



Sekundärrohstoffe in MVA-Aschen

Abschlussbericht zum 31.07.2015



abfall



Sekundärrohstoffe in MVA-Aschen

Abschlussbericht zum 31.07.2015

Impressum

Sekundärrohstoffe in MVA-Aschen

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

Fax: 0821 9071-5556

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: www.lfu.bayern.de

Bearbeitung/Text/Konzept:

LfU, Referat 33, Evelyn Calta, Clemens Marb, Heinz Riedel

Redaktion:

LfU, Referat 33, Clemens Marb, Heinz Riedel

Bildnachweis:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Stand:

Oktober 2015

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundstags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – wird um Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars gebeten.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Broschüre wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Broschüre wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden.

Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Stand des Wissens	8
3	Definitionen und Abkürzungen	14
4	Beschreibung der beprobten Anlagen	16
4.1	Ascheaufbereitung an Müllverbrennungsanlagen	16
4.1.1	Anlage II	16
4.1.2	Anlage III	17
4.1.3	Anlage IV	17
4.1.4	Anlage V	18
4.2	Ascheaufbereitung bei Externen	19
4.2.1	Anlage I	19
4.2.2	Anlage VI	20
5	Probenahme und Analytik	22
5.1	Probenahme und Sortieranalyse	22
5.2	Probenvorbereitung	24
5.3	Physikalisch-chemische Analysen	25
5.3.1	Grundcharakterisierung (Trockenrückstand, Korngrößenverteilung)	25
5.3.2	Elementanalytik	26
6	Probenahmekampagnen	28
6.1	Anlage I	28
6.2	Anlage II	29
6.3	Anlage III	30
6.4	Anlage IV	32
6.5	Anlage V	33
6.6	Anlage VI	34
7	Untersuchungsergebnisse und Bewertung	35
7.1	Sortieranalysen	35
7.2	Trockenrückstand	39
7.3	Korngrößenverteilung	40
7.4	Chemische Analysen (Einteilung nach Periodensystem)	44

7.4.1	Gruppe 1: Kalium, Rubidium, Cäsium	45
7.4.2	Gruppe 2: Magnesium, Calcium	51
7.4.3	Seltenerdmetalle: Praseodym, Neodym, Europium	55
7.4.4	Gruppe 4: Titan	61
7.4.5	Gruppe 5: Niob	63
7.4.6	Gruppe 6: Chrom, Molybdän	65
7.4.7	Gruppe 7: Mangan	69
7.4.8	Gruppe 8: Eisen	71
7.4.9	Gruppe 9: Kobalt	73
7.4.10	Gruppe 10: Nickel	75
7.4.11	Gruppe 11: Kupfer, Silber, Gold	77
7.4.12	Gruppe 12: Zink, Cadmium	83
7.4.13	Gruppe 13: Aluminium	87
7.4.14	Gruppe 14: Silizium, Blei	89
7.4.15	Gruppe 15: Phosphor, Arsen, Antimon, Bismut	93
7.4.16	Gruppe 16: Schwefel	101
7.4.17	Gruppe 17: Chlor, Brom	103
7.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der chemischen Analytik	107
8	Stoffstrom Müllverbrennungsasche	109
8.1	Situation Bayern 2012/2013	109
8.1.1	Behandelte Abfälle, erzeugte Rohasche	109
8.1.2	Ascheaufbereitung und Metallrückgewinnung	110
8.1.3	Entsorgungswege der Eisen- und NE-Metalle sowie der aufbereiteten Asche	113
8.2	Stoffströme ausgewählter Metalle	114
8.2.1	Metall-Potenziale _{metallisch}	115
8.2.2	Metall-Potenziale _{chemisch gebunden}	116
9	Schlussfolgerungen, Empfehlungen	118
10	Zusammenfassung	121

Literatur	123
Anhang	133
Tabelle Aschezusammensetzung	133
Gruppe 1: Lithium, Natrium	134
Gruppe 2: Beryllium, Strontium, Barium	136
Gruppe 3 und Seltene Erden: Yttrium, Lanthan, Cer, Samarium, Gadolinium, Erbium	139
Gruppe 5: Vanadium, Tantal	145
Gruppe 6: Wolfram	147
Gruppe 10: Platin	148
Gruppe 13: Gallium, Indium, Thallium	149
Gruppe 14: Germanium, Zinn	152
Gruppe 16: Selen, Tellur	154
Stoffstrominput/-output Müllverbrennungsanlagen Bayerns 2012	156

1 Einleitung

Das vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) geförderte Forschungsvorhaben „Sekundärrohstoffe in MVA-Aschen“ widmete sich der Frage, welches Potenzial an Metallen in den nach der Abtrennung von Eisen- und Nichteisenmetallen – heutzutage Stand der Technik – verwerteten Müllverbrennungsaschen aus bayerischen Anlagen noch vorhanden ist.

Während sortenreine Produktionsabfälle zu einem hohen Prozentsatz bereits in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden, kann die verstärkte Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus gemischten Abfällen in Abhängigkeit der Marktsituation – Nachfrage nach Rohstoffen, Erzgehalte abbauwürdiger Lagerstätten, Vorräte usw. – interessant werden [1]. Durch die thermische Abfallbehandlung von Siedlungsabfällen findet in der Müllverbrennungsasche eine gewisse Aufkonzentrierung der Metalle statt. Im Verbrennungsprozess werden die brennbaren Bestandteile des Abfalls weitgehend mineralisiert (organisch gebundener Gesamtkohlenstoff < 3 %, Glühverlust < 5 %) und dadurch metallische Bestandteile, z. B. aus Verbundmaterialien, „freigelegt“ und oxidiert.

Im Projekt wurden die Aschen von sechs Anlagen (vier Müllverbrennungsanlagen, zwei externe Ascheaufbereiter) beprobt und auf 53 Elemente, vor allem Metalle, untersucht. Der Parameterumfang beinhaltete insbesondere kritische Rohstoffe, die in den Veröffentlichungen der EU-Kommission [2] bzw. der Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft [3] enthalten sind. Neben ungealterten Rohaschen standen vor allem aufbereitete Aschen im Mittelpunkt des Interesses, um das bislang ungenutzte Potenzial an Metallen festzustellen.

Mittels chemischer Analysen wurde untersucht, inwieweit eine Anreicherung von Elementen in der mineralischen oder magnetischen Aschefraktion oder in bestimmten Korngrößenfraktionen vorliegt. Damit stehen erstmals belastbare und umfassende Daten zur Beurteilung des Recyclingpotenzials der in Müllverbrennungsaschen enthaltenen Metalle zur Verfügung. Eine Stoffstromanalyse für Bayern, basierend auf den Daten der Jahre 2012 und 2013, schließt die Betrachtungen ab.

2 Stand des Wissens

Siedlungsabfälle, bei denen die Forderungen der gesetzlich verankerten Abfallhierarchie¹ [4, 5] Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling und sonstige Verwertung, z. B. energetische Verwertung, ausgeschöpft oder die zu beseitigen sind, werden in Deutschland aufgrund der Vorgaben der Depo-nieverordnung [6] in Müllverbrennungsanlagen thermisch behandelt. Nach [7] stehen hierfür 68 Ver-brennungsanlagen mit einem Gesamtdurchsatz von circa 19,6 Mio. Mg/a zur Verfügung. In Bayern sind aktuell im Jahr 2015 15 Anlagen zur thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen in Betrieb, davon 14 Müllverbrennungsanlagen und eine Müllpyrolyseanlage. Letztere wird nach rund 30 Jahren Betriebszeit voraussichtlich Ende 2015 außer Betrieb gehen [8].

