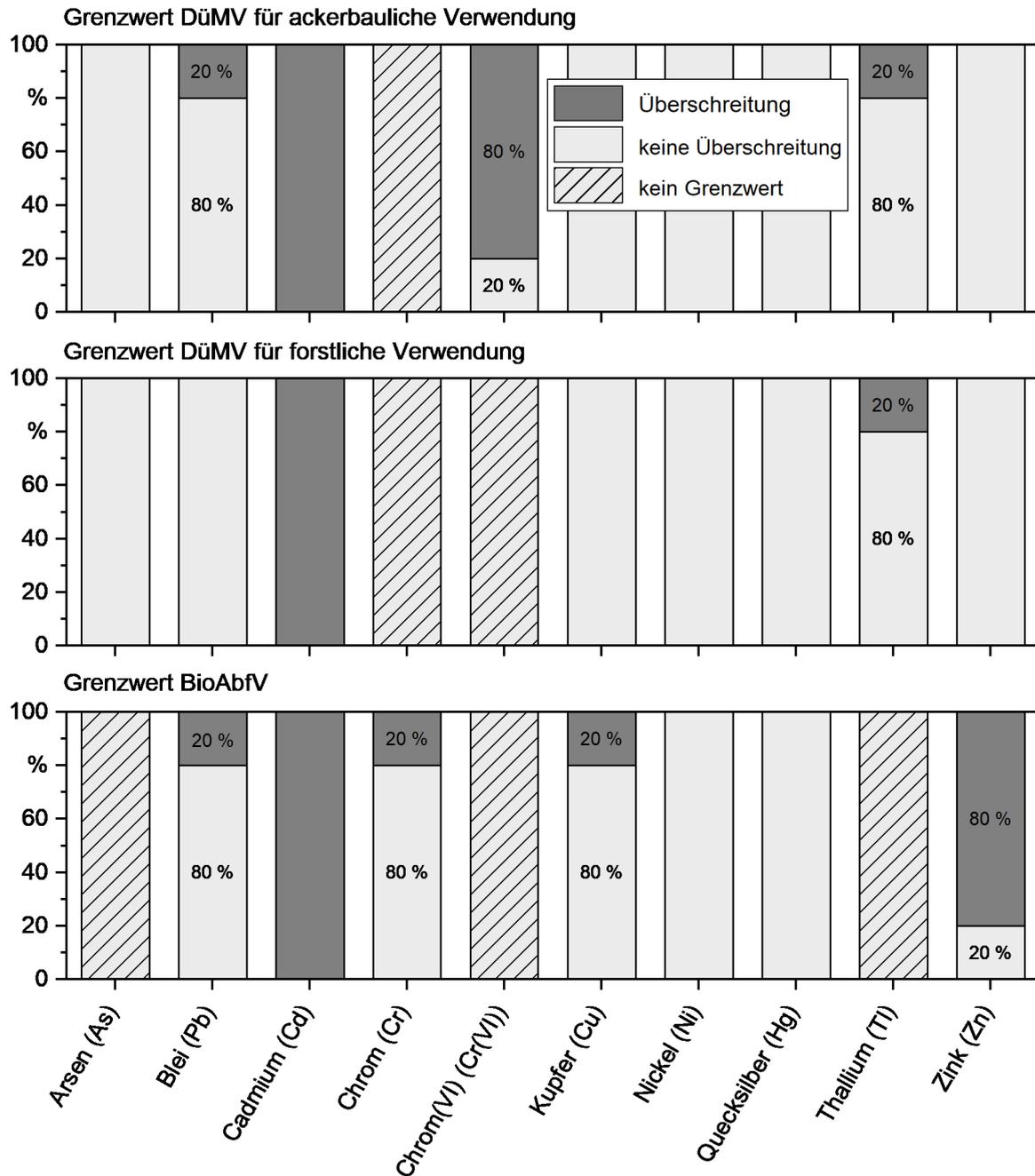


Abbildung 27: Schwermetallgehalte (auf wasserfreier Bezugsbasis) der fünf Mischungen aus Rost- und Kesselasche mit Zyklonasche als Punktwolken sowie als Boxplots mit 25%- und 75%-Quantil (Box) sowie Minimum zum Maximum (Whisker) (horizontale Linien geben die jeweiligen Grenzwerte nach DüMV und BioAbfV wieder)



Mischung aus Rost- und Kesselaschen mit Zyklonaschen (n = 5)

Abbildung 28: Relative Häufigkeit der eingehaltenen und überschrittenen Grenzwerte nach DüMV für ackerbauliche und forstliche Anwendung sowie nach Bio-AbfV in den beprobten Mischaschen aus Rost- und Kesselasche mit Zyklonasche

### 7.3 Verwertbarkeit der untersuchten Aschen auf landwirtschaftlichen, forstlichen und sonstigen Flächen

Holzaschen aus der Verbrennung von unbehandeltem Holz können zur Nutzung ihres Nährstoffgehalts auf landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzten Flächen zur Düngung eingesetzt werden [38]. Weiter können die Aschen Komposten zugesetzt oder im Wald, z. B. im Rahmen der Bodenschutzkalkung, verwertet werden. Als Düngemittel oder als Zuschlagsstoff für die Düngemittelproduktion dürfen nur Aschen verwendet werden, die die in der Düngemittelverordnung festgelegten Schwermetallgrenzwerte einhalten (DüMV Anlage 2, Tab. 1.4, Sp. 4). Bei der Vermischung mit Kompost bzw. Bioabfall können für die Aschen zusätzlich die Grenzwerte der BioAbfV zur Anwendung kommen [20]. Für den Einsatz als Düngemittel sind Rost- und Kesselaschen 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 im fertigen Dünger einzuhalten (siehe auch Kapitel 4). Zum Inverkehrbringen von Aschen als Düngemittel sind weitere Anforderungen zu erfüllen, die beispielsweise dem Merkblatt zur „Verwertung und Beseitigung von Holzaschen“ des LfU [38] zu entnehmen sind.

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

#### 7.3.1 Rost- und Kesselaschen

Bei 62 % der Rost- und Kesselaschen traten Chrom(VI)-Gehalte über dem Grenzwert der DüMV für ackerbauliche Anwendung auf. Durch eine geeignete Ascheaufbereitung sollte es möglich sein, Cr(VI) in das unschädliche Cr(III) zu überführen (vgl. Kapitel 3). Hier besteht allerdings noch Forschungsbedarf, da beispielsweise das Verfahren einer Anfeuchtung der Aschen mit anschließender Lagerung über mehrere Wochen erst noch als zuverlässiges Verfahren für die Praxisanwendung wissenschaftlich validiert werden muss. 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 überschritten, enthielten alle mehr als 15 m-% TM CaO und erreichten damit die Voraussetzung für einen „Kalkdünger aus Asche aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe“ (DüMV Anlage 1, Abschnitt 1.4.6 i. V. m. 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. m. 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) [20] von Mischungen aus Rost- und Kesselasche sowie 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 waren (DüMV Anlage 1, Abschnitt 2.3 i. V. m. Anlage 2, Tab. 7.3., Z. 7.3.16).

Vier der Aschen (entspricht ca. 15 %) enthielten 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. m. 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. Ohne Berücksichtigung der Überschreitungen bei Chrom(VI) nach DüMV hielten 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 [20]. Dieser letztgenannte Verwertungspfad wäre somit für 85 % der untersuchten Rost- und Kesselaschen möglich, sofern eine Reduzierung des Cr(VI)-Gehalts vorausgesetzt werden kann.

### **7.3.2 Mischungen aus Rost- und Kesselasche mit Zyklonasche**

Keine der mit Zyklonasche vermischten Rost- und Kesselaschen konnte 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, auch wenn der Zyklon nicht die letzte filternde Einheit darstellt. Sollte die Verwertung von Rost- und Kesselaschen seitens der Betreiber bayerischer Biomasseheiz(kraft)werke angestrebt werden, sind eine getrennte Sammlung der Aschen und eine separate Weiterverwendung zu empfehlen.



## 8 Düngewirkung von Rost- und Kesselaschen

Ein etablierter Verwertungspfad von Rost- und Kesselaschen ist deren Vermischung mit Kalk- oder Dolomitgestein zur Herstellung eines Holzasche-Kalk-Gemischs. Dazu wird Asche, die die Kriterien der Düngemittelverordnung einhält, aufbereitet (d. h. Metall abscheiden, sieben, brechen, mahlen) und in unterschiedlichen Anteilen mit Kalk oder Dolomitmalk zu „Kohlensaurem Kalk“ vermischt. Neben der Kalkwirkung (überwiegend verursacht durch Calcium- und Magnesiumverbindungen) sind in Holzasche Phosphor, Kalium und Spurennährstoffe enthalten. Ein Gefäßversuch am TFZ soll in diesem Kapitel zeigen, ob Rost- und Kesselaschen aus der Holzverbrennung zusätzlich zur kalkenden Wirkung auf den Boden einen Düngeeffekt auf die Pflanzen haben. Dazu werden die mit Rost- und Kesselasche gedüngten Varianten mit Varianten verglichen, die nur gekalkt werden.

### 8.1 Material und Methoden

Der Gefäßversuch wurde mit Mais (*Zea mays* „Simpatico KWS“) und Ackerbohne (*Vicia faba* „Fuego“) durchgeführt. Mais ist eine häufig für Gefäßversuche verwendete Pflanze und mit dieser Kultur besteht viel Erfahrung. Ein Vorteil des Maises ist, dass Mangelerscheinungen optisch gut erkennbar sind. WOLLMANN et al. 2018 [57] empfehlen Mais neben Weidelgras als Testpflanze in einem standardisierten Verfahren zur Bewertung von Recyclingdüngern. In einem Projekt zur Düngewirkung von Strohaschen nutzen KOAL et al. 2020 [21] und BISCHOF et al. 2020 [1] ebenfalls Mais für Gefäß- und Freilandversuche.

Ackerbohne wurde als zweite Kulturpflanze gewählt, da sie als Leguminose auf eine gute Versorgung mit Phosphor und Kalium angewiesen ist [9]. Somit lassen sich deutliche Unterschiede auf die Biomasseproduktion in den unterschiedlich gedüngten Varianten erwarten.

Als Düngemittel wurden drei Holzaschen aus den in Kapitel 7 geprüften Rost- und Kesselaschen ausgewählt, die die Anforderungen der Düngemittelverordnung hinsichtlich ihrer Schwermetallkonzentrationen erfüllen. Für die gekalkten Varianten wurden Branntkalk (CaO) und Magnesium-Mischkalk (Trollius Femikal) eingesetzt. Die Nährstoffgehalte für Calcium (als CaO), Kalium (als K<sub>2</sub>O) und Phosphor (als P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) fasst Tabelle 14 zusammen. Asche 1 und Asche 2 stammen aus zwei unterschiedlichen Heizwerken mit Trockenentsorgung. Asche 3 wurde auf einer Anlage mit Nassentsorgung gewonnen und enthält deutlich niedrigere Nährstoffanteile als die beiden anderen Aschen.

Für alle Varianten wurde eine massebezogene Mischung aus zwei Dritteln Nullerde, einem Drittel Torf und 1,14 g Ammoniumnitrat pro Pflanztopf (Stickstoffdünger) als Substrat gewählt. Die verwendete Nullerde (Hawita F.-E. Typ Nullerde) ist eine feinkörnige Anzuchterde aus dem Gartenbau ohne Nährstoffe. Die Düngung mit den drei Aschen und den zwei Kalkvarianten erfolgte in jeweils vier Konzentrationsstufen. Zusammen mit den ungedüngten Kontrollvarianten ergaben sich 252 Pflanzgefäße (Tabelle 15). Jedes Pflanzgefäß wurde mit vier Litern Substrat befüllt.

Tabelle 14: Calcium-, Kalium- und Phosphatgehalte der eingesetzten Düngemittel in m-% TM

| Düngemittel | Basisch wirksame Stoffe als CaO in m-% TM | K als K <sub>2</sub> O in m-% TM | P als P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> in m-% TM |
|-------------|---|----------------------------------|---|
| Asche 1     | 49,0                                      | 11,0                             | 4,1   |
| Asche 2     | 30,2                                      | 7,5                              | 2,5   |
| Asche 3     | 15,5                                      | 2,3                              | 0,9   |
| Branntkalk  | 93,0                                      | –                                | –   |
| Mischkalk   | 62,5                                      | –                                | –   |

Tabelle 15: Übersicht der Varianten mit Anzahl der Wiederholungen und Gesamtzahl der Gefäße

| Variante           | Mais     |           |           |           |           | Ackerbohne |           |           |           |            |
|--------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|
|                    | 0 %      | 100 %     | 50 %      | 200 %     | 300 %     | 0 %        | 100 %     | 50 %      | 200 %     | 300 %      |
| Ungedüngt          | 6        | –         | –         | –         | –         | 6          | –         | –         | –         | –          |
| Branntkalk         | –        | 6         | 6         | 6         | 6         | –          | 6         | 6         | 6         | 6          |
| Mischkalk          | –        | 6         | 6         | 6         | 6         | –          | 6         | 6         | 6         | 6          |
| Asche 1            | –        | 6         | 6         | 6         | 6         | –          | 6         | 6         | 6         | 6          |
| Asche 2            | –        | 6         | 6         | 6         | 6         | –          | 6         | 6         | 6         | 6          |
| Asche 3            | –        | 6         | 6         | 6         | 6         | –          | 6         | 6         | 6         | 6          |
| <b>Summe</b>       | <b>6</b> | <b>30</b> | <b>30</b> | <b>30</b> | <b>30</b> | <b>6</b>   | <b>30</b> | <b>30</b> | <b>30</b> | <b>30</b>  |
| <b>Gesamtsumme</b> |          |           |           |           |           |            |           |           |           | <b>252</b> |

Die Konzentration „100 %“ entspricht der Menge an Branntkalk, die den pH-Wert von 4,5 im gewählten Substrat in den gewünschten pH-Bereich zwischen pH 6 und pH 7,2 anhebt (Abbildung 34). Umgelegt auf einen Hektar wären dazu beispielsweise 2.125 kg Branntkalk notwendig. Die Mengen in kg/Hektar in der jeweiligen Düngestufe 0 %, 50 %, 100 % (= Bedarf), 200 % und 300 % sind in Tabelle 16 zusammengestellt. Die basenäquivalenten Mengen des Mischkalks wurden anhand von Herstellerangaben berechnet. Für die Aschen wurden die im Labor gemessenen basisch wirksamen Bestandteile als Berechnungsgrundlage verwendet.

**Tabelle 16:** Aufwandmenge für die eingesetzten Kalke und Aschen für die vier Dün-  
gestufen in kg/ha

| Variante                     | Anteil basisch<br>wirksamer<br>Stoffe | Düngestufe |       |        |        |
|------------------------------|---------------------------------------|------------|-------|--------|--------|
|                              |                                       | 100 %      | 50 %  | 200 %  | 300 %  |
| Aufwandmenge in kg/ha        |                                       |            |       |        |        |
| Basisch wirk-<br>same Stoffe | 100 %                                 | 1.966      | 983   | 3.931  | 5.897  |
| Branntkalk                   | 93 %                                  | 2.125      | 1.063 | 4.250  | 6.375  |
| Mischkalk                    | 55 %                                  | 3.574      | 1.787 | 7.148  | 10.722 |
| Asche 1                      | 49 %                                  | 4.011      | 2.006 | 8.023  | 12.034 |
| Asche 2                      | 30 %                                  | 6.509      | 3.254 | 13.017 | 19.526 |
| Asche 3                      | 16 %                                  | 12.681     | 6.341 | 25.363 | 38.044 |

Nimmt man eine Einarbeitungstiefe der Dünger von 10 cm an, können die flächenbezogenen Mengen aus Tabelle 16 in Konzentrationen umgerechnet werden. Tabelle 17 listet die Aufwandmenge in Gramm pro Liter Pflanzsubstrat.