Die Vorgaben des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) [5] für die Abfallbehandlung gelten auch für die bei der Müllverbrennung entstehenden Abfälle: Rost-, Kesselasche, Abgasreinigungsrückstände (z. B. Gewebefilterstäube, Neutralisationsschlämme).

Das Jahresaufkommen an Müllverbrennungsrostaschen belief sich im Jahr 2009 auf circa 4,8 Mio. Mg [9, S. 5]. Pro Mg verbranntem Müll entstehen circa 250 – 350 kg Müllverbrennungsasche, die rund 85 Mass.-% der Verbrennungs- und Abgasreinigungsrückstände ausmacht [10]. Müllverbrennungs-aschen können auch den Rostdurchfall enthalten, falls dieser nicht wieder in den Müllbunker zurück- und der Verbrennung erneut zugeführt wird.

Bei den in der Müllverbrennung herrschenden Prozessbedingungen – die 17. BImSchV [11] fordert für das Produkt Rostasche, das bei Verbrennungsbedingungen in der Gasphase nach der letzten Ver-brennungsluftzuführung von mindestens 850 °C und 2 s Verweilzeit entsteht, einen Gehalt an orga-nisch gebundenem Gesamtkohlenstoff von kleiner 3 % oder einen Glühverlust von kleiner 5 % der Trockenmasse – kommt es auf dem Rost im quer durchströmten Müllwanderbett in Abhängigkeit von Schmelzpunkt, Dampfdruck zu einem (partiellen) Aufschmelzen der metallischen Bestandteile im Ab-fall. So geht z. B. das leichtflüchtige Element Quecksilber in der Regel vollständig in die Gasphase über, während Cadmium und Blei teilweise oder Kupfer und Eisen praktisch vollständig im Wanderbett bzw. in der Asche verbleiben und höchstens angeschmolzen werden. Durch den Kontakt der ange-schmolzenen Metalle mit anderen Aschebestandteilen entstehen Aggregate mit überwiegend ober-flächlichen mineralischen Verwachsungen [12, 13]. Bei den in Deutschland installierten (Haus)müllverbrennungsanlagen wird die Asche über einen Nassentschlacker ausgetragen. Der Nassentschlacker verhindert am Ascheaustritt das unkontrollierte Eindringen von Umgebungsluft in den Feuerraum. Die Asche samt den im Müll enthaltenen Metallteilen kühlen im Wasser ab und die enthaltenen Salze, die durch den Oxidationsprozess der Müllverbrennung entstehen, gehen entspre-chend den sich im Nassentschlacker einstellenden Gleichgewichtskonzentrationen in Lösung. Der Feuchtegehalt der Asche unmittelbar nach Austritt aus dem Nassentschlacker liegt bei rund 20 Mass.-% [1].

Die Zusammensetzung der Rostasche aus dem Nassentschlacker (≡ Rohasche) hängt von diversen Faktoren ab, wie etwa der Zusammensetzung des Abfalls, der Feuerungsführung, der Verweilzeit auf dem Rost, der Schürwirkung und der Art des Austrags aus der Feuerung [14, 15, 16, 17]. Rohaschen sind ein heterogenes, noch nicht vollständig abgebundenes Gemenge und bestehen aus feinkörnigen Aschen (circa 45 Mass.-%), grobkörnigen versinterten Verbrennungsprodukten (circa 40 Mass.-%), inertem Durchgangsmaterial wie Stein, Glas oder Keramik (circa 10 Mass.-%), Metallen (circa 5 Mass.-%) und unverbranntem organischen Material (bis zu 2 Mass.-%) [16, 18, 19]. Aufgrund der Heterogenität des Abfalls ist die prozentuale Verteilung der Aschebestandteile starken zeitlichen und

¹ Forderungskatalog der gesetzlich verankerten Abfallhierarchie [4, 5]: a) Vermeidung, b) Vorbereitung zur Wiederverwendung, c) Recycling, d) sonstige Verwertung, z. B. energetische Verwertung, e) Beseitigung

örtlichen Schwankungen unterworfen. Wertgebende Inhaltsstoffe sind im Wesentlichen die Metalle, die man in den Stoffkreislauf zurückführen sollte.

Bei den körnigen Bestandteilen der Müllverbrennungsaschen handelt es sich aus mineralogischer Sicht um Carbonat-, Oxid-, Chlorid- und Silikatphasen [14, 20], in die unter anderem Schwermetalle eingebunden sind. Vor allem in der Feinfraktion (< 8 mm) reichern sich Schwermetalle, Sulfate, Chloride und Carbonate an [14].

In Abhängigkeit des Standorts der Aufbereitungsanlagen (an der MVA oder/und extern) beginnt die Ascheaufbereitung unmittelbar nach dem Abwurf aus dem Nassentschlacker oder nach einer Zwischenlagerung. Letzteres trifft vor allem auf externe Aufbereiter zu.

Das angewandte Aufbereitungsverfahren muss auf den jeweiligen, sich zeitlich ändernden Input und dessen Eigenschaften, insbesondere Feuchtegehalt, Rieselfähigkeit, Alter der Asche (Lagerdauer und -bedingungen), abgestimmt sein, um optimale Ergebnisse für eine Verwertung der mineralischen Bestandteile zu erzielen.

Die Abtrennung von Eisen- (Fe) und Nichteisenmetallen (NE) aus den Müllverbrennungsaschen ist Stand der Technik. Ziele sind die Rückgewinnung der enthaltenen Metalle, die Entfernung von Unverbranntem und die Herstellung eines mineralischen Produkts, das wirtschaftlich vermarktet werden kann. Um die Effizienz der Abtrennung zu optimieren, erfolgt die Aufbereitung in unterschiedlichen Korngrößen. Überband- oder Trommelmagnete entfernen Fe-Metalle aus dem Stoffstrom. Während größere NE-Metalle meist manuell aussortiert werden, werden für die kleineren Korngrößen Wirbelstromabscheider eingesetzt [12, 20]. Das vom Wirbelstromabscheider abgetrennte NE-„Konzentrat“ besteht zu etwa 70 Mass.-% aus Aluminium; die restlichen 30 Mass.-% sind Schwermetalle, Kupfer, Zink, etc. Edelmetalle sind in Spuren enthalten [21]. Wirbelstromabscheider nach dem heutigen Stand der Technik lassen sich bis zu Partikelgrößen kleiner 1 mm einsetzen [22].