**Tabelle 17:** Düngebedarf und Aufwandmenge für die eingesetzten Kalke und Aschen  
für die vier Düngegestufen in g/l Pflanzsubstrat

| Variante                         | Düngestufe |      |       |       |
|----------------------------------|------------|------|-------|-------|
|                                  | 100 %      | 50 % | 200 % | 300 % |
| Aufwandmenge in g/l              |            |      |       |       |
| Basisch wirksame Stoffe (Bedarf) | 2,0        | 1,0  | 3,9   | 5,9   |
| Branntkalk                       | 2,1        | 1,1  | 4,3   | 6,4   |
| Mischkalk                        | 3,6        | 1,8  | 7,1   | 10,7  |
| Asche 1                          | 4,0        | 2,0  | 8,0   | 12,0  |
| Asche 2                          | 6,5        | 3,3  | 13,0  | 19,5  |
| Asche 3                          | 12,7       | 6,3  | 25,4  | 38,0  |

Der pH-Wert des Bodens in den unterschiedlichen Varianten wurde mit einer pH-Sonde (pH3000, Step Systems GmbH) zur direkten Messung im feuchten Boden ermittelt. Pro Konzentrationsstufe wurde je ein Gefäß mit Mais und Ackerbohne an drei Stellen gemessen. Dazu wurde die Sonde in der Mitte und gegenüberliegend am Rand der Gefäße ca. 3 cm tief ins Substrat gesteckt. Aus den drei Werten wurde der Mittelwert errechnet. Die Messungen erfolgten an Tag 5 nach Mischung und Anfeuchtung des Substrats und somit kurz vor dem Saatzeitpunkt sowie sieben Wochen nach der Aussaat.



Abbildung 29: pH-Messung mit Boden-pH-Meter direkt im feuchten Substrat

### 8.1.1 Ablauf des Gefäßversuchs

Neun Tage nach Aufstellung der Gefäße und Anfeuchtung wurden der Mais und die Ackerbohnen mithilfe einer Säschablone eingesät (Abbildung 31). Die Aufstellung der Gefäße erfolgte randomisiert in Wiederholungen nach zwei Richtungen (vgl. Abbildung 30).

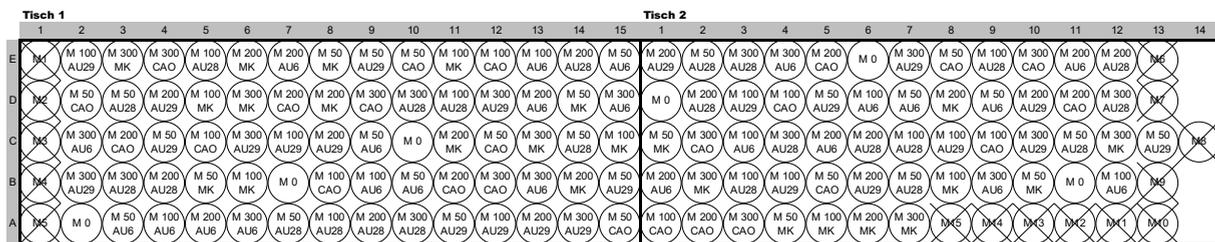


Abbildung 30: Randomisationsplan für Mais mit den Aschen A1 bis A3, Mischkalk (MK), Branntkalk (CAO), jeweils in den Düngestufen 50 bis 300 % (M 50 bis M 300), Nullvariante (M 0) und Randpflanzen zur Minimierung der Randeffekte (M 1 bis M 15, markiert mittels „X“)

Um Randeffekte zu minimieren, wurden links und rechts auf den Tischen Pflanzen zur Beschattung aufgestellt. Zudem wurden die äußeren Töpfe mit hellem Baumwollstoff abgehängt, um einer Erwärmung durch direkte Sonneneinstrahlung vorzubeugen (vgl. Abbildung 32).



*Abbildung 31: Aussaat von Mais und Ackerbohne mittels Säschablone*

Nach dem Auflaufen der Saat, d. h. nach Keimung und Durchstoßen der Bodenkrume (Abbildung 32) wurde der Mais auf zwei Pflanzen und die Ackerbohne auf sechs Pflanzen pro Topf ohne spezielles System ausgedünnt.



*Abbildung 32: Auflaufen von Ackerbohne (Vordergrund) und Mais (Hintergrund) im TFZ-Gewächshaus (Tag 12 nach der Aussaat)*

Um konstante Wachstumsbedingungen zu gewährleisten, wurde der Versuch in einem temperierten Gewächshaus durchgeführt, das ein typisches mitteleuropäisches Frühlingsklima simulierte (Abbildung 32).

Die Bewässerung der Töpfe erfolgte automatisch unter Verwendung der mit Tensiometern (E-Sensoren von bambach GbR Tensio-Technik) gemessenen Saugspannung in ausgewählten Pflanztöpfen. Die Tische, auf die die Töpfe gestellt wurden, sind als flache Wannen konstruiert. Während der Bewässerung wird Wasser in die Wanne gefüllt und die Töpfe werden von unten bewässert. Diese Methode verhindert das Auswaschen der Nährstoffe. Es zeigte sich jedoch während des Versuchs, dass mit dieser Methode die Töpfe in der Tischmitte feuchter waren und daher besser mit Wasser versorgt wurden als die Pflanzen am Rand. Ursächlich hierfür war eine leichte Durchbiegung der Tische zum Rand hin, verbunden mit einer insgesamt recht geringen Wassergabe je ausgelöster Bewässerung. Um diesem Effekt zu begegnen, erfolgte am Tag 54 der Umbau auf Tröpfchenbewässerung der Gefäße. Die Steuerung der Tröpfchenbewässerung beruhte ebenfalls auf der Tensiometermessung in ausgewählten Gefäßen. Der neue Bewässerungsaufbau führte zur Vernässung von Gefäßen mit geringem Pflanzenwachstum. In zukünftigen Versuchen sollte daher das Bewässern in mehreren Linien und gruppiert nach tatsächlichem

Biomasseaufkommen des Gefäßes erfolgen, um allen Pflanzen optimale Voraussetzungen zu bieten.

Die Aussaat von Mais und Ackerbohne fand am 09.10.2019 (KW 41) statt. Am Tag 56 erfolgte beim Mais eine zweite Ammoniumnitratgabe in Höhe von 2 g pro Gefäß. Die Ernte erfolgte 90 Tage nach Aussaat am 08.01.2020 (KW 2). Während der Vegetationsperiode wurden die Pflanzen zweimal bonitiert (Tag 34 und Tag 71). Bei Mais wurden die mittlere Rotfärbung und die mittlere Pflanzenlänge (gestreckte Blätter) pro Gefäß betrachtet, bei der Ackerbohne wurde jeweils die mittlere Wuchshöhe ermittelt. Am Ende des Versuchszeitraums wurde nach Ernte und Trocknung der Biomasse der Trockenertrag der oberirdischen Pflanzenteile ermittelt.

### 8.1.2 Statistik

Die statistische Auswertung der Bonituren und der Trockenmasseerträge erfolgte mit der Software OriginPro 2019. Dazu wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung und Bonferroni-post-hoc-Test mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p = 0,05$  durchgeführt. Die beiden betrachteten Faktoren sind Düngerart und Düngestufe. Die durchgeführte Analyse ermöglicht den Vergleich von Mittelwerten innerhalb der Düngerarten und innerhalb der Düngestufen.

## 8.2 Ergebnisse und Diskussion

### 8.2.1 Versorgung der Varianten mit Phosphor und Kalium

Die Kulturen Mais und Ackerbohne verursachen einen bestimmten Entzug an Nährstoffen. Die Entzüge<sup>2</sup> wurden auf die Pflanzen und nicht auf das Pflanzsubstrat von vier Litern bezogen, da der Mais im Topf sechsmal dichter stand als auf dem Acker. Die Ackerbohnen standen zweieinhalbmal dichter. Die relative Kompensation dieser Entzüge an P und K für Mais und Ackerbohne in den vier Düngestufen der Aschen veranschaulicht Abbildung 33.

Bei Mais sind die relativen Kompensationen für die Aschen 1 und 2 bezüglich P und K recht ähnlich. Sie variieren zwischen 14 und 85 %. Die Asche 3 liefert weniger Nährstoffe und erreicht selbst in der höchsten Düngestufe weniger als 60 % des potenziellen Entzugs. Insgesamt konnte mit keiner der Aschen bei einer Düngestufe von 300 % der potenzielle Nährstoffentzug durch den Mais vollständig kompensiert werden.

Die Ackerbohne hat im Vergleich zum Mais einen geringeren Bedarf an P und K. So kommt es bei den Aschen 1 und 2 für K bereits bei der 50-%-Variante zu einer Überschreitung des Entzugs. Für P entspricht die 100-%-Variante in etwa dem Entzug. In der Folge ergibt sich bei höheren Düngestufen ein deutliches Überangebot an P und K. Die Asche 3 liefert weniger P und K. Für P wird der Entzug ab einer Konzentration von 200 % überschritten, für K schon ab der Konzentration 100 %.

---

<sup>2</sup> Dabei handelt es sich um theoretische Entzüge, da die Pflanzen vor der Reife geerntet wurden.

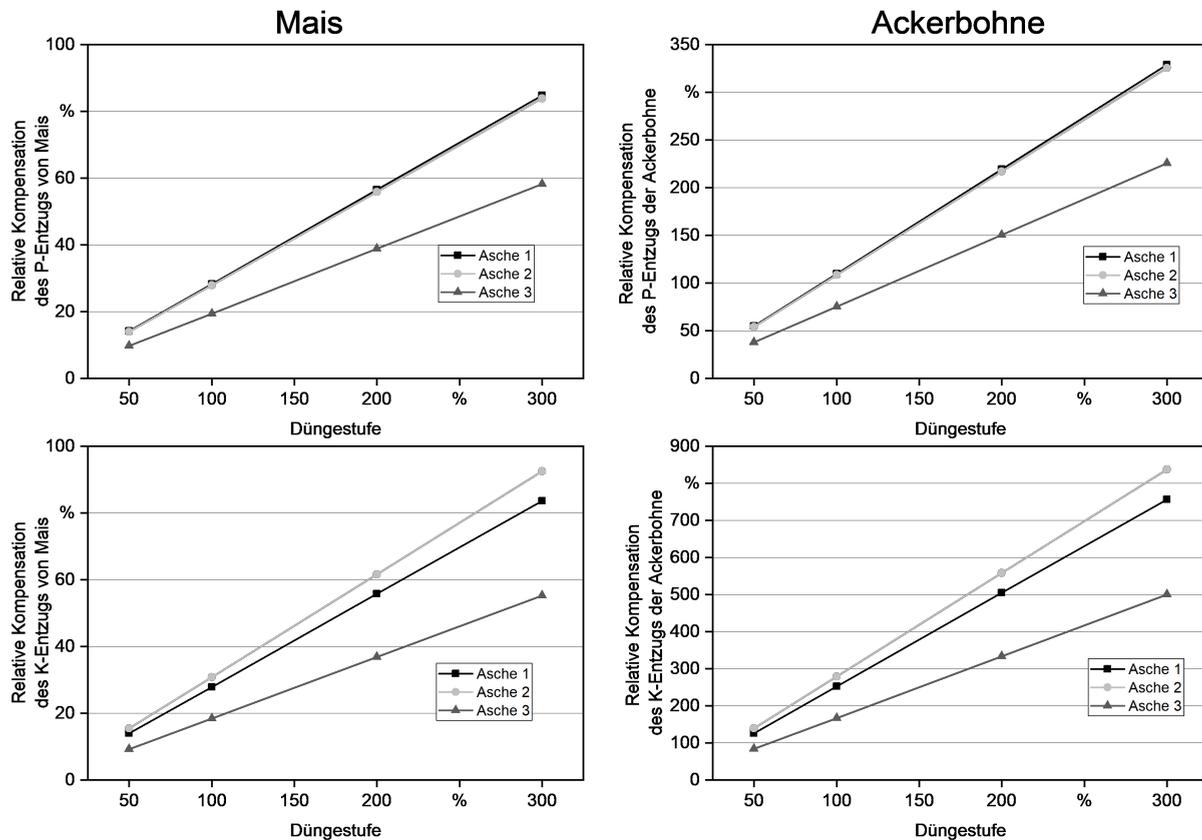


Abbildung 33: Kompensation des P- und K-Entzugs bei Mais und Ackerbohne in den vier Düngestufen

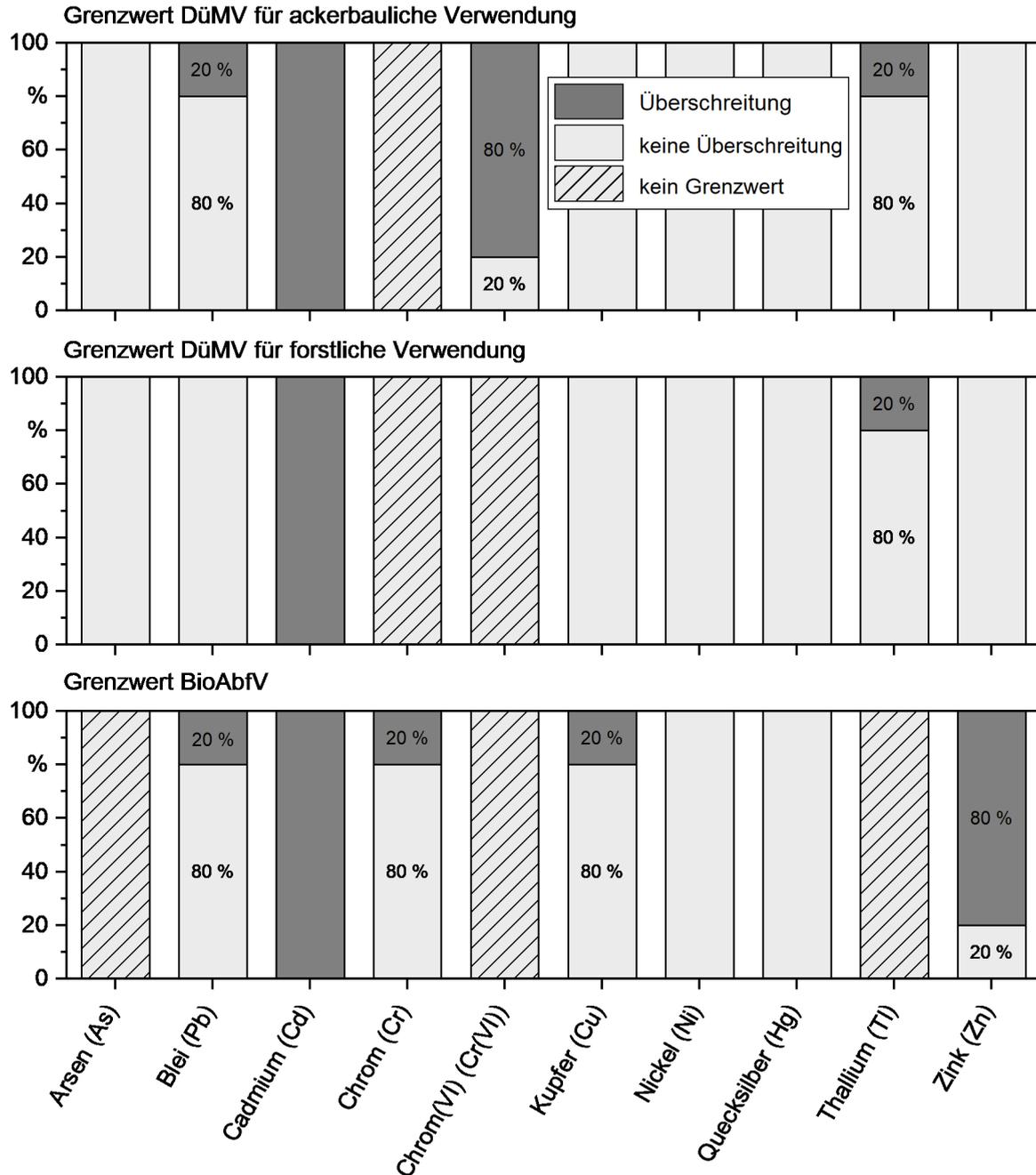
### 8.2.2 pH-Werte im Boden

Abbildung 34 zeigt die pH-Werte, die sich durch die zugemischten Düngemengen zu Beginn des Versuchs (fünf Tage nach Mischung und Anfeuchtung des Substrats) und sieben Wochen später einstellten. Pro Variante wurde jeweils ein Pflanztopf gemessen ( $n = 1$ ).