Nach der Abtrennung von Eisen- (7,3 % der Rohasche) und Nichteisenmetallen (0,7 %) wird der überwiegende Teil der Asche im Deponie- und Straßenbau verwertet. Knapp 10 % werden auf Deponien beseitigt [9, S. 19]. Auch bei Einhaltung der Vorschriften und Grenzwerte – z. B. [23] – wird der Einsatz von Müllverbrennungsaschen im Straßen- und Wegebau aufgrund der Befürchtung von ökologischen Langzeitfolgen kritisiert [10]. In Bayern stehen Recyclingbaustoffe in Konkurrenz zu in vielen Gebieten reichlich vorhandenen natürlichen Gesteinen (Kies, Sand), deren bautechnische Eigenschaften vielfach untersucht wurden und die kostengünstig verfügbar sowie in der Regel ökologisch unkritisch sind. Daher werden Recyclingbaustoffe bei Baumaßnahmen selten berücksichtigt [24].

Die seit einigen Jahren in Diskussion befindliche Ersatzbaustoffverordnung [25] soll dem entgegenwirken und hat zum Ziel, einen bundeseinheitlichen gesetzlichen Rahmen für die stoffliche Wiederverwendung von mineralischen Ersatzbaustoffen zu schaffen und gleichzeitig dem Schutz von Wasser und Boden Rechnung zu tragen. Zudem soll der Vollzug erleichtert und auch den Belangen der Wirtschaft nachgekommen werden. Da von dieser Verordnung viele Bereiche direkt oder indirekt betroffen sind, ist der vorliegende Entwurf umstritten [24, 26, 27, 28, 29]. Kritikpunkte sind etwa die Abkehr vom üblichen 10:1-Schütteleluat (Verhältnis Flüssigkeit zu Feststoff), komplizierte Regelungen und strenge Überwachungs- und Dokumentationspflichten. Es wird befürchtet, dass zahlreiche bisher praktizierte Verwendungen von mineralischen Abfällen künftig nicht mehr möglich sein werden. Damit stehen angestrebte Verwertungsquoten in Frage. Es ist noch nicht absehbar, auf welche Prüf- und Grenzwerte und Ausnahmetatbestände man sich auf Basis des nächsten Referentenentwurfs [30] im Gesetzgebungsverfahren verständigen wird.

Die beiden LAGA²-Mitteilungen M19 „Merkblatt über die Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle“ [31] und M20 „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln“ [32] legen Untersuchungsmethoden und Bewertungskriterien für Müllverbrennungsaschen fest. Mit Blick auf die Verwertung als Ersatzbaustoff stehen Eluatkriterien im Fokus. Für die Feststoffgehalte werden lediglich Anhaltswerte (siehe Tab. 1) für den Erkenntnisgewinn genannt, die im Rahmen der Qualitätssicherung vom Anlagenbetreiber vierteljährlich an der entschrotteten Rohasche zu erheben sind [31]. Vor einer Verwertung sind Rohaschen aufzubereiten und mindestens in die drei Stoffgruppen mineralische Anteile, unverbrannte Grobteile und Metallschrott aufzutrennen. Bezüglich Metallschrott wird lediglich die Separierung der Eisenmetalle genannt.

Tab. 1: Feststoffuntersuchungen (chemische Parameter) in Rohaschen nach LAGA M19 [31] und M20 [32]

Parameter	Einheit	Anhaltswert	Parameter	Einheit	Anhaltswert
EOX	mg/kg	3	Kupfer	mg/kg	7.000
PAK ¹⁾	mg/kg	2)	Nickel	mg/kg	500
PCDD/PCDF ³⁾	ng I-TE/kg	0,6 – 30	Quecksilber ¹⁾	mg/kg	2)
Arsen ¹⁾	mg/kg	2)	Zink	mg/kg	10.000
Blei	mg/kg	6.000	Trockenrückstand	Mass.-%	2)
Cadmium	mg/kg	20	Glühverlust	Mass.-%	< 3
Chrom	mg/kg	2.000			

1) Bestimmung zur Erfahrungssammlung

2) Wert ist anzugeben

3) Bestimmung einmal pro Jahr. Kongenere unterhalb Nachweisgrenze (0,2 ng/kg) bleiben unberücksichtigt.

Laut Merkblatt M19 [31] ist die aufbereitete Asche (mineralischer Teil) mindestens drei Monate zu lagern. Während dieses Alterungsprozesses sinkt der pH-Wert und Schwermetalle werden gegenüber der Rohasche besser in die Aschematrix eingebunden. Durch die zahlreichen chemischen und physikalischen Vorgänge wird die Qualität des mineralischen Anteils der Asche verbessert [14, 17] und damit die Verwertung erleichtert [10].

Umfangreiche systematische Untersuchungen zur Aschezusammensetzung, -inhaltsstoffen und -qualität wurden bereits seit Ende der 80er Jahre durchgeführt. Der Schwerpunkt lag dabei vor allem im Hinblick auf die Verwertung der mineralischen Aschefraktion. Deren Ergebnisse wurden auf internationaler Ebene von der International Ash Working Group zusammengeführt (z. B. [33]). Wesentliche Arbeiten aus Deutschland stammen z. B. von Reimann [34], Pfrang-Stotz und Reichelt [18] sowie Hentschel [35].

Während bis zum Beginn des 21. Jahrhunderts die Herstellung eines Sekundärbaustoffs das Hauptziel der Müllverbrennungsascheaufbereitung war, ist in Folge der Verknappung der Ressourcen die Rückgewinnung der Metalle in den Vordergrund gerückt. Durch eine verbesserte Metallausbeute entstehen erhebliche Mengen an mineralischem Feinkorn mit in der Regel negativen bauphysikalischen Eigenschaften. Die Interessengemeinschaft der Aufbereiter und Verwerter von Müllverbrennungsschlacken (IGAM) und die Bundesvereinigung Recycling-Baustoffe (BRB) kritisieren, dass die Verwertung der Müllverbrennungsasche als Baustoff durch eine überzogene Fokussierung auf die Metallrückgewinnung ins Abseits gerate [36]. Die Rückgewinnungsquote von über 92 % durch konventionelle Aufbereitung sei bereits hoch.

² LAGA: Länderarbeitsgemeinschaft Abfall

Einen Überblick über den heutigen Stand der Aufbereitungsverfahren geben [9] und [10]. Bei der Weiterentwicklung der Aufbereitungstechniken muss sich der erhöhte Aufwand für eine qualitative Verbesserung der Produkte – sowohl der mineralischen Fraktion als auch der Metallkonzentrate – durch deren Erlös finanzieren lassen [10]. Durch steigende Metallpreise wird die Rückgewinnung von Metallen bis in die kleinen Kornfraktionen wirtschaftlich.

Die Fortentwicklung der Rückgewinnung von Metallen nimmt aktuell zwei Richtungen:

1. Umstellung der Anlagentechnik vom Nass- auf Trockenausstrag, wie sie vor allem in der Schweiz vorangetrieben wird [37]. Durch den trockenen Austrag bleiben die festen Verbrennungsprodukte in ihrer ursprünglichen Form und chemischen Zusammensetzung weitestgehend erhalten, insbesondere ist die Qualität der Metalle aufgrund fehlender mineralischer Anhaftungen bzw. Oxidschichten erhöht [38]. Diese Gegebenheiten erleichtern eine Sortierung nach Größe, Farbe oder spezifischem Gewicht. Einen Nachteil des Trockenausstrags stellt die starke Staubbildung dar, die mit etlichem verfahrenstechnischen Aufwand zu lösen ist (z. B. Windsichter, Zyklon und Rückführung des Abgases in die Verbrennung wie beim Martin-Entschlacker [39]).
2. Beibehaltung der Nassentschlackung und Ergänzung der Aufbereitungstechniken um zusätzliche Schritte wie Klassierung, Abtrennung von Störstoffen durch nasse Trennverfahren [40], Aufbrechen des mineralischen Kornverbunds durch Scherkräfte als Folge einer mehrfachen mechanischen Aufbereitung, durch Prallzerkleinerung [41] oder durch Einbringen von gepulsten Energieströmen [42, 43]. Da in Deutschland die Nassentschlackung die Methode der Wahl für den Austrag der Asche aus dem Müllverbrennungsofen ist, beschäftigen sich sowohl Hochschulen als auch Anwender mit der Fortentwicklung dieser Techniken.