In der Grafik ist ein für den Mais anzustrebender pH-Bereich zwischen pH 6 und pH 7,2 eingezeichnet. Für die Ackerbohne liegt der anzustrebende Bereich zwischen pH 6,5 und pH 7,2. Das linke Säulencluster zeigt die pH-Werte in der Nullprobe. Die niedrigen pH-Werte zwischen pH 4,3 und pH 4,7 resultieren aus der Zumischung von Torf. Mineralische Ackerböden in Bayern haben in der Regel höhere pH-Werte von  $> \text{pH } 5,5$ .

Mit dem Branntkalk werden schnell sehr hohe pH-Werte (in der höchsten Konzentration bis pH 7,9) erreicht. Asche 1 verhält sich bezüglich der pH-Entwicklung ähnlich wie die Mischkalkvarianten. Asche 2 (trocken entascht) führt, wie Asche 3 (Nassentaschung), zu pH-Werten, die hinter den Mischkalkvarianten zurückbleiben. Mit Ausnahme der Ackerbohne bei Asche 2 und den Branntkalkvarianten ist über den Versuch hinweg eine leichte pH-Zunahme zu beobachten. Im Branntkalk liegt das Calcium als Oxid vor und wird rasch und vollständig mit dem Bodenwasser zu Calcium-Ionen und Lauge umgewandelt. Im Mischkalk und in den Aschen liegt ein Teil des Calciums als Carbonat vor, das im Vergleich zu Calciumoxid verzögert reagiert.

Insgesamt wurde nur mit den Brannt- und Mischkalkvarianten bei der Variante „100 %“ der angestrebte pH-Bereich von > 6 bis < 7,2 sicher erreicht. Bei den Aschen sind höhere Mengen erforderlich, um den gewünschten pH-Bereich einzuhalten.



Mischung aus Rost- und Kesselaschen mit Zyklonaschen (n = 5)

Abbildung 34: pH-Messung bei den Gefäßversuchen, Messzeitpunkte zehn Tage nach Substratmischung und Anfeuchtung sowie sechs Wochen später (n = 1) (grau hinterlegter Bereich entspricht dem angestrebten pH-Bereich für Mais zwischen pH 6 und pH 7,2)

### 8.2.3 Entwicklung der Pflanzen

Der Entwicklungsstand der Pflanzen wurde zu zwei Zeitpunkten durch Bonitierungen erfasst. Beim Mais wurden die mittlere Rotfärbung und die mittlere Pflanzenlänge, bei der Ackerbohne die mittlere Wuchshöhe bonitiert.

#### 8.2.3.1 Mais

Abbildung 35 zeigt die mittlere Rotfärbung auf einer Skala von 1 bis 9 (1 = ohne Symptom, 9 = extremes Symptom). Maispflanzen reagieren auf einen Phosphormangel mit einer rötlichen Verfärbung der Blätter [60]. Die stärkste Rotfärbung zeigten die mit Kalk gedüngten Varianten und die Variante ohne Düngung. Auch bei den mit Asche gedüngten Varianten nahm die Rotfärbung von Tag 35 bis Tag 71 geringfügig zu. Die Asche 3 aus der Nassentaschung und dem geringsten P-Angebot (Abschnitt 8.2.1) zeichnete dabei stärker als die beiden trocken entaschten Varianten. Außerdem zeigten mit Asche 3 gedüngte Maispflanzen deutliche Unterschiede in der Rotfärbung zwischen den Konzentrationsstufen. Während die Variante 50 % Rotfärbungen über 3,5 zeigte, lagen diese bei der 300-%-Variante im Mittel zwischen 1,3 und 2,2.

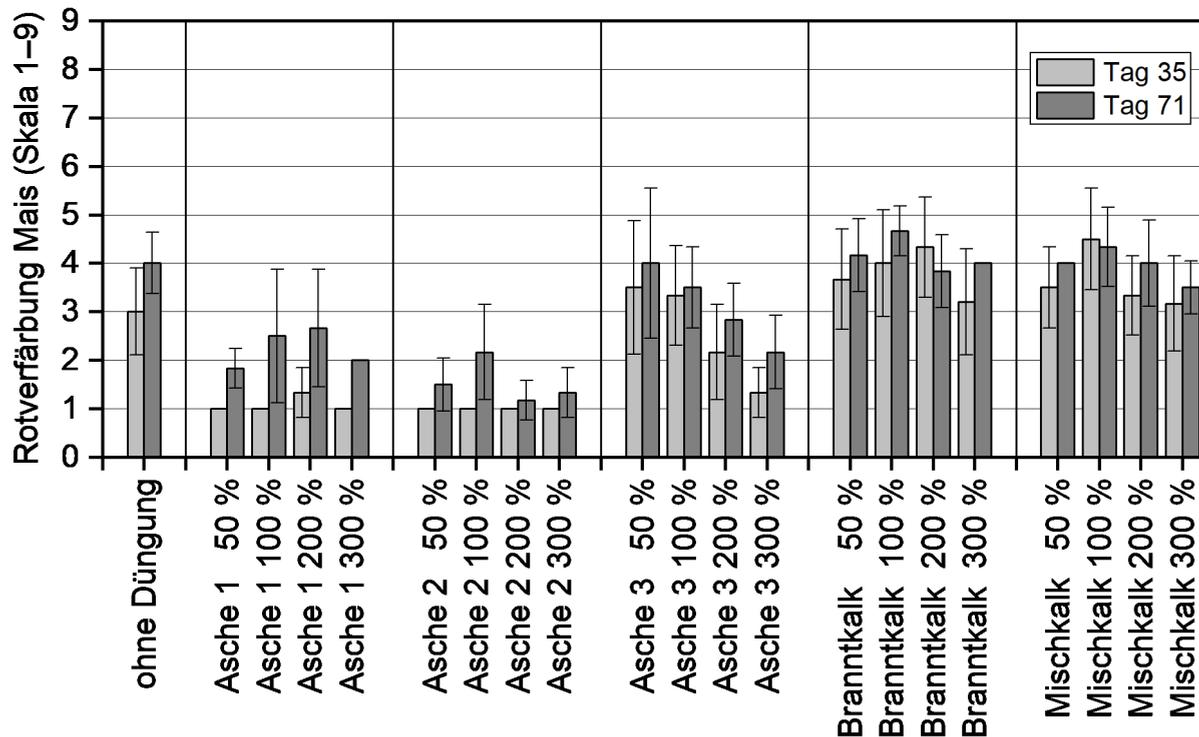


Abbildung 35: Bonitur der Rotfärbung von Mais auf einer Skala von 1 bis 9 an den Tagen 35 und 71 nach Aussaat (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung,  $n = 6$ )

Die Varianzanalyse (ANOVA) ergab, dass sich die Rotfärbung am Tag 71 nach der Aussaat bei allen mit Asche gedüngten Varianten signifikant von der Rotfärbung der nicht gedüngten Variante und den gekalkten Varianten unterschied (Mittelwert je Düngevariante

über alle Düngestufen,  $p \leq 0,05$ ). Dies war auch zur ersten Bonitur am Tag 35 der Fall, mit Ausnahme von Asche 3, die sich im Mittel zwar signifikant von den gekalkten Varianten unterschied, nicht jedoch von der Variante ohne Düngung.

Die Düngestufen bei den jeweiligen Düngern unterschieden sich nur bei Asche 3 signifikant voneinander, wobei die Rotfärbung mit höherer Düngemittelgabe abnahm. Beim ersten Termin bestand zwischen den Düngestufen 50 % und 100 % ein signifikanter Unterschied zur Düngestufe 300 %. Beim zweiten Termin bestand der signifikante Unterschied nur noch zwischen der 50%-Variante und der 300%-Variante.

Aufgrund der Rotfärbung könnte davon ausgegangen werden, dass die mit Asche gedüngten Maispflanzen besser mit P versorgt waren als die anderen Varianten. Die Ergebnisse deuten somit darauf hin, dass der Phosphor in den Aschen zu einem gewissen Grad pflanzenverfügbar ist. Vor allem die Aschen 1 und 2 aus der Trockenentaschung scheinen dabei schon in der Variante 50 % genug P zu liefern. Dies könnte an den insgesamt höheren P-Gehalten (vgl. Abbildung 33) oder/und einer besseren Verfügbarkeit von P in den trocken entaschten Aschen liegen.

Abbildung 36 zeigt die Änderung der mittleren Wuchshöhe für Mais. Die längsten Pflanzen wuchsen im Mittel in den mit Asche 2 gedüngten Gefäßen. Die kürzesten Pflanzen waren die mit Kalk gedüngten Varianten, gefolgt von der Variante ohne Düngung. Die mit Asche 3 gedüngten Varianten lagen dazwischen. Die Rangfolge der mittleren Längenentwicklung zwischen den unterschiedlichen Düngern veränderte sich zwischen den beiden Bonituren an Tag 35 und 71 nicht.

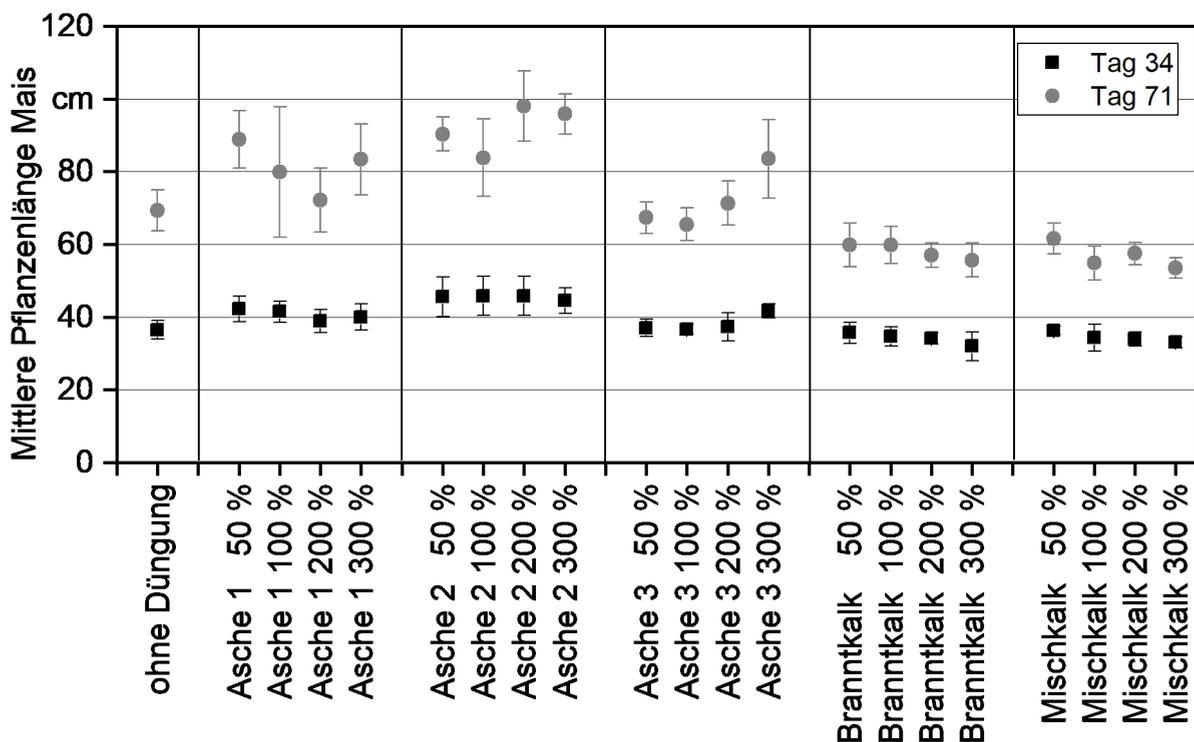


Abbildung 36: Bonitur der mittleren Pflanzenlänge von Mais an den Tagen 34 und 71 nach der Aussaat (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung,  $n = 6$ )

Die Varianzanalyse (ANOVA) belegt bei beiden Boniturterminen eine signifikant kürzere mittlere Pflanzenlänge der Nullvarianten und der gekalkten Varianten als bei den mit Asche 1 und Asche 2 gedüngten Varianten (Mittelwerte je Variante über alle Dünge­stufen,  $p \leq 0,05$ ). Die Unterschiede zwischen Asche 1 und Asche 3 sowie zwischen Asche 2 und Asche 3 waren in vielen Fällen ebenfalls signifikant. Die Pflanzenlängen der mit Asche 3 gedüngten Pflanzen unterschieden sich bei beiden Terminen nicht signifikant von der Nullvariante, waren jedoch im Vergleich zu den Varianten Branntkalk und Mischkalk signifikant erhöht. Blickt man auf die Analyse der Dünge­stufen innerhalb einer Düngerart, traten aufgrund der unterschiedlich hohen Dünge­gabe bei Asche 3 am zweiten Termin signifikante Unterschiede zwischen den Dünge­stufen 300 % und 50 % bzw. 100 % auf. Bei Asche 1 war die Pflanzenlänge bei Dünge­stufe 200 % am zweiten Termin unerwarteterweise signifikant kürzer als bei der 50-%-Variante.

Der Effekt eines stärkeren Längenwachstums bei Zugabe von Aschen könnte auf das zusätzliche Angebot an Nährstoffen wie Kalium oder Phosphor zurückzuführen sein. Asche 3 kann diese Nährstoffe wohl nicht in der gleichen Weise liefern. Dies kann zum einen an der geringeren P- und K-Gabe liegen (Abbildung 33), zum anderen könnte eine geringere Löslichkeit der Nährstoffe vorliegen.

Die Ergebnisse zur Längenentwicklung beim Mais korrelieren negativ mit der Bonitur auf Rotfärbung (s. o.). Wie erwartet geht eine stärkere Rotfärbung also mit einer geringeren Pflanzenlänge einher.

### 8.2.3.2 Ackerbohne

Die durchschnittliche Wuchshöhe der Ackerbohne liefert ein ähnliches Bild wie beim Mais (Abbildung 37).

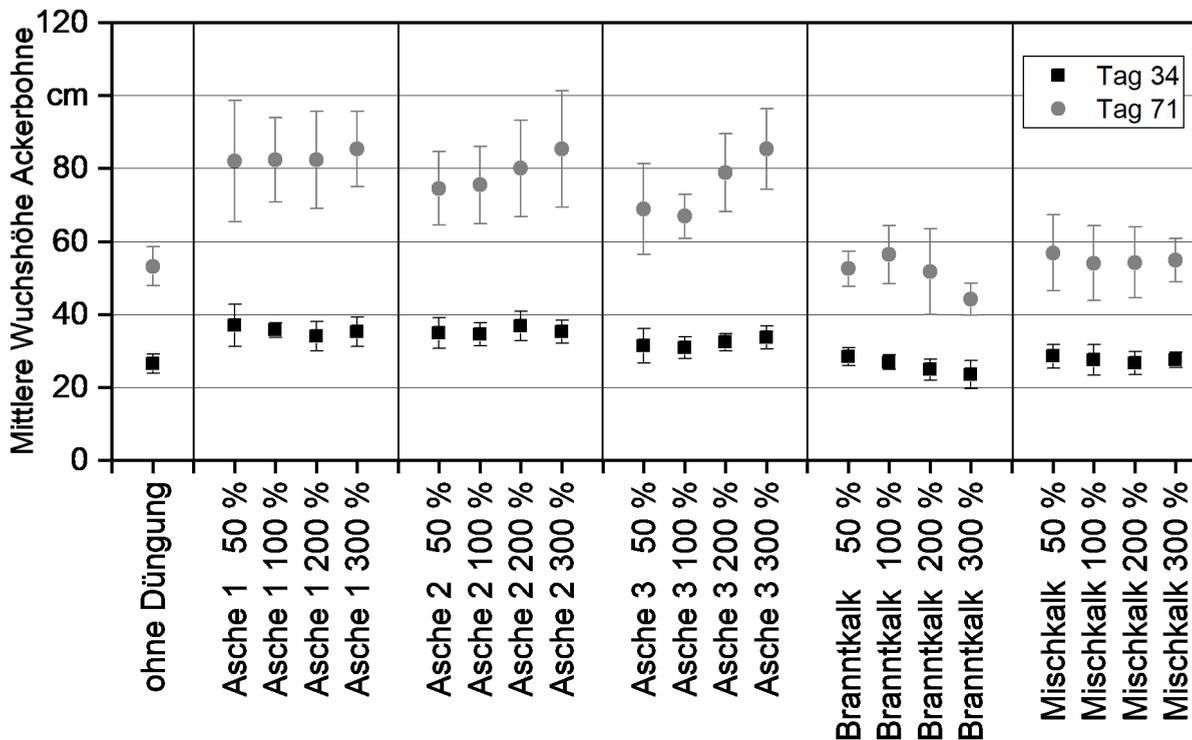


Abbildung 37: Bonitur der mittleren Wuchshöhe der Ackerbohnen an den Tagen 34 und 71 nach der Aussaat (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung,  $n = 6$ )

Alle Pflanzen der mit Asche gedüngten Varianten waren signifikant höher gewachsen als die Varianten ohne Düngung oder bei Düngung mit Brannt- und Mischkalk. Nur zum ersten Termin waren die durchschnittlichen Wuchshöhen der mit Asche 1 und Asche 2 gedüngten Varianten (gemittelt über alle Dünge­stufen) signifikant größer als bei Asche 3. Dieser Unterschied verschwand allerdings ab der 200-%-Variante, bei der die mit Asche 3 gedüngten Pflanzen den Größenrückstand bis zum zweiten Boniturtermin fast aufholen konnten.

Innerhalb der jeweiligen Dünger gab es bezüglich der Dünge­stufen keine signifikanten Unterschiede. Bei den Aschen 2 und 3 waren zum zweiten Termin jedoch deutlich ansteigende, mittlere Wuchshöhen mit den höheren Dünge­stufen zu beobachten.

### 8.2.4 Trockenmasseerträge

Die Trockenmasseerträge zeigten für Mais (Abbildung 38) und Ackerbohne (Abbildung 39) ähnliche Tendenzen innerhalb der Düngevarianten.

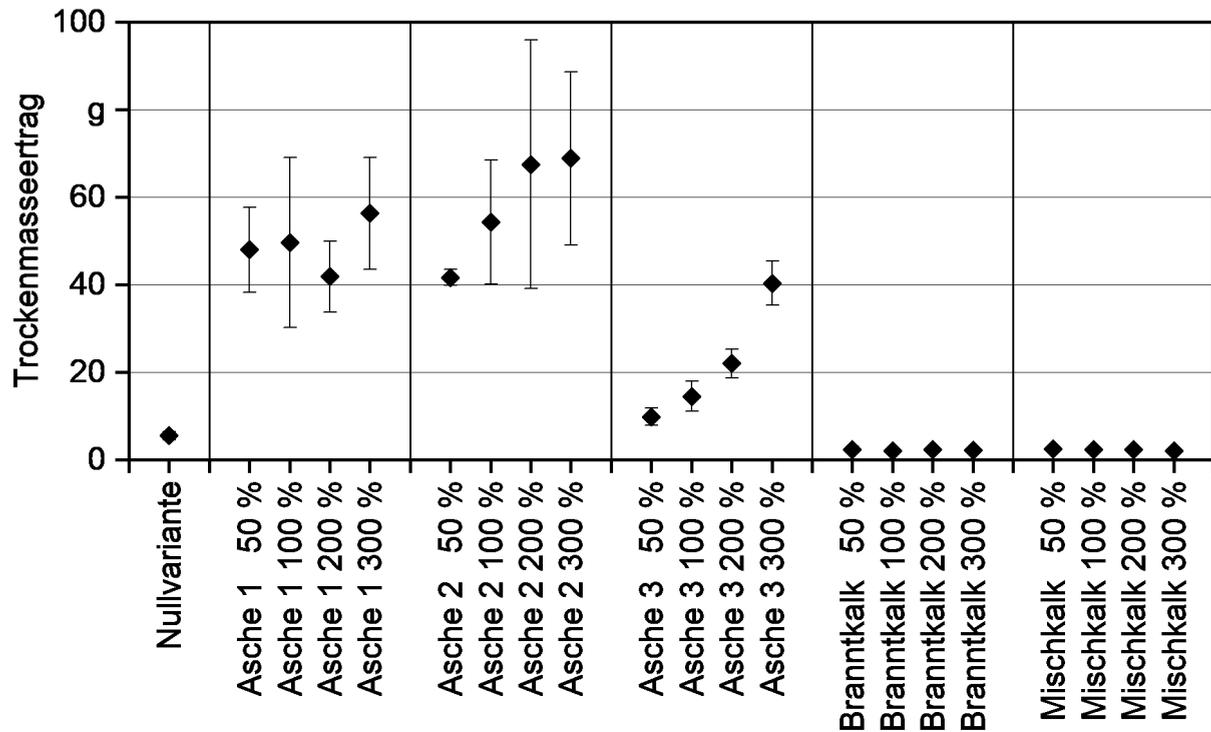


Abbildung 38: Mittlerer Trockenmasseertrag ( $\pm$  Standardabweichung) bei Mais ( $n = 6$ ) in Abhängigkeit von der Düngevariante

Die mit Asche gedüngten Pflanzen hatten dabei durchweg höhere Trockenmasseerträge als die mit Brant- bzw. Mischkalk gedüngten Varianten. Die Varianten mit den beiden Aschen aus den trocken entaschenden Anlagen (Aschen 1 und 2) schnitten im Mittel über alle Düngegestufen hinweg wiederum besser ab als die Varianten mit der nährstoffarmen Asche aus der Nassentaschung (Asche 3). Dieser Unterschied war beim Mais stärker ausgeprägt als bei der Ackerbohne. Während beim Mais die 300-%-Variante mit Asche 3 gerade einmal den Ertrag der 50-%-Düngung mit Asche 2 erreichte (40 g Trockenmasse), schaffte die Ackerbohne mit der 200-%- und 300-%-Variante bereits über 30 g TM und lag damit nur knapp hinter den maximalen Erträgen der Asche 2. Die Erträge der gekalkten Varianten reichten sowohl für Mais als auch für Ackerbohne i. d. R. nicht über den Ertrag der Nullvariante hinaus. Dies lag vermutlich am kompletten Fehlen von P und K im verwendeten Substrat.

Die statistische Auswertung der Trockenmasseerträge des Mais ergab, dass die Erträge bei der Düngung mit den Aschen 1 und 2 über alle Düngegestufen hinweg signifikant höher waren als diejenigen der Nullvariante und der gekalkten Varianten. Für Asche 3 war der Unterschied zur Nullvariante und zu den gekalkten Varianten nur für die Düngegestufe 300 % signifikant.

Den höchsten Ertrag erzielte der Mais in der 300-%-Variante mit Asche 2 (69 g TM). Allerdings brachte die 300-%-Düngestufe bei Asche 2 keinen wesentlichen Mehrertrag im Vergleich zu der 200-%-Variante. Auch bei Asche 1 war ein Mehrertrag bei Mais durch höhere Aschemengen nicht eindeutig belegbar. Bei der 200-%-Variante im Mais kam es aus unbekanntem Gründen sogar zu einer Abnahme im Trockenmasseertrag (vgl. auch die kürzeren Pflanzenlängen an Termin 2, siehe Abbildung 36). Dieser Effekt kann anhand der Daten nicht abschließend erklärt werden. Nichtsdestotrotz ist aus den Trockenmasseerträgen des Mais ein Einfluss der Düngestufe sichtbar. So waren die Trockenmasseerträge der Düngestufen 200 % und 300 % von Asche 2 signifikant höher als die der 50-%-Variante. Bei Asche 3 war die 300-%-Variante der 50-%- und der 100-%-Variante signifikant überlegen. Lediglich für Asche 1 konnte kein signifikanter Unterschied in den Trockenmasseerträgen des Mais zwischen den Düngestufen festgestellt werden.

Die höchsten Trockenmasseerträge der Ackerbohne zeigten sich bei der Düngung mit Asche 1 in der 300-%-Variante (47 g TM, Abbildung 39). Ähnlich wie beim Mais unterschieden sich die Erträge der Ackerbohnen bei der Düngung mit den Aschen 1 und 2 für alle Düngestufen signifikant von der Nullvariante und den gekalkten Varianten. Für Asche 3 war der Unterschied zur Nullvariante und zu den gekalkten Varianten nur für die Düngestufen 200 % und 300 % signifikant.

Die Ackerbohne reagierte bei einer höheren Aschedüngung durchgehend mit höheren Erträgen. Die Anstiege erfolgten unterschiedlich stark, wobei Asche 3, wie schon beim Mais, die deutlichste Zunahme in Abhängigkeit von der Düngestufe zeigte. Bei der Ackerbohne konnten für alle drei Aschen signifikante Unterschiede innerhalb der Düngestufen festgestellt werden. Bei Asche 1 waren die Erträge der Düngestufe 300 % gegenüber den beiden Stufen 50 % und 100 % signifikant erhöht. Bei Asche 2 unterschied sich die 300-%-Stufe signifikant von der Düngestufe 50 %. Auch für die Erträge von Asche 3 waren signifikante Effekte zwischen der 50-%-Variante und den Erträgen der Düngestufen 200 % und 300 % sowie zwischen den Düngestufen 100 % und 300 % messbar.

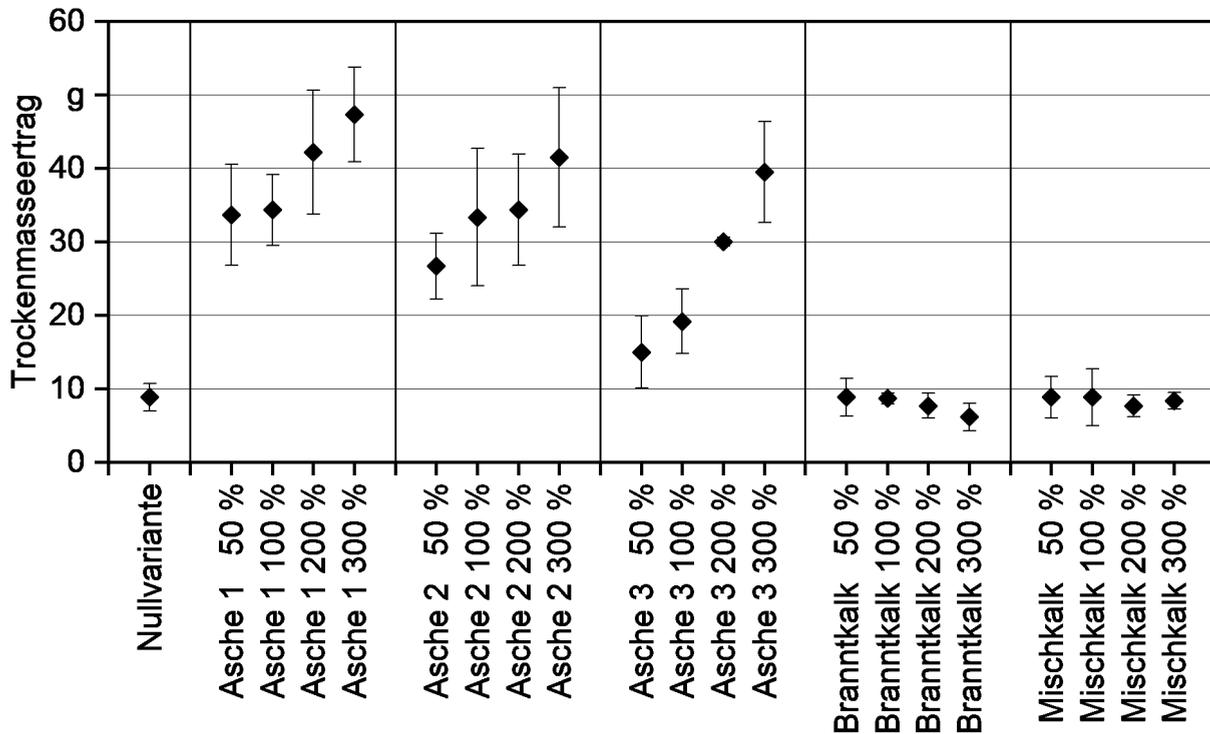


Abbildung 39: Mittlerer Trockenmasseertrag ( $\pm$  Standardabweichung) bei Ackerbohne ( $n = 6$ ) in Abhängigkeit von der Düngevariante

Sowohl bei Mais als auch bei Ackerbohne fällt auf, dass die Trockenmasseerträge bei der Düngung mit den Aschen 1 und 2 erheblich schwankten (siehe Standardabweichung in Abbildung 38 und Abbildung 39), während die Erträge aus den mit Asche 3 gedüngten Gefäßen recht konstant über die jeweils sechs Wiederholungen ausfielen. Der Effekt der geringeren Schwankung war bei Mais stärker ausgeprägt als bei der Ackerbohne.