Zu 1. Trockener Ascheaustrag:

Ein alternativer Ansatz zur Verbesserung der Aufbereitung von Müllverbrennungsaschen und Steigerung der Qualität der zurückgewonnenen Metalle ist der trockene Ascheaustrag. In der Schweiz wurde an der Anlage KEZO (Kehrichtverbrennung Zürcher Oberland) in Hinwil 2007/2008 die erste, 2010 die zweite von insgesamt drei Linien auf den Trockenausstrag umgebaut; in Monthey wurde 2009 ein System zur Trockenentaschung der Firma Martin GmbH an beiden Ofenlinien großtechnisch umgesetzt [37].

Die an der KVA Hinwil installierte Aufbereitungsanlage für trocken ausgetragene Asche bereitet seit 2008 die so genannte Feinschlacke (0,7 – 5 mm), seit 2012 auch die Feinstschlacke (0,1 – 0,7 mm) auf. In beiden Aufbereitungslinien werden zwei in Serie geschaltete NE-Abscheider eingesetzt, was den Wirkungsgrad gegenüber einem einzelnen Abscheider auf über 90 % erhöht [44]. Die abgetrennten NE-Metalle werden in einer NE-Aufbereitungsanlage nach ihrer Dichte (Lufttrenntische) in die beiden Produkte „Aluminium“ und „NE edel“ getrennt. Die leichte Fraktion enthält über 95 % Aluminium [45, 46], die schwere bis zu über 60 % Kupfer [47]. Im Jahr 2015 wird die Anlage zur Aufbereitung trocken ausgetragener Asche für das gesamte Kornspektrum in Betrieb gehen. Die Kapazität der Anlage beträgt rund 200.000 Mg pro Jahr [48].

Trotz der weitgehenden Aufbereitung der Trockenasche sind nach [49] in der verbleibenden Mineralik noch zu hohe Metallgehalte, um die mineralische Fraktion in der Schweiz [50] als Inertstoff verwerten bzw. deponieren zu können. Hohe Recyclingquoten setzen die Verwertung von Kehrichtverbrennungsaschen als Baustoff voraus, ein Weg, der aus Vorsorgegründen umstritten ist und derzeit nicht beschränkt wird [37].

In einem vom deutschen Umweltbundesamt geförderten Verbundprojekt werden im Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe der RWTH Aachen die Wertstoffpotenziale von nass und trocken ausgetragener Asche aufgezeigt und verglichen [51, 52, 53]. Ziel ist die Bewertung von

Optionen zur Steigerung der Metallrückgewinnung und Verwertung mineralischer Rohstoffe. Von einer Müllverbrennungsanlage wurden eine nass ausgetragene Asche nach einer dreimonatigen Lagerung und eine trocken ausgetragene direkt einer mechanischen Aufbereitung unterzogen. Dabei erfolgte eine Klassierung in Kornklassen und anschließend die Metallabtrennung in drei der sechs Kornklassen (4 – 80 mm) durch einen Überband-, einen Trommelmagnet- und einen Wirbelstromabscheider. Die Trockenasche ist gegenüber der nass ausgetragenen grobkörniger, weshalb bessere baustoffliche Eigenschaften zu erwarten sind. Bei der Trockenasche konnten höhere Fe- und NE-Anteile separiert werden, zudem verringert in der nass ausgetragene Asche die anhaftende Mineralik die Qualität der Metalle. Analysen zu Bioakkumulation und Bioleaching sowie metallurgische Untersuchungen runden das Forschungsprojekt ab.

Zu 2. Nasser Ascheaustrag:

Als Beispiel einer weitergehenden Aufbereitung wird in der Literatur, z. B. [9, 10, 40], häufig das Verfahren der Firma Scherer + Kohl GmbH genannt, das auf dem Patent von Scherer [54] beruht. In Ludwigshafen wird seit 1998 eine Anlage im industriellen Maßstab betrieben. Nach dreimonatiger Lagerung entsprechend der LAGA-Vorgaben [31] und einer konventionellen Aufbereitung mit Prallzerkleinerung, magnetischer und manueller Abtrennung von groben Bestandteilen (Metallschrotte, Unverbranntes) sowie Klassierung folgen nasse Verfahrensschritte. Durch die Bedüsung der Asche mit Wasser bei einem Druck von 5×10^5 Pa werden die mineralischen Agglomerate zerstört und Metallteilchen ohne weitere Zerkleinerung freigesetzt. Die so behandelte Asche wird bei 2 mm nass gesiebt und aus beiden Fraktionen werden durch Schwimm-Sink-Scheider (so genannte Hydrobandabscheider) unverbrannte Bestandteile entfernt. Die Fraktion > 2 mm wird in mehrere Kornklassen klassiert, aus denen in einem letzten Schritt magnetisch Fe-Metalle und durch Wirbelstromabscheidung NE-Metalle abgetrennt werden.

Innerhalb der Fördermaßnahme „r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) widmen sich zwei Vorhaben dem Thema Recycling von Müllverbrennungsaschen [55]:

- Das Projekt ATR (Aufschluss, Trennung und Recycling von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren) [41] geht von einer mehrstufigen Aufbereitung im großtechnischen Maßstab aus. Neben den üblichen mechanischen Trenn- und Verfahrensstufen erfolgt eine Zerkleinerung der Aschen mit Aufprallgeschwindigkeiten von circa 220 m/s [56]. Die Auftrennung der Metalle in oxidische und elementare Bestandteile wird mittels hydrothormaler und enzymatischer Verfahren, Flotation und Dichtesortierung untersucht [57].
- In dem Verbundprojekt VeMRec (Verlustminimiertes Metallrecycling aus Müllverbrennungsaschen durch sensorgestützte Sortierung) [21] stehen die in der Asche enthaltenen NE-Metalle im Fokus. In Deutschland werden circa 30 Mass.-% der in der Asche enthaltenen NE-Metalle abgetrennt, wobei vor allem in der Fraktion < 10 mm ein hohes und zumeist ungenutztes Potenzial vorhanden ist [58]. Projektziele sind die Verbesserung und Erweiterung der NE-Rückgewinnung und die Erzeugung von metallurgisch verwertbaren Produkten. Die Wirbelstromabscheider einer Aufbereitungsanlage wurden so eingestellt, dass möglichst wenige NE-Metalle in der mineralischen Restfraktion verloren gehen. Dadurch verringert sich die Reinheit des abgetrennten NE-Konzentrats. Das Konzentrat wird in einer dafür entwickelten Pilotanlage mechanisch aufbereitet. In einer Prallmühle werden die spröden mineralischen Anhaftungen zerkleinert, die Metalle jedoch nicht. Eine Siebung bei 3 mm trennt die Mineralik ab und führt zur Aufkonzentrierung der NE-Fraktion. Mit einer automatisierten Bandsortieranlage, die nach dem Prinzip der Röntgentransmission (XRT) arbeitet, erfolgt die Trennung der NE-Metalle in eine Leicht- und eine Schwerfraktion. Diese Art der Dichtesortierung stellt eine trockenmechanische Alternative zum Schwimm-Sink-Verfahren dar. Zur weiteren Auftrennung werden übliche metallurgische Verfahren verwendet [21, 59, 60].

Ein anderer Ansatz zum Recycling von „Materialverbunden“ ist die Elektrodynamische Fragmentierung [42, 43] des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik. Durch ultrakurze Hochleistungsimpulse (Dauer kleiner $0,5 \mu\text{s}$) werden im Labormaßstab Festkörperverbunde in ihre Bestandteile „zerlegt“. Bei der Sortierung der behandelten Müllverbrennungsgasche ergeben sich fünf Stoffgruppen: Fe-Metalle, NE-Metalle, Steine/Keramik, Altglas und Schmelzprodukte. Die Stoffgruppen Steine/Keramik und Altglas werden von schwermetallhaltigen Anhaftungen befreit, wodurch die Möglichkeit einer höherwertigen Verwertung besteht. Elemente wie Chrom, Nickel und Zink reichern sich in den Schmelzprodukten bzw. in der Fraktion $< 2 \text{ mm}$ an. Als nächster Schritt ist die Übertragung der Methode vom Labor- in den Technikumsmaßstab mit Blick auf den Einsatz der gewonnenen Produkte als Bau- oder Zementzusatzstoff geplant.

Die Untersuchungen von Deike et al. [61] zeigen, dass ausgehend von den Ergebnissen der Abfallanalysen des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (BayLfU) [62] mit einer konventionellen Ascheaufbereitung eine Metall-Recyclingquote von über 92 % erreicht wird. In dem Projekt wurden aufbereitete Aschen gesiebt. Die Gehalte mehrerer Elemente wurden mittels Röntgenfluoreszenzanalyse in den einzelnen Kornfraktionen bestimmt, um die Abhängigkeit der Gehalte von der Partikelgröße zu ermitteln. Die Fraktion $< 2 \text{ mm}$ wurde detaillierter betrachtet, da sie circa 25 % der Gesamtmasse ausmacht. Im Hinblick auf die Metallrückgewinnung spielt diese Fraktion eine eher untergeordnete Rolle. Einige Ascheproben wurden geschmolzen und der entstandene Metallrückstand analysiert. Die magnetische Trennung der Kornfraktionen zeigt, dass kleinere Korngrößen einen höheren Anteil an magnetischen Partikeln enthalten. Zugleich sind die Gehalte einiger Metalle in der magnetischen Fraktion erhöht, die Magnetit (Fe_3O_4) enthält. Der Kupfergehalt in dieser Fraktion enthält 0,3 – 0,4 %, was der Konzentration abbauwürdiger Kupfererze entspricht [63].

Der Stand des Wissens zeigt, dass es diverse Ansätze und Bestrebungen gibt, die Metalle verstärkt aus den Müllverbrennungsgaschen zurückzugewinnen. Inwieweit dieses Potenzial in bayerischen Müllverbrennungsgaschen bereits ausgeschöpft ist und welches Potenzial sich noch heben lässt, soll mit der vorliegenden Untersuchung anhand repräsentativer Daten ermittelt werden.

3 Definitionen und Abkürzungen

Definitionen

Magnetische Fraktion/Teilprobe	Anteil der Gesamtprobe, der bei der Probenahme vor Ort mittels eines Handmagneten abgetrennt wurde. Diese Fraktion/Teilprobe enthält sowohl magnetische Metallstücke (Eisen) als auch magnetisierbare Aschepartikel.
Metallische Fraktion/Teilprobe	Metallische, nicht magnetisierbare Bestandteile der Gesamtprobe, die bei der Probenahme vor Ort durch optische Sichtung abgetrennt wurden. Diese Fraktion/Teilprobe enthält Nichteisenmetalle wie Aluminium, Kupfer oder Messing.
Mineralische Fraktion/Teilprobe	Anteil der Gesamtprobe, der nach der Abtrennung der magnetischen und metallischen Fraktion/Teilprobe verbleibt.
Rohasche	Nach der Verbrennung von Abfall in den Müllverbrennungsanlagen anfallendes Material. Der Austrag erfolgt in den in Deutschland installierten Anlagen über einen Nassentschlacker (Wasserbad). Rohasche enthält Verbrennungsrückstände (Asche), Schrottteile und Unverbranntes.
Feinfraktion, Grobfraktion	Die Aufbereitung der Müllverbrennungsaschen (Abtrennung von Metallen und teilweise Unverbranntem) erfolgt zur Verbesserung der Rückgewinnungsraten in mehreren Größensfraktionen. In dem vorliegenden Projekt wurden die anfallenden aufbereiteten Materialströme Feinfraktion (kleinere Korngrößen) und Grobfraktion (größere Korngrößen) separat beprobt und untersucht.
Tagesmischprobe	Am Ende eines Probenahmetages erstellte Mischprobe. Dazu wurden die je 8 Einzelproben des Tages einer Fraktion gemischt und bis zur gewünschten Menge geteilt.
Wochenmischprobe	Am Ende der 5 Probenahmetage erstellte Mischprobe. Dazu wurden die jeweils 5 Tagesmischproben einer Fraktion gemischt und bis zur gewünschten Menge geteilt.
Eisen (Fe)-Metalle	Metallteile, die bei der Aufbereitung von Rohasche durch Magnetabscheider aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaft abgetrennt werden. Dies ist zum größten Teil Eisen.
Nichteisen (NE)-Metalle	Metalle und Legierungen, die bei der Aufbereitung von Rohasche durch Wirbelstrom-/NE-Abscheider abgetrennt werden. Dies sind zum Beispiel Aluminium, Messing, Kupfer und Zink.
Metall-Potenzial_{metallisch}	(Elementare) Metallteile, die aus aufbereiteter Müllverbrennungsasche durch konventionelle Aufbereitung zusätzlich zurückgewonnen werden können.
Metall-Potenzial_{chemisch gebunden}	Metalle, die in aufbereiteter Müllverbrennungsasche in Form von chemischen Verbindungen enthalten sind.