Weitere Randbedingungen, die neben der Düngung die Ergebnisse zum Trockenmasseertrag, aber auch die mittlere Pflanzenlänge oder die mittlere Wuchshöhe beeinflusst haben könnten, sind die Aufstellung der Pflanzen und die Wasserversorgung. Aufgrund der dichten Aufstellung der Pflanzen auf den Pflanztischen erhielten schlechter entwickelte Pflanzen zunehmend weniger Sonnenlicht, da sie im Schatten der besser entwickelten Pflanzen standen. Der Effekt einer stärkeren Beschattung ist sicher eine Ursache der niedrigen Trockenmasseerträge der Kalkvarianten und der Nullvariante und könnte sich beispielsweise auch auf Varianten der Asche 3 ausgewirkt haben. Ein weiterer Nachteil für die weniger wüchsigen Pflanzen könnte in einer möglichen Überversorgung mit Wasser bestanden haben. Diese ergab sich durch die Verwendung von Tensiometern zur Bewässerungssteuerung, die sich vornehmlich in Gefäßen mit normal entwickelten Pflanzen befanden (siehe Abschnitt 8.1.1). Beide Effekte (Beschattung, Wasserversorgung) lassen sich durch ein angepasstes Versuchsdesign im Gewächshaus minimieren. Die während des Versuchs vorgenommene Anpassung der Bewässerungssteuerung brachte allerdings nur eine geringfügige Verbesserung (siehe Abschnitt 8.1.1).

Abbildung 40 zeigt die prozentuale Deckung des potenziellen Entzugs an Phosphor und Kalium bei Mais und Ackerbohne in den verschiedenen Düngegraden und die daraus

resultierenden Trockenmasseerträge. In den Grafiken links unten ist jeweils die Nullvariante zu sehen. Für jede Asche sind die Erträge der vier Düngestufen (50 %, 100 %, 200 % und 300 %) als Punkte dargestellt und mit einer Linie verbunden. Bei den Aschen 1 und 2 vervielfachen die 50%-Variante und die damit verbundene K- und P-Gabe den Ertrag der Nullvariante. Die niedrigste Düngestufe deckt bei beiden Aschen 14 bzw. 15 % des potenziellen P- und K-Entzugs von Mais ab (x-Achse der beiden linken Diagramme). Auch bei der Ackerbohne resultiert die niedrigste Düngegabe der Aschen 1 und 2 in einem um das drei- bis vierfach höheren Ertrag im Vergleich zur Nullvariante. Die Aschen decken dabei 54 % (Asche 1) bzw. 55 % (Asche 2) des potenziellen P-Bedarfs und 126 % bzw. 139 % des K-Bedarfs.

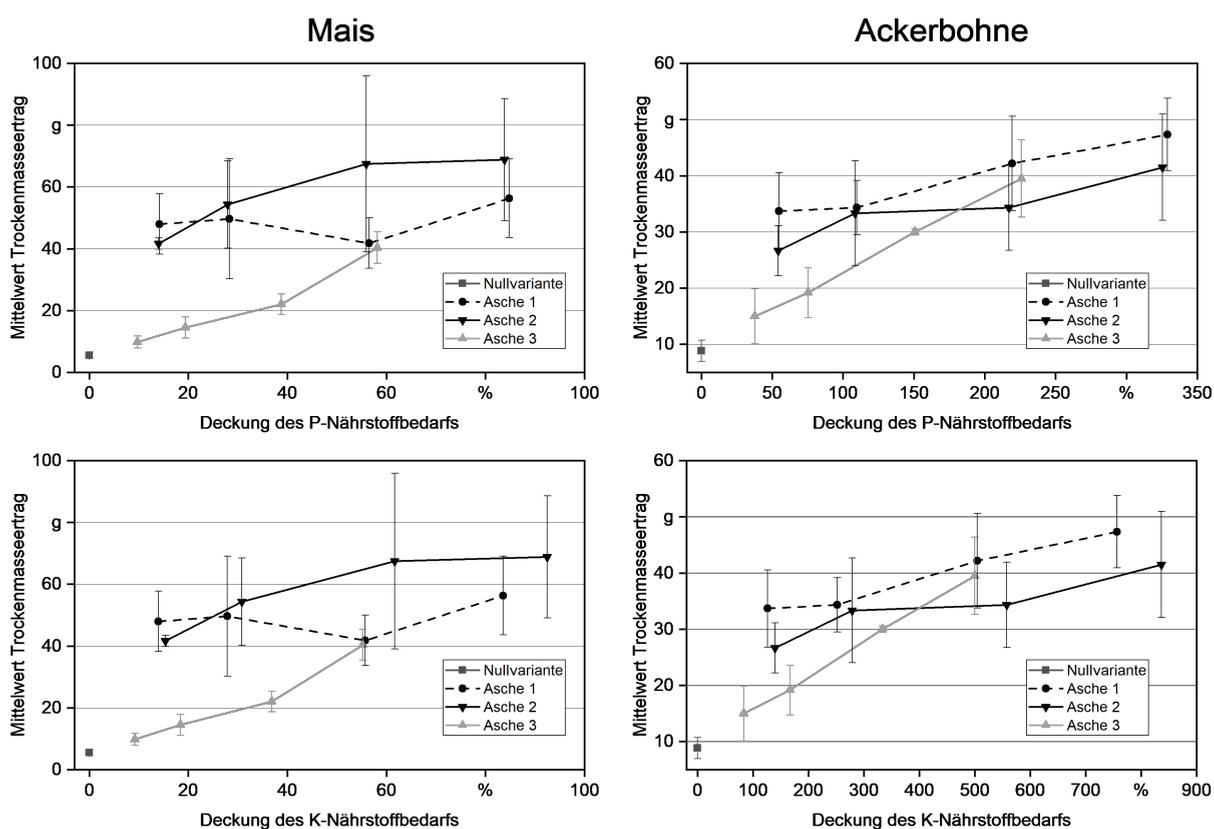


Abbildung 40: Mittlerer Trockenmasseertrag bei Mais und Ackerbohne (n = 6) in Abhängigkeit von der Deckung des potenziellen Phosphor- und Kaliumentzugs (Mittelwert ± Standardabweichung)

Asche 3 liefert aufgrund der geringeren Nährstoffkonzentration in der niedrigsten Düngestufe ein Drittel weniger P und K und der Ertrag der Pflanzen erreicht sowohl für Ackerbohne als auch für Mais nur ein Viertel im Vergleich zu den mit den Aschen 1 und 2 gedüngten Varianten. Die höheren Düngestufen erbrachten bei Asche 3 deutliche Ertragssteigerungen bis zum Vierfachen bei Mais und bis zum 2,7-Fachen bei der Ackerbohne. Asche 3 lieferte in der 300%-Variante so viel P und K wie die Aschen 1 und 2 in der 200%-Variante. Mit Asche 3 im Mais erreichte nur die 300%-Variante die Erträge der beiden anderen Aschen.

Der steile Anstieg im Trockenmasseertrag bei Asche 3 könnte neben einer höheren Gesamtmenge an P und K auch an einem Einfluss des pH-Werts liegen (Abbildung 34). BLUME et al. (2016) [2] geben für die optimale P-Löslichkeit einen pH-Bereich zwischen pH 6 und 6,5 an. Die abnehmende Rotfärbung mit höherer Düngestufe (Abbildung 35) deutet ebenso auf eine bessere P-Verfügbarkeit hin.

Ob die beobachteten Ertragseffekte rein auf Phosphor, Kalium oder den pH-Wert bzw. auf eine Mischung aller drei Faktoren zurückzuführen sind, lässt sich anhand der hier dargestellten Auswertung allerdings nicht abschließend ermitteln, da in allen drei Aschen das Verhältnis zwischen P und K ähnlich groß ist (Tabelle 18). In weiterführenden Untersuchungen sollten neben reinen Trockenmasseerträgen und der Bonitierung gezielt Pflanzen- und Bodenproben auf ihre P- und K-Gehalte hin untersucht werden. Im Rahmen des Projekts „AshUse“ wurden hierzu Proben eingelagert, um ggf. in einem Nachfolgeprojekt darauf zurückgreifen zu können.

*Tabelle 18: Verhältnis von Kaliumoxid zu Phosphat ( $P_2O_5$ ) in den Aschen*

| Eingesetztes Düngemittel | Verhältnis von Kaliumoxid zu Phosphat |
|--------------------------|---------------------------------------|
| Asche 1                  | 2,7                                   |
| Asche 2                  | 2,6                                   |
| Asche 3                  | 3,0                                   |

### 8.3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Gefäßversuch hat gezeigt, dass Rost- und Kesselaschen aus der Verbrennung von Holz über die reine Kalkwirkung hinaus deutliche Düngeeigenschaften aufweisen. Eine Zuordnung dieser Eigenschaft auf einen speziellen Nährstoff (z. B. P oder K) ist aus den hier dargestellten Ergebnissen allerdings nicht möglich. Sollte sich in weiterführenden Versuchen zeigen, dass v. a. der Phosphor in den Holzaschen in pflanzenverfügbarer Form vorliegt, könnte Recyclingdünger aus Holzasche eine wertvolle Ressource, beispielsweise für den Ökolandbau werden.

Die hier dargestellte Untersuchung zur Düngewirkung von Rost- und Kesselaschen aus Biomasseheiz(kraft)werken gibt zahlreiche Anregungen für nachfolgende Versuche:

- Wesentlicher Schwerpunkt weiterführender Versuche muss die Differenzierung der Düngeeffekte von P und K sein. Hierzu könnten die gekalkten Varianten gezielt mit Kalium versetzt werden, um die Aschen hinsichtlich ihrer Basizität und ihres Kaliumgehalts, nicht jedoch bezüglich P abzubilden. Eine von den mit Asche gedüngten Böden abweichende Wuchsleistung würde dann auf einen direkten P-Düngeeffekt hindeuten. Zum Vergleich könnte eine zusätzliche Variante mit mineralischer P-Düngung in das Versuchsdesign integriert werden.

- 
- Weiterhin ist sicherzustellen, dass sich die Pflanzen gegenseitig weniger beeinflussen, z. B. durch Beschattung oder durch einen Einfluss auf die Bewässerung (siehe Abschnitt 8.2.4). Durch Einzelstellen der Pflanzen und individuelle Bewässerung per Waage lassen sich Effekte der gegenseitigen Beschattung und der Unter- bzw. Überversorgung mit Wasser vermeiden.
  - Die Ackerbohne lieferte beim Gefäßversuch recht klare Ergebnisse. So führte eine höhere Düngung beispielsweise zu höheren Erträgen. Allerdings ist diese Pflanze wenig relevant für die landwirtschaftliche Praxis und es handelt sich nicht um eine übliche Versuchspflanze. Eine gute Alternative wäre das Weidelgras. Hier bestehen, ähnlich wie beim Mais, viele Erfahrungen aus Düngeversuchen mit Recyclingdüngern. Als Dauerkultur bietet sich Weidelgras auch für mehrere Ernten und damit für Erschöpfungsversuche an, die Hinweise auf das gesamte nutzbare P im Substrat geben können.
  - Die drei Holzaschen wiesen eine Kalkwirkung auf, die vergleichbar mit dem verwendeten Mischkalk ist. Die Variante Branntkalk könnte somit zukünftig weggelassen werden.
  - Das verwendete gärtnerische Substrat hat den Vorteil, dass keine Nährstoffe enthalten sind. Somit kommen die Nährstoffe ausschließlich aus den eingebrachten Düngern. Für eine höhere Praxisrelevanz sollten zusätzliche Versuche mit realen Ackerböden durchgeführt werden.



## Zusammenfassung

Die Bioökonomie leistet einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen und zukunftsorientierten Entwicklung des Freistaats Bayerns. Vor allem durch die verstärkte Nutzung von Nebenprodukten und Reststoffen trägt die bayerische Bioökonomie zur Schonung der natürlichen Ressourcen bei. Bei der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe in Biomassefeuerungen fallen Verbrennungsrückstände in Form von Asche an. Gerade die stoffliche Nutzung von Biomasseaschen stellt die Praxis vor große Herausforderungen. Komplexe rechtliche Rahmenbedingungen, eine aufwändige Aschelogistik aufgrund des dezentralen Anfalls oder schwankende Qualitäten sind nur einige der Punkte, die bei der stofflichen Nutzung von Aschen berücksichtigt werden müssen.

Ziele des Projekts „AshUse“ sind Identifikation, Erprobung und Bewertung innovativer und praxisrelevanter Verwertungsmöglichkeiten von Aschen aus der Verbrennung von Biomasse. Der Fokus liegt dabei auf der stofflichen Verwertung im Hinblick auf die Bayerische Bioökonomiestrategie. Das Projekt ist in zwei Projektphasen angelegt. Die Ergebnisse der 1. Projektphase („AshUse“, Februar 2018 bis Juli 2020) sind in diesem Bericht wiedergegeben. Seit Oktober 2020 läuft eine 2. Projektphase („AshUse 2“).

Die jährlich in Bayern anfallende Aschemenge, die für eine stoffliche Verwertung relevant sein könnte, wurde auf Basis der in Bayern eingesetzten Energieholzmenge ermittelt. Die Rückstände von Holzvergasungsanlagen, der Altholzverbrennungen und aus sonstigen Brennstoffen (z. B. Schwarzlauge) wurden dabei nicht berücksichtigt. Außerdem wurde eine Mindestanlagengröße von 1 MW festgelegt, da angenommen wurde, dass erst ab dieser Größe eine wirtschaftlich vorteilhafte Ascheverwertung für die Betreiber bayerischer Biomasseheiz(kraft)werke möglich ist. Je nach Berechnung ergibt sich somit ein theoretisches jährliches Potenzial von 30.000 bis 60.000 t Asche (v. a. Rost- und Kesselasche), das für eine stoffliche Verwertung interessant ist (Bezugsjahr 2018).