Abkürzungen und Einheiten

°C	Grad Celsius
c	Konzentration
EOX	Extrahierbares organisch gebundenes Halogen
f	Faktor, Konzentrationsverhältnis
Fe	Eisen
g	Gramm
h	Stunde
i	Index
ICP-MS	Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (engl. inductively coupled plasma mass spectrometry)
ICP-OES	Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (engl. inductively coupled plasma optical emission spectrometry)
I-TE	Internationales Toxizitätsäquivalent
kg	Kilogramm
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage, Bezeichnung für Müllverbrennungsanlagen in der Schweiz
L	Liter
m	Meter
Mass.-%	Massenprozent
MBA	Mechanisch-biologische Abfallbehandlung
Mg	Megagramm, entspricht der metrischen Tonne (1.000 Kilogramm)
mg	Milligramm
Mio.	Million
mL	Milliliter
mm	Millimeter
MV(A)	Müllverbrennung(sanlage)
µs	Mikrosekunde
NE	Nichteisen
ng	Nanogramm
NO _x	Stickstoffoxide, nitrose Gase
OS	Originalsubstanz
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCDD/PCDF	Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
s	Sekunde
TS	Trockensubstanz, bei 105 °C getrocknete Probe (DIN ISO 11465 [64], DIN 15934 [65])
VA	Edelstahl
ξ	Massenanteil der mineralischen bzw. magnetischen Fraktion an einer Kornklasse

4 Beschreibung der beprobten Anlagen

Im Folgenden werden die 6 beprobten Anlagen dargestellt und beschrieben, wie die jeweilige Rohasche aufbereitet wird. Die Anlagen sind chronologisch nach dem Zeitpunkt der Durchführung der Probenahmen von I bis VI nummeriert. Im Abschnitt 4.1 wird die Aufbereitungstechnik an den beprobten Müllverbrennungsanlagen (Anlagen II bis V) beschrieben. Auf die externen Aufbereitungsanlagen (Anlagen I und VI) wird in Abschnitt 4.2 eingegangen.

Mit den beprobten Anlagen (vier Müllverbrennungsanlagen; zwei Aufbereitungsanlagen, die die Asche von sechs Müllverbrennungsanlagen behandeln) werden insgesamt circa 75 % der in Bayern anfallenden Rohasche erfasst.

4.1 Ascheaufbereitung an Müllverbrennungsanlagen

In diesem Abschnitt wird auch die Anlage III kurz beschrieben, die über keine eigene Ascheaufbereitung verfügt, aber an der die Rohasche beprobt worden ist.

4.1.1 Anlage II

Die Aufbereitung der an der Anlage II anfallenden Rohasche erfolgt direkt am Standort. Die Abb. 1 zeigt das Verfahrensschema der Anlage.

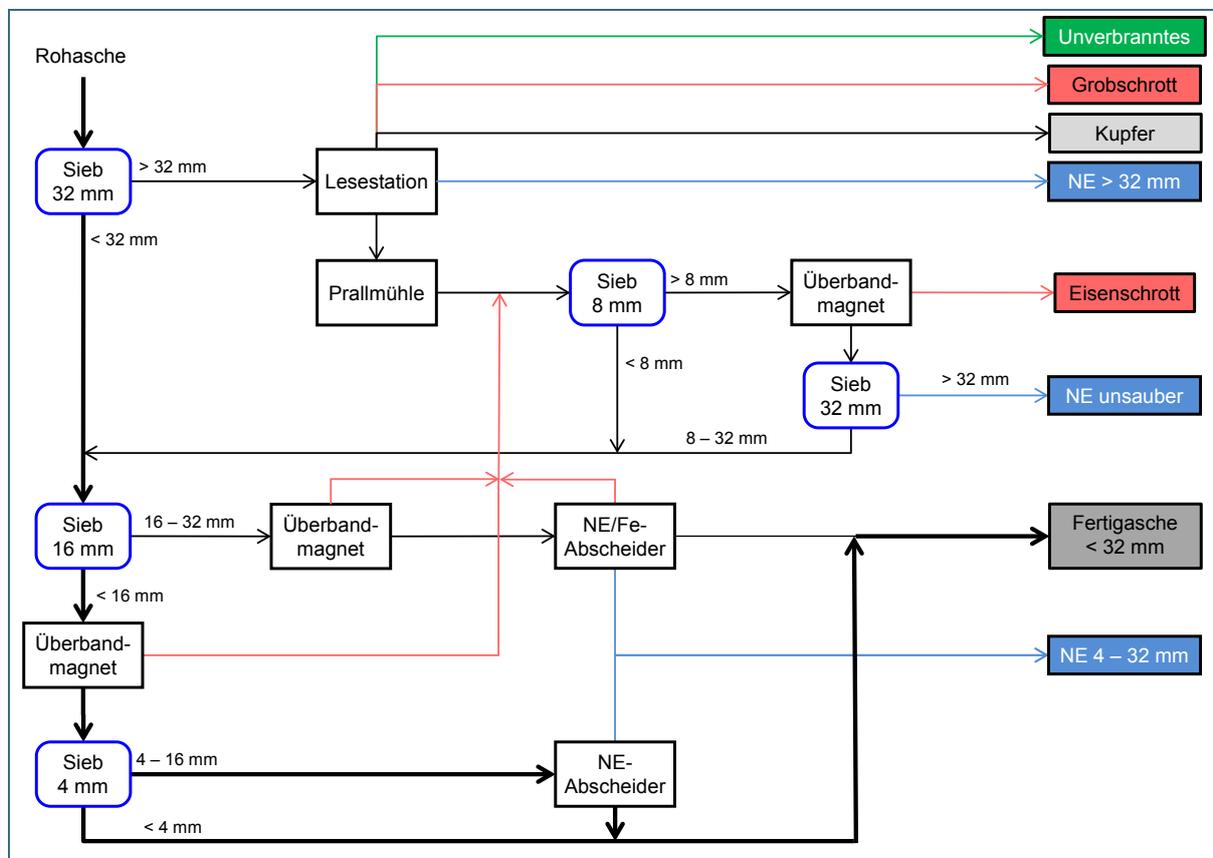


Abb. 1: Verfahrensschema der Aufbereitungsanlage der Anlage II. Hauptmassenströme fett dargestellt

Nach Abwurf der Rohasche in den Aschebunker erfolgt die Aufgabe des Materials auf ein erstes Sieb mit einer Maschenweite von 32 mm. Von dem Anteil > 32 mm werden in einer Lesestation organische Bestandteile (Unverbranntes), Grobschrott, Kupferschrott und Nichteisenmetalle entfernt. Das restli-

che Material wird in einer Prallmühle zerkleinert und zu einem Sieb mit der Maschenweite 8 mm gefördert. Aus dem Stoffstrom > 8 mm wird durch einen Überbandmagneten der Eisenschrott entfernt.

Der nicht magnetische Anteil wird anschließend bei 32 mm gesiebt. Der Siebrückstand wird als „NE unsauber“ bezeichnet. Dieses Material wird zunächst gesammelt und später per Hand von Störstoffen wie Steinen befreit. Der Siebdurchgang des 8 mm-Siebes und des zweiten 32 mm-Siebes wird dem Hauptstrom (Siebdurchgang des ersten 32 mm-Siebes) zugeführt.

Durch eine weitere Siebung wird die Größenfraktion 16 – 32 mm erzeugt. Aus dieser Fraktion werden Eisenschrott und anschließend Nichteisenmetalle abgetrennt.

Aus der Fraktion < 16 mm erfolgt ebenfalls eine Abscheidung des Eisenschrottes. Ein weiterer Siebschnitt erfolgt bei 4 mm. Eine Gewinnung der Nichteisenmetalle erfolgt aus der Fraktion 4 – 16 mm. Anschließend werden die beiden Stoffströme 4 – 16 mm und < 4 mm wieder vereinigt. Gemeinsam mit der aufbereiteten Asche der Größe 16 – 32 mm erfolgt der Transport in eine Lagerhalle.

Täglich werden in der Aufbereitungsanlage etwa 250 – 300 Mg Asche aufbereitet. Die Anlage ist von Montag bis Freitag jeweils acht Stunden in Betrieb.

4.1.2 Anlage III

Die Anlage besteht aus 4 Ofenlinien mit einer Kapazität von jeweils 35 bzw. 20 Mg/h. Damit verfügt die Gesamtanlage über eine Kapazität von 110 Mg/h.

Im Jahr 2013 betrug der Durchsatz der Anlage über 600.000 Mg [66]. Die Aufbereitung der anfallenden Rohasche (2013: circa 143.000 Mg) erfolgt durch externe Aufbereitungsunternehmen. Vor Ort werden lediglich große Stücke aus dem Materialstrom entfernt: Nach den Nassentschlackern fällt die Rohasche durch einen Stangenrost mit einer Spaltweite von 120 mm. Größere Bestandteile wie Grobschrott oder Unverbranntes werden dadurch abgetrennt und dem Recycling bzw. der Verbrennung zugeführt.

4.1.3 Anlage IV

In den drei Verbrennungslinien der Anlage IV wurden im Jahr 2013 rund 200.000 Mg Reststoffe verbrannt [66]. Die Verbrennungslinien 1 und 2 besitzen eine Kapazität von je 12 Mg/h, die Verbrennungslinie 3 von 10 Mg/h.

Die Aufbereitung der anfallenden Rohasche (rund 63.000 Mg im Jahr 2013) erfolgt in der eigenen Aufbereitungsanlage vor Ort. Das Verfahrensschema der Anlage zeigt Abb. 2.

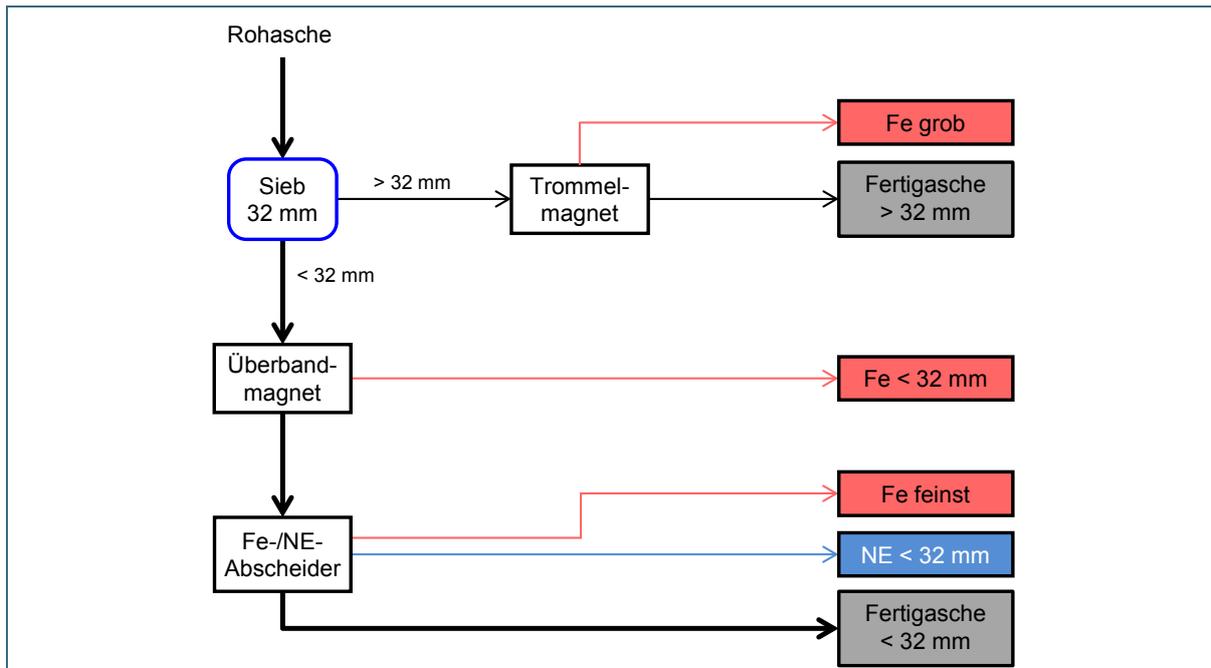


Abb. 2: Verfahrensschema der Aufbereitungsanlage der Anlage IV. Hauptmassenstrom fett dargestellt

Nach einer zwei- bis 14-tägigen Lagerung wird die Rohasche der Aufbereitungsanlage durch einen Radlader zugeführt. Hierbei werden manuell große Schrottteile entfernt. Anschließend erfolgt eine Siebung des Materials bei 32 mm.

Aus der Fraktion > 32 mm wird Eisenschrott durch einen Trommelmagneten abgetrennt. Die verbleibende „Fertigasche > 32 mm“ geht an ein Unternehmen zur weiteren Aufbereitung und anschließenden Verwertung.

Durch einen Überbandmagneten erfolgt die Entfernung von magnetischen Bestandteilen aus der Fraktion < 32 mm. Im nachfolgenden Fe-/NE-Abscheider werden Feineisen und danach die enthaltenen Nichteisenmetalle aus dem Stoffstrom abgetrennt. Die aufbereitete Asche wird über ein Förderband auf einen Schüttkegel ausgetragen und gelagert.

4.1.4 Anlage V

Mit einem Durchsatz von circa 450.000 Mg im Jahr 2013 [66] gehört die Anlage V zu den Anlagen Bayerns mit dem höchsten Durchsatz. Die 4 Ofenlinien besitzen eine Kapazität von dreimal je 12 Mg/h und einmal 24 Mg/h, also insgesamt circa 60 Mg/h.

Nach den Entschlackern fällt die Rohasche auf ein Förderband und wird zu einem Sieb mit der Maschenweite 40 mm transportiert (vergleiche Abb. 3). Durch einen Trommelmagneten wird Grobschrott aus der Fraktion > 40 mm abgetrennt.

Die Abscheidung des Eisens aus dem Stoffstrom < 40 mm erfolgt durch einen Überbandmagneten.

Die weitere Aufbereitung der beiden Ascheströme mit Gewinnung der Nichteisenmetalle erfolgt durch ein externes Aufbereitungsunternehmen.