Um den Status quo der Aschenutzung in Bayern zu ermitteln, wurde u. a. eine Umfrage zum Aschemanagement bayerischer Biomasseheiz(kraft)werke durchgeführt. Die Umfrage wurde an insgesamt 351 Heiz(kraft)werke in Bayern versendet und erreichte eine Rücklaufquote von 32 % ( $n = 114$ ). In den Antworten dominierten Anlagen mit Festbettfeuerung und Trockenentaschung. Nur wenige große Anlagen entaschen feucht. Bezüglich der Partikelreinigung im Abgas gaben 71 % der Betreiber an, dass ihre Anlage mindestens mit einem Zyklon ausgestattet sei. Die durchschnittliche Brennstoffzusammensetzung variiert zwischen den Leistungsklassen. Während die Anlagen der unteren Leistungsklassen ( $\leq 2,5$  MW) vorwiegend Nadelholzhackschnitzel, Sägewerksnebenprodukte (ohne Rinde), Hartholzhackschnitzel und Pellets einsetzen, dominiert bei Anlagen mit einer thermischen Leistung ab 2,5 MW Landschaftspflegematerial. Als Verwertungspfade für die Aschen wurden die Abgabe an Kompostwerke und Kalkwerke angegeben. Einige kleinere Anlagen gaben eine Eigenverwertung der Rostaschen an. Vor allem im Leistungsbereich  $< 15$  MW wird jedoch ein Großteil der Aschen über Deponien entsorgt. Herausforderungen bei der Umsetzung einer stofflichen Verwertung sind laut der Umfrage u. a. in rechtlichen Unsicherheiten, schwankenden Aschequalitäten und in gering erwarteten wirtschaftlichen Erlösen zu sehen. Häufig fehlt es auf Betreiberseite zudem an Wissen zu

Qualitätsmanagementstrategien, beispielsweise wie eine definierte Aschequalität zuverlässig eingehalten und nachgewiesen werden kann. Die Lagerdauer der anfallenden Rostaschen kann bei Anlagen bis 2,5 MW mehr als einen Monat betragen, während Anlagen über 2,5 MW die Aschen i. d. R. nur wenige Tage bis wenige Wochen lagern.

Durch gezielte Probenahme vor Ort wurden die Bandbreite und die Durchschnittswerte von Nähr- und Schadstoffen in Holzaschen bayerischer Biomasseheiz(kraft)werke ermittelt. Hierzu wurden Rost- und Kesselaschen, Gemische aus Rost- und Kesselaschen mit Zyklonaschen sowie reine Zyklonaschen aus 18 bayerischen Heiz(kraft)werken und aus einer Aschesammelstelle kleinerer Heizwerke gewonnen und analysiert ( $n = 50$ ). Die Untersuchung der Aschen umfasste Schwermetalle, Nährstoffe, pH-Wert, Wassergehalt und Glühverlust. In 30 % der Fälle konnten die Schwermetallgrenzwerte der Düngemittelverordnung in den beprobten Rost- und Kesselaschen direkt eingehalten werden. Sowohl beim Chrom(VI)-Wert als auch bei Cadmium und Blei kam es teilweise zu Überschreitungen der Grenzwerte (Chrom(VI): 62 %, Cadmium: 12 %, Blei: 4 %). Sollte der Chrom(VI)-Wert durch eine geeignete Aufbereitung, beispielsweise durch Anfeuchten der Aschen, reduziert werden, würden 85 % der Rost- und Kesselaschen die Grenzwerte der DüMV einhalten. Wegen der verbleibenden 15 % beanstandeter Aschen ist aber eine generelle vollständige stoffliche Verwertbarkeit von Holzaschen, beispielsweise als Düngemittel in der Landwirtschaft, zum jetzigen Zeitpunkt und ohne vorgeschaltetes Aschequalitätsmanagement kritisch zu hinterfragen. Doch die Analyse der Hauptnährstoffe ergab neben Kalium- und Calciumgehalten auch relevante Mengen an Phosphor in den Holzaschen, sodass diese bei Einhaltung der Grenzwerte nach DüMV u. a. für den ökologischen Landbau als Düngemittel interessant sein dürften.

Im Rahmen von Vorversuchen zu zukünftigen Forschungsschwerpunkten am TFZ wurde ein Gefäßversuch zur Düngewirkung von Holzaschen mit Ackerkulturen (Mais, Ackerbohne) durchgeführt. Als Düngemittel kamen drei Holzaschen und zwei Kalkdünger (Brantkalk, Mischkalk) zum Einsatz. Insgesamt wurden 252 Pflanzgefäße angelegt. In Bonituren konnte eine signifikante Verbesserung in der auf einen Phosphormangel hinweisenden Rotfärbung (Mais), in der Pflanzenlänge (Mais), bei der Wuchshöhe (Ackerbohne) und im Trockenmasseertrag bei einer Düngung mit Holzasche verglichen mit Kalk nachgewiesen werden. Beispielsweise ergaben sich für die mit Aschen gedüngten Varianten Trockenmasseerträge bis zu 69 g TM beim Mais und bis zu 47 g TM bei der Ackerbohne. Inwieweit diese Ergebnisse auf einen Effekt von Phosphor oder Kalium in den Rost- und Kesselaschen zurückzuführen ist, lässt sich anhand der bisherigen Arbeiten jedoch noch nicht abschließend bewerten. Bei einem nachgewiesenen P-Effekt könnte Holzasche unter anderem für den ökologischen Landbau als Düngemittel interessant sein.

Für die stoffliche Nutzung der Holzasche, beispielsweise zu Dünge Zwecken, aber auch für weitere Anwendungsbereiche, muss u. a. die Einhaltung möglicher Schadstoffgrenzwerte in den Rost- und Kesselaschen am Biomasseheiz(kraft)werk gewährleistet werden. Die geplanten weiterführenden Arbeiten am TFZ sollen daher auf den Bereich „Qualitätsmanagement bei der Erzeugung von Holzaschen am Biomasseheiz(kraft)werk“ fokussieren. Für die praktischen Arbeiten in der 2. Projektphase (Projekt „AshUse 2“) soll direkt auf die Erkenntnisse und die Kontakte aus der 1. Projektphase zurückgegriffen werden. Ziel des

bereits begonnenen Folgeprojekts ist u. a. die Erstellung eines Praxisleitfadens zum Qualitätsmanagement von Holzaschen. Als Zielgruppe stehen hierbei v. a. die Betreiber bayerischer Biomasseheiz(kraft)werke im Fokus.



## Quellenverzeichnis

- [1] BISCHOF, R.; SCHLEGEL, J.; HERING, T. (2020): Eignung von Biomasseaschen zur Nährstoffversorgung im Pflanzenbau. In: THÜRINGER LANDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND LÄNDLICHEN RAUM (TLLLR) (Hrsg.): Verwertung naturbelassener Biomasseaschen. 2. Fachgespräch. Jena, 05.03.2020. Jena: Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR), S. 1-23
- [2] BLUME, H.-P.; BRÜMMER G. W.; HORN R.; KANDELER, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; KRETZSCHMAR, R.; STAHR, K.; WILKE, B.-M. (2016): Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Aufl. , Berlin, Heidelberg: Springer, (unveränd. Nachdruck, Spektrum Akademischer Verlag), 569 Seiten, ISBN 9783662499597
- [3] BOHRN, G.; STAMPFER, K. (2014): Untreated Wood Ash as a Structural Stabilizing Material in Forest Roads. Croatian Journal of Forest Engineering, Bd. 35, Nr. 1, S. 81-89
- [4] BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA) (2019): LAGA PN 98 – Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen. Grundregeln für die Entnahme von Proben aus festen und stichfesten Abfällen sowie abgelagerten Materialien. Stand: Mai 2019. Berlin: Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Nr. 32, 67 Seiten
- [5] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (2017): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen – Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG), in der Fassung vom 20.07.2017. In: <http://www.gesetze-im-internet.de/krwg/index.html>, S. 1-47
- [6] 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, Bd. 68, Nr. 32, S. 1305-1349
- [7] 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: Vorschriftenammlung der Gewerbeaufsicht Baden-Württemberg, Version 02/2012, S. 1-58
- [8] 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.) (Mitarbeit: Rese, F.), Duisburg, 39 Seiten

- [9] DIERAUER, H.; CLERC, M.; BÖHLER, D.; KLAISS, M.; HEGGLIN, D. (2017): Erfolgreicher Anbau von Körnerleguminosen in Mischkultur mit Getreide. 1. Aufl. Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL (Hrsg.). Frick, Schweiz. FiBL-Merkblatt, Ausgabe Schweiz 2017, 20 Seiten, ISBN 978-3-03736-289-1
- [10] DIETZ, E.; KUPTZ, D.; BLUM, U.; SCHULMEYER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2016): Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern. Gehalte ausgewählter Elemente, Heizwert und Aschegehalt. Berichte aus dem TFZ, Nr. 46. Straubing, Freising-Weihenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF)., 141 Seiten, ISSN 1614-1008
- [11] EBERL, G. (2018): Veränderung von Chrom-VI-Gehalten in Holzaschen durch Bewässerung. In: ÖSTERREICHISCHER BIOMASSE-VERBAND (ÖBMV) (Hrsg.): Greening the Strategies. 21. Biomassetag. Kufstein, Tirol, Stadtsaal, 06.–07.11. Wien: Österreichischer Biomasse-Verband (ÖBMV), S. 1-14
- [12] 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
- [13] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (2014): Datensammlung zum Leitfaden Feste Biobrennstoffe. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). In: <https://mediathek.fnr.de/leitfaden-bioenergie/> (Stand: 10.06.2020)
- [14] 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
- [15] HANSEN, M. T. (2019): Options for increased use of ash from biomass combustion. IEA Bioenergy Task 32 Biomass Combustion and Co-firing. In: THE DANISH SOCIETY OF ENGINEERS, IDA (Hrsg.): Scandinavian Bio Mass Ash Workshop 2019. BMA Workshop. Kopenhagen, Dänemark, 25. März. Kopenhagen: Standard Consult ApS, S. 1-17
- [16] KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (HRSG.) (2016): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3., aktual. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 1867 Seiten, ISBN-10 3662474379, ISBN 978-3-662-47437-2
- [17] 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
- [18] KEBLI, H.; MALTAS, A.; SINAJ, S. (2017): Landwirtschaftliches Potenzial von Asche aus rezykliertem Holz. Agrarforschung Schweiz, Bd. 8, Nr. 1, S. 30-37
- [19] KEHRES, B. (2013): Verwertung von Holzaschen auf Flächen. 08.03.2013. 2., überarb. Fassung. Bundeshütergemeinschaft Kompost e. V. (Hrsg.). Köln-Gremberghoven. BGK Thema Information, 14 Seiten

- [20] KEHRES, B. (2016): Holzaschen in der Kompostierung. In: H & K Humuswirtschaft & Kompost aktuell, Nr. 5, 2016. Ein Informationsdienst der BGK – Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. Köln-Gremberghoven, S. 1-3
- [21] KOAL, P.; BISCHOFF, R.; SCHLEGEL, J.; HERING, T.; EICHLER-LÖBERMANN, B. (2020): Gefäß- und Feldversuche zur agronomischen Bewertung von Halmgutaschen. In: THÜRINGER LANDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND LÄNDLICHEN RAUM (TLLLR) (Hrsg.): Verwertung naturbelassener Biomasseaschen. 2. Fachgespräch. Jena, 05.03.2020. Jena: Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR), S. 1-25
- [22] KORPIJÄRVI, K. (2019): The development in the use of ashes in Finland. In: THE DANISH SOCIETY OF ENGINEERS, IDA (Hrsg.): Scandinavian Bio Mass Ash Workshop 2019. BMA Workshop. Kopenhagen, Dänemark, 25. März. Kopenhagen: Standard Consult ApS, S. 1-22
- [23] KRÖNER, J. (2015): Holzaschezertifizierungskonzept für kleine und mittlere Heizwerke. Masterthesis. Stuttgart-Hohenheim: Universität Hohenheim, Institut für Kulturpflanzenwissenschaften, 104 Seiten
- [24] 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. In: CZUPY, I. (Hrsg.): Exceeding the vision: forest mechanisation of the future. Proceedings. 52<sup>nd</sup> International Symposium on Forestry Mechanization. Sopron, Ungarn/Forchtenstein, Österreich, 6.–9. Oktober. Sopron: University of Sopron Press, S. 320-329
- [25] KUPTZ, D.; DIETZ, E.; SCHREIBER, K.; SCHÖN, C.; MACK, R.; WIESBECK, M.; BLUM, U.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2018): Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb. Brennstoffqualität und Verbrennungsverhalten (Mitarbeit: Maierhofer, A.; Rocktäschel, A.; Bubalo Ivaniesevic, M.; Rist, E.; Haas, B.; Winter, S.; Blank, F.; Lesche, S.; Egger, S.; Forster, A.; Hartmann, C.; Hiltmann, A.; Kern, I.; Burger, F.; Beyer, T.; Peraus, F.). Berichte aus dem TFZ, Nr. 56. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 163 Seiten, ISSN 1614-1008
- [26] LAHTINEN, P. (2014): Fly ash utilisation in high level roads in Finland. In: ÖSTERREICHISCHER BIOMASSE-VERBAND (ÖBMV); LANDWIRTSCHAFTSKAMMER STEIERMARK; BIOENERGY 2020+ GMBH; KLIMA- UND ENERGIEFONDS (Hrsg.): Tagungsband – Proceedings. 4. Mitteleuropäische Biomassekonferenz – 4. Central European Biomass Conference (CEBC). Graz, 15. bis 18. Januar. Wien: Österreichischer Biomasse-Verband (ÖBV), S. 1-9
- [27] 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, Bd. 8, Nr. 1, S. 235-240
- [28] LEITERER, M.; KIEßLING, G.; KOHLBACH, D.; BISCHOF, R. (2020): Auswertung des Ringversuchs zur Analyse der königswasserextrahierbaren Elementgehalte sowie Chrom-VI. FNR-Projekt Biomasse-Asche-Monitoring (BAM). In: THÜRINGER LANDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND LÄNDLICHEN RAUM (TLLLR) (Hrsg.): Verwertung naturbelassener Biomasseaschen. 2. Fachgespräch. Jena, 05.03.2020. Jena: Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR), S. 1-38

- [29] LIENEMANN, P.; VOCK, W. (2013): Elementgehalt in Holzaschen und Validierung der Holzaschenkontrolle. Projekt-Schlussbericht. 12. Dezember 2013. Wädenswil: Züricher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), Institut für Chemie und Biologische Chemie, 96 Seiten
- [30] LÖVGREN, L. (2014): Roll pelletizing of ash. In: ÖSTERREICHISCHER BIOMASSE-VERBAND (ÖBMV); LANDWIRTSCHAFTSKAMMER STEIERMARK; BIOENERGY 2020+ GMBH; KLIMA- UND ENERGIEFONDS (Hrsg.): Tagungsband – Proceedings. 4. Mitteleuropäische Biomassekonferenz – 4. Central European Biomass Conference (CEBC). Graz, 15. bis 18. Januar. Wien: Österreichischer Biomasse-Verband (ÖBV), S. 1-6
- [31] MALTAS, A.; SINAJ, S. (2014): Holzasche: ein neuer Dünger für die Landwirtschaft. Agrarforschung Schweiz, Bd. 5, Nr. 6, S. 232-239
- [32] MINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG (2003): Schadstoffströme bei der Entsorgung von Holzasche. Schadstoffströme bei der Verbrennung naturbelassener Hölzer und holzartiger Biomassen im Hinblick auf die Ascheentsorgung. Stand: März 2003. Stuttgart. Reihe Abfall, Nr. 76, 79 Seiten
- [33] 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
- [34] 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., aktual. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 778-797, ISBN 978-3-662-47437-2
- [35] OBERNBERGER, I.; SUPANCIC, K. (2015): FACT-SHEET: Einsatz von Holzasche als Bindemittel zur Bodenstabilisierung z. B. im Straßenbau. FFG-Branchenprojekt „Entwicklung von innovativen Verfahren zur Holzascheverwertung“. Fachverband der Holzindustrie Österreichs (Hrsg.). Wien, Graz: BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, 8 Seiten
- [36] POHLANDT-SCHWANDT, K. (1999): Treatment of wood ash containing soluble chromate. Biomass and Bioenergy, Bd. 16, S. 447–462
- [37] PUHLMANN, H. (2020): Einsatz und Qualitätssicherung von Holzaschen bei der Bodenschutzkalkung im Wald. Erfahrungen aus Baden-Württemberg. In: THÜRINGER LANDESAMT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND LÄNDLICHEN RAUM (TLLLR) (Hrsg.): Verwertung naturbelassener Biomasseaschen. 2. Fachgespräch. Jena, 05.03.2020. Jena: Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR), S. 1-18
- [38] REICHLER, E.; MÜLLER, R.; SCHMOECKEL, 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
- [39] REICHLER, E.; SCHMOECKEL, G.; SCHMID, M.; KÖRNER, W. (2010): Rückstände aus Holzvergasungsanlagen. Müll und Abfall, Bd. 12, Nr. 3, S. 118-126

- [40] SACHVERSTÄNDIGENRAT BIOÖKONOMIE BAYERN (2017): Die Grundsätze der Bioökonomie in Bayern. Stand: Mai 2017 (Mitarbeit: Gass, M.; Hesler, F. v.; Kraus, W.; Langowski, H.-C.; Lewandowski, I.; Richter, K.; Scheitz, B.; Sieber, V.; Vogt, M.). Straubing: Geschäftsstelle des Sachverständigenrats Bioökonomie Bayern, 12 Seiten
- [41] SACHVERSTÄNDIGENRAT BIOÖKONOMIE BAYERN (2017): Empfehlungen zur Förderung der Bioökonomie in Bayern. Stand: Mai 2017. Straubing: Geschäftsstelle des Sachverständigenrats Bioökonomie Bayern, 3 Seiten
- [42] SCHILLING, S.; WILPERT, K. v. (2020): Steuerungsmöglichkeiten für die Qualität von Holzasche. Vortrag. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR); Fachverband Holzenergie (FVH) im Bundesverband Bioenergie e. V. (BBE)(Hrsg.): 20. Fachkongress Holzenergie, 22.-25. und 28.-30. September 2020, 13 Webinare – digitales Veranstaltungsformat, Gülzow-Prüzen, S.1-17
- [43] SCHNEIDER, A. C. (2017): Reduktion von Chrom (VI) in Holzasche durch Eisensulfat. In: TECHNOLOGICA GMBH (Hrsg.): Holzaschekongress 2017. EJW-Tagungszentrum, Filderstadt, Leinfelden-Stetten (bei Stuttgart), 5. April. Rutesheim: Technologica GmbH, S. 1-9
- [44] SCHÖN, C.; ROßMANN, P.; TUROWSKI, P.; HARTMANN, H.; SCHMÖCKEL, G. (2020): Einflussfaktoren auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen in Hackschnitzelheizwerken zwischen 1 und 5 Megawatt. Projektpartner: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). Berichte aus dem TFZ, Nr. 66. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 72 Seiten, ISSN 1614-1008
- [45] 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. Bonn: Bundesverband BioEnergie e. V. (BBE), S. 1-41
- [46] SCHULZE, D. (2002): Chrom in Holzasche: Gehalt, Bindungsformen und Mobilität. Maßnahmen zur Dekontamination und Fixierung, Schlussbericht, 97 Seiten
- [47] STEENARI, B.-M.; KARLSSON, L. G.; LINDQVIST, O. (1999): Evaluation of the leaching characteristics of wood ash and the influence of ash agglomeration. Biomass and Bioenergy, Bd. 16, Nr. 2, S. 119-136
- [48] STETTER, U.; ZORMAIER, F. (2010): Verwertung und Beseitigung von Holzaschen. Neues LfU-Merkblatt greift altes Thema auf. LWF aktuell, Bd. 17, Nr. 74, Ausgabe 1, S. 28-30
- [49] SUPANCIC, K.; OBERNBERGER, I.; KIENZL, N.; ARICH, A. (2014): Conversion and leaching characteristics of biomass ashes during outdoor storage. In: ÖSTERREICHISCHER BIOMASSE-VERBAND (ÖBMV); LANDWIRTSCHAFTSKAMMER STEIERMARK; BIOENERGY 2020+ GMBH; KLIMA- UND ENERGIEFONDS (Hrsg.): Tagungsband – Proceedings. 4. Mitteleuropäische Biomassekonferenz – 4. Central European Biomass Conference (CEBC). Graz, 15. bis 18. Januar. Wien: Österreichischer Biomasse-Verband (ÖBV), S. 1–9
- [50] TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM IM KOMPETENZZENTRUM FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (TFZ) (2020): FRED – Feste Regenerative Energieträger Datenbank. Straubing: Technologie- und Förderzentrum (TFZ), [www.fred.bayern.de](http://www.fred.bayern.de) (Stand 10.07.2020)

- [51] TEJADA, J.; GRAMMER, P.; KAPPLER, A.; THORWARTH, H. (2019): Trace Element Concentrations in Firewood and Corresponding Stove Ashes. *Energy Fuels*, Bd. 33, Nr. 3, S. 2236-2247
- [52] EJK, R. J. V.; 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
- [53] WALTER, B.; MOSTBAUER, P.; KARIGL, B. (2016): Biomasse-Aschenströme in Österreich. Wien: Umweltbundesamt GmbH. Umweltbundesamt – Report, Nr. REP-0561, 56 Seiten
- [54] WILPERT, K. v. (2014): Begründung, Technik und Wirkung der Bodenschutzkalkung. FVA-Einblick 1/2014, S. 10-13
- [55] 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 Bodenschutzkalkung in Oberschwaben. Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (Hrsg.). (Mitarbeit: De, D.; Sucker, C.). *Berichte Freiburger Forstliche Forschung*, Nr. 87. Freiburg im Breisgau: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung Boden und Umwelt, 155 Seiten, ISBN 1436-1566
- [56] WILPERT, K. v.; VONDERNACH, C.; AHREND, B.; ZIRLEWAGEN, D.; WEISK W.; KÄNDLER, G.; RUMPF, S.; SUCKER, C.; PUHLMANN, H.; HARTMANN, P. (2018): Waldkalkung und Nährstoffrückführung durch Holzaschen. Vortrag. In: BUNDESVERBAND BIOENERGIE E. V.; BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ENERGIE UND TECHNOLOGIE; BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (Hrsg.): 18. Fachkongress Holzenergie, 27. -28.09., Würzburg. Bonn: Bundesverband Bioenergie e. V., S. 1-35
- [57] WOLLMANN, I.; MÜLLER, T.; BREUER, J.; MÖLLER, K. (2018): Standardisiertes Verfahren zur Bewertung des Phosphordüngewerts von Recyclingdüngemitteln. Februar 2018. Stuttgart, Karlsruhe: Universität Hohenheim, Institut für Kulturpflanzenwissenschaften; Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ), 15 Seiten
- [58] ZENG, T.; KUPTZ, D.; SCHREIBER, K.; SCHÖN, C.; SCHULMEYER, F.; ZELINSKI, V.; POLLEX, A.; BORCHERT, H.; LOEWEN, A.; HARTMANN, H. LENZ, V.; NELLES, M. (2019): Impact of adhering soil and other extraneous impurities on the combustion and emission behavior of forest residue wood chips in an automatically stoked small-scale boiler. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Bd. 9, Nr. 1, S. 99-116
- [59] ZIMMERMANN, S.; HÄSSIG, J.; LANDOLT, W. (2010): Literaturreview Holzasche – Wald. Nährstoffentzug durch Holzernte, Nährstoffentzug 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
- [60] ZORN, W.; MARKS, G.; HEß, H.; BERGMANN, W. (2016): Handbuch zur visuellen Diagnose von Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. 3., korr. Aufl. Wiesbaden: Springer Spektrum, 366 Seiten, ISBN 978-3827429384

# Anhang

## Online-Fragebogen zur Ascheverwertung und -nutzung bei den bayerischen Biomasseheiz(kraft)werksbetreibern

Seite 1

### Umfrage bei Betreibern von Biomasseheiz(kraft)werken zur Ascheentsorgung und -verwertung

Bitte senden Sie uns für jede separat gelagerte Rostasche einen Fragebogen.

Bei einem Standort mit zwei Feuerungsanlagen und einer vermischten Rostschelagerung füllen Sie bitte einen Fragebogen aus. Bei einem Standort mit zwei Feuerungsanlagen und getrennter Lagerung der Rostaschen füllen Sie bitte zwei Fragebögen aus.

Sehr geehrte Umfrageteilnehmer,

Das Technologie- und Förderzentrum führt eine Umfrage zur Nutzung der Aschen aus Biomasseheiz(kraft)werken durch. Sie helfen durch das Ausfüllen des Fragebogens den aktuellen Wissensstand zur Ascheverwertung bzw. -entsorgung zu vervollständigen.

Für Rückfragen wenden Sie sich bitte an:

Herrn Dr. Hans Bachmaier

Tel.: 09421/300-160

E-Mail: johannes.bachmaier@tfz.bayern.de

oder

Herrn Dr. Daniel Kuptz

Tel.: 09421/300-118

E-Mail: daniel.kuptz@tfz.bayern.de

Wir sichern Ihnen zu, dass Ihre Antworten keinen Einfluss auf die vom Freistaat Bayern erhaltene Förderung haben, dass keine Weitergabe der Daten an Dritte erfolgt und dass nur anonymisierte Daten veröffentlicht werden. Weitere Informationen zum Datenschutz finden Sie auf folgender Seite: <http://www.tfz.bayern.de/datenschutz>

Die Durchführung dieser Befragung liegt bei unserem Auftragsverarbeiter

GreenSurvey Marktforschung GmbH

Europaring 4

94315 Straubing

Dessen Datenschutzgrundsätze finden Sie hier: <https://www.green-survey.de/datenschutz/> Externer Link

Vielen Dank für Ihre Unterstützung!

#### 1. Allgemeine Angaben zu Ihrem Heiz(kraft)werk

##### 1.1 Bitte geben Sie hier die Kontaktdaten des Heiz(kraft)werksbetreibers an

|                      |  |
|----------------------|--|
| Firma/Institution:   |  |
| Ansprechpartner:     |  |
| Strasse, Hausnummer: |  |
| PLZ, Ort             |  |
| Telefonnummer:       |  |
| Internet/Homepage:   |  |
| E-Mail:              |  |

##### 1.2 Bitte geben Sie uns hier Informationen zum Standort des Heiz(kraft)werks

|                      |  |
|----------------------|--|
| Firma/Institution:   |  |
| Ansprechpartner:     |  |
| Strasse, Hausnummer: |  |
| PLZ, Ort             |  |
| Telefonnummer:       |  |
| Internet/Homepage:   |  |
| E-Mail:              |  |

|   | Ja | Nein |
|---|----|------|
| Betreiben sie an diesem Standort zwei Feuerungsanlagen? |    |      |

|   |  |  |
|---|--|--|
| Wird die Rostasche für jede Anlage getrennt gelagert? |  |  |
|---|--|--|

## Daten zur Feuerungsanlage

### 1.3 Bitte geben Sie uns im Folgenden Informationen zu Ihrer Feuerungsanlage 1

|  |                         |
|--|-------------------------|
| Datum der Genehmigung der Anlage                         |                         |
| Datum der Inbetriebnahme der Anlage                      |                         |
| Hersteller und Modell der Feuerungsanlage                |                         |
| Feuerungsprinzip   |                         |
| Festbettfeuerung (z.B. Unterschubfeuerung, Rostfeuerung) |                         |
| Wirbelschichtfeuerung                                    |                         |
| Installierte Leistung thermisch                          |                         |
| Installierte Leistung elektrisch                         |                         |
| Die Entaschung der Rostasche erfolgt                     | Auswahl: nass - trocken |
| Wurde die Entaschung seit Inbetriebnahme umgebaut?       |                         |
| Bitte erläutern Sie, was umgebaut wurde.                 |                         |

### Wie wird das Rauchgas gereinigt? Bitte wählen Sie die eingesetzten Verfahren aus.

|                      |  |
|----------------------|--|
| Zyklon               |  |
| Elektrofilter        |  |
| Gewebefilter         |  |
| Rauchgaswäsche       |  |
| Rauchgaskondensation |  |
| Sonstiges            |  |

### Bitte geben Sie uns im Folgenden Informationen zu Ihrer Feuerungsanlage 2

|  |                         |
|--|-------------------------|
| Datum der Genehmigung der Anlage                         |                         |
| Datum der Inbetriebnahme der Anlage                      |                         |
| Hersteller und Modell der Feuerungsanlage                |                         |
| Feuerungsprinzip   |                         |
| Festbettfeuerung (z.B. Unterschubfeuerung, Rostfeuerung) |                         |
| Wirbelschichtfeuerung                                    |                         |
| Installierte Leistung thermisch                          |                         |
| Installierte Leistung elektrisch                         |                         |
| Die Entaschung der Rostasche erfolgt                     | Auswahl: nass - trocken |
| Wurde die Entaschung seit Inbetriebnahme umgebaut?       |                         |
| Bitte erläutern Sie, was umgebaut wurde.                 |                         |

### Wie wird das Rauchgas gereinigt? Bitte wählen Sie die eingesetzten Verfahren aus.

|                      |  |
|----------------------|--|
| Zyklon               |  |
| Elektrofilter        |  |
| Gewebefilter         |  |
| Rauchgaswäsche       |  |
| Rauchgaskondensation |  |
| Sonstiges            |  |

|  | 2016 | 2017 |
|--|------|------|
| Auf den folgenden Seiten werden Jahreswerte zur Energieerzeugung, Ascheanfall und Brennstoffeinsatz abgefragt. Die Jahreswerte stammen aus dem Bilanzjahr: |      |      |

### 1.4 Energieproduktion im Bilanzjahr

ohne Jahreszahl

|                   |  |
|-------------------|--|
| Feuerungsanlage 1 |  |
| thermisch (MWh)   |  |
| elektrisch (MWh)  |  |

|                   |  |
|-------------------|--|
| Feuerungsanlage 2 |  |
| thermisch (MWh)   |  |
| elektrisch (MWh)  |  |

### 1.5 Auslastung der Anlage und Brennraumtemperaturen

Bitte geben Sie für das Bilanzjahr die Volllast- und die Teillaststunden und die jeweiligen Brennraumtemperaturen<sup>1</sup> (°C) für Feuerungsanlage 1 an.

Bitte geben Sie für das Bilanzjahr die Volllast- und die Teillaststunden und die jeweiligen Brennraumtemperaturen (°C) für Feuerungsanlage 2 an.

|          | Betriebsstunden | Brennraumtemperatur |          | Betriebsstunden | Brennraumtemperatur |
|----------|-----------------|---------------------|----------|-----------------|---------------------|
| Volllast |                 |                     | Volllast |                 |                     |
| Teillast |                 |                     | Teillast |                 |                     |

<sup>1</sup> da Schwermetalle unterschiedlich flüchtig sind, lässt sich über die Brennraumtemperatur die Schwermetallzusammensetzung der Brennraumasche abschätzen.

2. Angaben zur Holzasche

2.1 Holzasche - Menge im Bilanzjahr

| Art der Aschen   | Anfallmenge | Einheit | Nummer nach Abfallverzeichnis (AVV-Nr.) |
|--|-------------|---------|---|
| trockene Rost- und Kesselaschen, Brennraumaschen       |             |         |   |
| nasse Rost- und Kesselaschen, Brennraumaschen          |             |         |   |
| Zyklonaschen   |             |         |   |
| Filterasche aus Elektrofiltern                         |             |         |   |
| Filterasche aus Gewebefiltern                          |             |         |   |
| Ascheschlämme (aus Rauchgaswäsche)                     |             |         |   |
| Sonstige Rückstände                                    |             |         |   |
| Um was handelt es sich bei den "Sonstigen Rückständen" |             |         |   |

2.2 Wie entsorgen/verwerten Sie die Holzasche?

|  | über Abfallentsorger | Entsorgung über Hausmüll | Entsorgung direkt auf Deponie | Mitnahme durch Brennstofflieferant | Eigene Verwertung als Dünger (landw. Flächen) |
|--|----------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---|
| trockene Rost- und Kesselaschen, Brennraumaschen |                      |                          |                               |                                    |   |
| nasse Rost- und Kesselaschen, Brennraumaschen    |                      |                          |                               |                                    |   |
| Zyklonaschen                                     |                      |                          |                               |                                    |   |
| <b>Filterasche aus Elektrofiltern</b>            |                      |                          |                               |                                    |   |
| Filterasche aus Gewebefiltern                    |                      |                          |                               |                                    |   |
| Ascheschlämme (aus Rauchgaswäsche)               |                      |                          |                               |                                    |   |
| Sonstige Rückstände                              |                      |                          |                               |                                    |   |

|  | Eigene Verwertung als Dünger (forstlich) | Abgabe an Verwerter - Kompostwerk | Abgabe an Verwerter - Kalkwerk | Abgabe an Verwerter - Klärschlammverbrennung | Sonstige (bitte angeben) |
|--|--|-----------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------|
| trockene Rost- und Kesselaschen, Brennraumaschen |  |                                   |                                |  |                          |
| nasse Rost- und Kesselaschen, Brennraumaschen    |  |                                   |                                |  |                          |
| Zyklonaschen                                     |  |                                   |                                |  |                          |
| <b>Filterasche aus Elektrofiltern</b>            |  |                                   |                                |  |                          |
| Filterasche aus Gewebefiltern                    |  |                                   |                                |  |                          |
| Ascheschlämme (aus Rauchgaswäsche)               |  |                                   |                                |  |                          |
| Sonstige Rückstände                              |  |                                   |                                |  |                          |

**2.3 Holzasche - Entsorgungskosten 1 (Bezugsgrösse 1 Tonne)- falls die Aufteilung der Kosten nicht bekannt ist, bitte Gesamtkosten angeben**

|  | Entsorgungsgebühr | Transport | Aufbereitung | Analyse | Gesamt |
|--|-------------------|-----------|--------------|---------|--------|
| trockene Rost- und Kesselaschen, Brennraumaschen |                   |           |              |         |        |
| nasse Rost- und Kesselaschen, Brennraumaschen    |                   |           |              |         |        |
| Zyklonaschen                                     |                   |           |              |         |        |
| Filterasche aus Elektrofiltern                   |                   |           |              |         |        |
| Filterasche aus Gewebefiltern                    |                   |           |              |         |        |
| Ascheschlämme (aus Rauchgaswäsche)               |                   |           |              |         |        |
| Sonstige Rückstände                              |                   |           |              |         |        |
| Erläuterung dieser Rückstände                    |                   |           |              |         |        |

**Holzasche - Entsorgungskosten 2 (Bezugsgrösse 1 Tonne)**

| Erklärung  | Weitere Kosten                     |                  |                  |                  |                  |
|--|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|  | Miete f. Wechselbehälter Flugasche | Weitere Kosten 1 | Weitere Kosten 2 | Weitere Kosten 3 | Weitere Kosten 4 |
| trockene Rost- und Kesselaschen, Brennraumaschen |                                    |                  |                  |                  |                  |
| nasse Rost- und Kesselaschen, Brennraumaschen    |                                    |                  |                  |                  |                  |
| Zyklonaschen                                     |                                    |                  |                  |                  |                  |
| Filterasche aus Elektrofiltern                   |                                    |                  |                  |                  |                  |
| Filterasche aus Gewebefiltern                    |                                    |                  |                  |                  |                  |
| Sonstige Rückstände                              |                                    |                  |                  |                  |                  |

**2.4 Brennraumasche - Lagerung, Behandlung, Analyse**

In welcher Art von Behälter fangen Sie die Brennraumasche auf?

|  | Ja | Nein |
|--|----|------|
| Wird die Brennraumasche separat von der Zyklonasche aufgefangen? |    |      |

Wie lagern Sie die Brennraumasche?

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| Lagerdauer der Brennraumasche | Wochen |
|-------------------------------|--------|

|  | Ja | Nein |
|--|----|------|
| Wird die Brennraumasche einer Behandlung unterzogen? |    |      |

Art der Behandlung

|   | Ja | Nein |
|---|----|------|
| Wird die Brennraumasche einer Analyse unterzogen? |    |      |

Art der Analyse

Wie oft pro Jahr?

**2.5 Umgang mit Aschefractionen**

|   |    |      |
|---|----|------|
|   | Ja | Nein |
| Werden Aschefractionen (also z.B. Brennraumasche mit Zyklonasche) vermischt? Wo findet die Vermischung statt? (Bitte ankreuzen) |    |      |

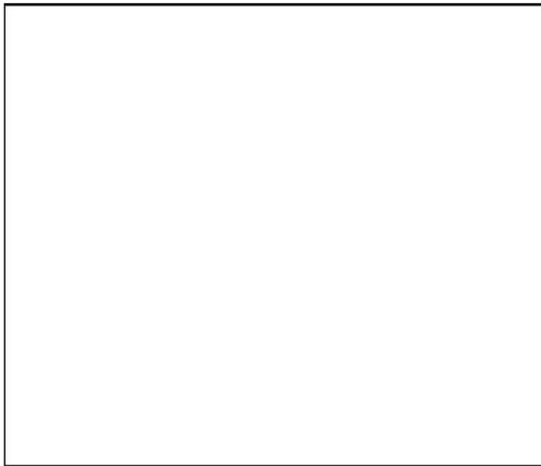
Wo findet die Vermischung der Aschen statt?

|   |  |
|---|--|
| in der Feuerungsanlage                                  |  |
| ausserhalb der Feuerungsanlage                          |  |
| Nein, Getrennthaltung der verschiedenen Aschefractionen |  |
| Sonstiges   |  |

|   |           |             |             |
|---|-----------|-------------|-------------|
|   | Rostasche | Zyklonasche | Filterasche |
| Welche Aschen werden vermischt? (Bitte ankreuzen) |           |             |             |

**2.6 Wenn Sie Bilder von der Aschelagerung der Brennraumasche haben, können Sie diese in die Rechtecke einfügen.**

Bild Aschebehälter Brennraumasche



Beschreibung

|  |
|--|
|  |
|--|

Bild Aschelagerung Brennraumasche



Beschreibung

|  |
|--|
|  |
|--|

**2.7 Innerbetriebliche Maßnahmen zur Asche-Qualitätssicherung (bitte ankreuzen):**

|   |  |              |
|---|--|--------------|
| Getrennthaltung von Aschen, Abgrenzung von Chargen  |  |              |
| Rückstellproben, Rückstellmuster der Aschen   |  |              |
| Dokumentation und Kontrolle der abzugebenden Aschen   |  |              |
| Rückverfolgbarkeit abgegebener Aschen bis zu den Lieferanten der eingesetzten Holzbrennstoffe |  | Beschreibung |
| Sonstige 1  |  |              |
| Sonstige 2  |  |              |
| Sonstige 3  |  |              |
| Sonstige 4  |  |              |

**2.8. Hürden bei der Entsorgung und Zertifizierung als Dünger**

|   |  |
|---|--|
| Was sind für Sie als Heiz(kraft)werkbetreiber die grössten Hürden bei der Aschentsorgung? Welche Probleme treten auf? Welche Grenzwerte werden nicht eingehalten? |  |
|---|--|

|  | Ja | Nein |
|--|----|------|
| Kennen Sie das Gütezeichen RAL-GZ 252 für Holzaschen als Ausgangsstoff für Dünger oder als Düngemittel selbst? |    |      |

|  | positiv | neutral | negativ |
|--|---------|---------|---------|
| Wie stehen Sie zu einer Holzaschezertifizierung?                                     |         |         |         |
| Bitte nennen Sie einige Stichpunkte, die ausschlaggebend sind für diese Einschätzung |         |         |         |

|  | Ja | Nein | Ja, wenn... |
|--|----|------|-------------|
| Würden Sie im Zuge dieses Projekts eine Probe der Brennraumasche für eine Untersuchung zur Verfügung zu stellen? (die Analysenergebnisse erhalten Sie kostenlos) |    |      |             |

### 3. Angaben zum Brennstoffeinsatz

#### 3.1 Brennstoffmengen und -qualitäten im Bilanzjahr

Die folgenden Fragen beziehen sich auf das gesamte Heizwerk

Wie hoch war der Biomassebedarf und die Brennstoffqualität Ihres Heiz(kraft)werkes im Bilanzjahr? (Bitte in Schüttraummeter oder Tonnen angeben; bei Angabe in Tonnen Frischmasse (fFM) teilen Sie uns bitte den durchschnittlichen Wassergehalt mit).

|                  | Schüttraummeter | Tonne (absolut trocken) | Tonne (frisch) | Wassergehalt in % |
|------------------|-----------------|-------------------------|----------------|-------------------|
| Brennstoffbedarf |                 |                         |                |                   |

Wie setzte sich die verwendete Biomasse im Bilanzjahr zusammen. Bitte geben sie eine Einschätzung der Anteile in %. Falls Sie Angaben zum durchschnittlichen Wasser- und Aschegehalt haben, tragen Sie diese bitte ein.

| Brennstoff   | Massen-% (Frischmasse) | Aschegehalt<br>(kein Eintrag wenn unbekannt) | Wassergehalt<br>(kein Eintrag wenn unbekannt) |
|--|------------------------|--|---|
| Waldhackschnitzel (Hartlaubholz)   |                        |  |   |
| Waldhackschnitzel (Nadelholz/Weichlaubholz)  |                        |  |   |
| Nebenprodukte und naturbelassene Resthölzer aus holzbe- und verarbeitenden Betrieben (ohne reine Rindensortimente) |                        |  |   |
| Rinde  |                        |  |   |
| Landschaftspflegeholz, Flurholz, Holz aus der Pflege von Verkehrswegen u.Ä.  |                        |  |   |
| Holzpellets  |                        |  |   |
| Holz aus Kurzumtriebsplantagen (schnellwachsende Baumarten z.B. Pappel)  |                        |  |   |
| Altholz Kategorie AI   |                        |  |   |
| Altholz Kategorie AII-AIV  |                        |  |   |
| Sonstiger Brennstoff   |                        |  |   |

sonstiger Brennstoff: \_\_\_\_\_

#### 3.2 Eingangskontrolle Brennstoff

|   | Ja | Nein |
|---|----|------|
| Wird der Brennstoff einer Kontrolle unterzogen? |    |      |

| Art der Brennstoffkontrolle (bitte ankreuzen) | Gewicht | Feuchtemessung | Heizwertbestimmung | Aschegehalt |
|---|---------|----------------|--------------------|-------------|
|   |         |                |                    |             |

|  |  |
|--|--|
| Sonstige Brennstoffkontrolle (bitte beschreiben) |  |
|--|--|

|   | Ja | Nein |
|---|----|------|
| Wird der Brennstoff in einem Betriebstagebuch, Brennstoffbuch, qualifiziertes Einsatzstofftagebuch etc. dokumentiert? |    |      |

#### 4. Sonstige Bemerkungen zum Fragebogen

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| Haben Sie Anmerkungen zum Fragebogen? |  |
|---------------------------------------|--|

Herzlichen Dank für Ihre Teilnahme!

## Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

- 1 Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich – Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
- 2 Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
- 3 Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
- 4 Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
- 5 Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
- 6 Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
- 7 Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
- 8 Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
- 9 Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
- 10 Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
- 11 Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
- 12 Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich – Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
- 13 Getreidekörner als Brennstoff für Kleinf Feuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
- 14 Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotoren betriebenen Traktors
- 15 Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
- 16 Schnellbestimmung des Wassergehalts im Holzsplit
- 17 Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
- 18 Miscanthus als nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
- 19 Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis

- 20 Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
- 21 Kleine Biomassefeuerungen – Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
- 22 Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
- 23 Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
- 24 Charakterisierung von Holzbriketts
- 25 Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
- 26 Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
- 27 Entwicklung einer Siloabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen
- 28 Sorghumhirse als nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauszenarien
- 29 Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
- 30 Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
- 31 Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufen I und II
- 32 Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft
- 33 Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
- 34 Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
- 35 Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen
- 36 Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
- 37 Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat
- 38 Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
- 39 Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
- 40 Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
- 41 Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605

- 42 Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe
- 43 Brennstoffqualität von Holzpellets
- 44 Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
- 45 ExpRessBio – Methoden
- 46 Qualität von Holz hackschnitzeln in Bayern
- 47 Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB
- 48 Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für bayerische Anbaubedingungen
- 49 Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe
- 50 Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern – Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpRessBio-Methode
- 51 Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor
- 52 Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holz hackschnitzeln
- 53 Bioenergieträger mit Blühaspekt: Leguminosen-Getreide-Gemenge
- 54 Dauerkulturen – Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung
- 55 Lagerung von Holz hackschnitzeln
- 56 Holz hackschnitzel aus dem Kurzumtrieb
- 57 Optimierungspotenziale bei Kaminöfen – Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste
- 58 Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife
- 59 Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Rapsverarbeitung in Bayern
- 60 Langzeitmonitoring pflanzenöлтаuglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV
- 61 Nutzereinflüsse auf die Emissionen aus Kaminöfen
- 62 Abgasverhalten von Fahrzeugen im realen Betrieb mit alternativen Kraftstoffen – Bestimmung mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS)
- 63 Rapsölkraftstoff als Energieträger für den Betrieb eines forstwirtschaftlichen Vollernters (Harvester)
- 64 Amaranth als Biogassubstrat – Selektion zur Erarbeitung praxistauglicher Amaranthlinien für bayerische Standorte
- 65 Schwierige Pelletbrennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen – Verbrennungstechnische Optimierung durch Additivierung und Mischung
- 66 Einflussfaktoren auf die NO<sub>x</sub>-Emissionen in Hackschnitzelheizwerken zwischen 1 und 5 Megawatt

- 67 Gärrestversuch Bayern – Prüfung der langfristigen Nachhaltigkeit der Nutzungspfade Biogas und BtL
- 68 Hanf zur stofflichen Nutzung: Stand und Entwicklungen
- 69 Zünd- und Brennverhalten von Pflanzenölkraftstoff und Übertragung auf einen Motor der Abgasstufe V
- 70 Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel
- 71 Ertragsstabilität, Etablierung und Umweltparameter mehrjähriger Energiepflanzen – Dauerkulturen II
- 72 Stoffliche Nutzung von Biomasseaschen als Baustein der Bioökonomie