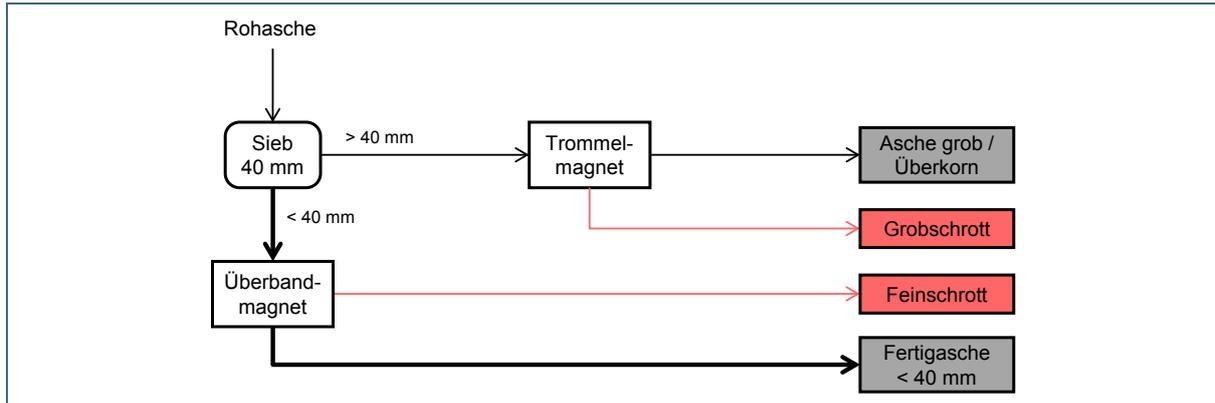


Abb. 3: Verfahrensschema der Aufbereitungsanlage der Anlage V. Hauptmassenstrom fett dargestellt

4.2 Ascheaufbereitung bei Externen

4.2.1 Anlage I

Der Betreiber der Anlage I ist als Dienstleister für mehrere Müllverbrennungsanlagen tätig. Im Jahr 2013 wurden Müllverbrennungsaschen aus fünf bayerischen Anlagen aufbereitet. Bei dem Input-Material der Anlage handelt es sich um teilweise vorentschrötte Asche. Die Aufbereitung erfolgt nicht getrennt nach Materialherkunft. Laut Angaben des Betreibers hat die Anlage einen Jahresdurchsatz von etwa 150.000 Mg. Das Verfahrensschema der Anlage zeigt Abb. 4.

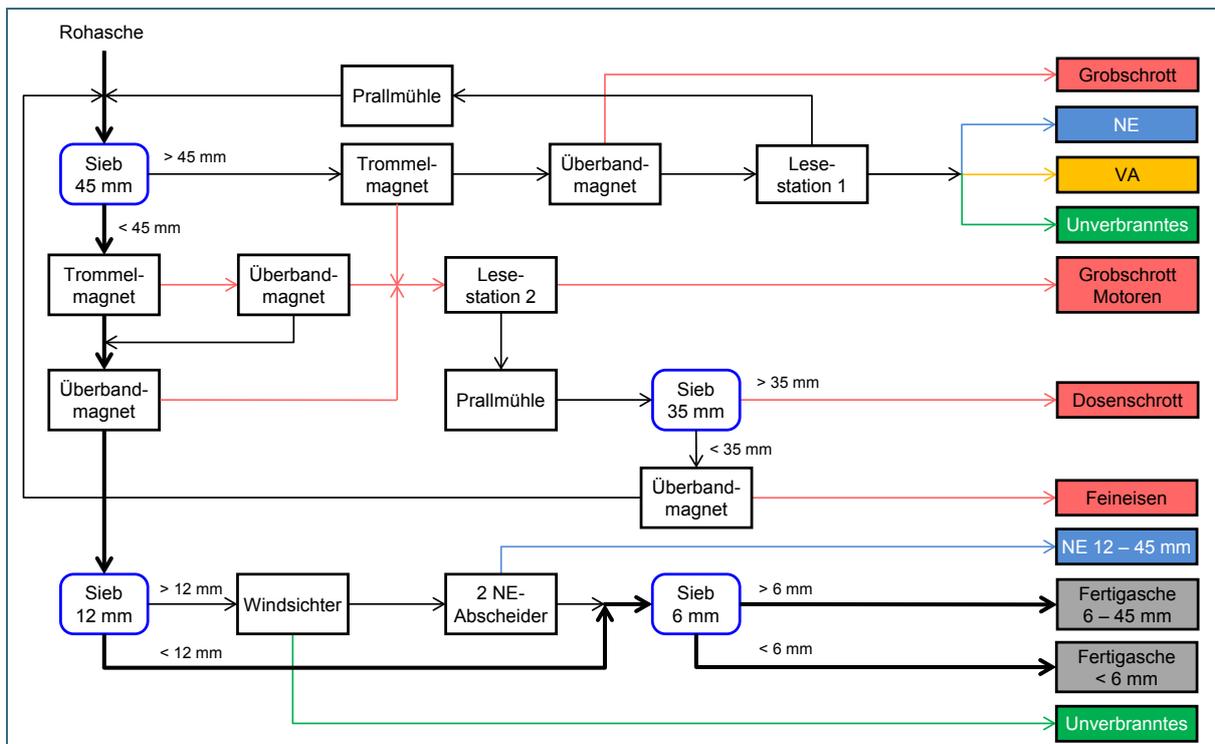


Abb. 4: Verfahrensschema der Aufbereitungsanlage I. Hauptmassenströme fett dargestellt

Vor der Aufbereitung werden die angelieferten MV-Aschen circa 6 – 8 Wochen gelagert. Nach der Aufgabe der Rohasche erfolgt eine Siebung bei 45 mm. Das Material > 45 mm gelangt nach Abtrennung des Grobschrotts durch zwei Magnete zu einer Lese-station. Dort werden Nichteisenmetalle, Edelstahl und Unverbranntes entnommen.

Von dem Material < 45 mm trennen mehrere Magnete den enthaltenen Schrott ab. Dieser wird anschließend zu einer zweiten Lesestation geführt, in der Elektromotoren (Wicklungen, Spulen etc.) und Grobschrott aussortiert werden. Durch eine Prallmühle wird das restliche magnetische Material von Anhaftungen befreit. Mittels Siebung bei 35 mm erfolgt die Separation von Dosenschrott. Durch einen folgenden Überbandmagneten wird das verbleibende Feineisen gewonnen; der nichtmagnetische Anteil wird der Rohascheaufgabe ein weiteres Mal zugeführt.

Die nichtmagnetische Fraktion < 45 mm wird bei einer Maschenweite von 12 mm gesiebt. Aus der Fraktion > 12 mm entfernt zunächst ein Windsichter unverbrannte Bestandteile. Anschließend erfolgt die Abtrennung von Nichteisenmetallen durch zwei Wirbelstromabscheider (NE-Abscheider). Die mineralischen Fraktionen < 12 mm und > 12 mm werden zu einem Sieb mit einer Maschenweite von 6 mm transportiert. Dort erfolgt die Trennung des Materials in die beiden Ascheprodukte der Anlage: Fertigaschen der Körnungen < 6 mm und 6 – 45 mm. Die beiden Stoffströme fallen zu ungefähr gleichen Teilen an. Der tägliche Durchsatz der Anlage beträgt circa 1.000 Mg.

Im Jahr 2012 wurde an der Anlage ein Gesamtanteil von 6 % Eisenschrott und 0,98 % NE-Metalle aus der Müllverbrennungsgasche abgetrennt [67, 68]. Im Jahr 2013 konnten im Durchschnitt 5,7 Mass.-% Eisenschrott sowie 0,7 Mass.-% NE-Metalle aus der Rohasche zurückgewonnen werden [69].

4.2.2 Anlage VI

In der Aufbereitungsanlage VI wird die Rohasche einer bayerischen Müllverbrennungsanlage aufbereitet. Große Eisenteile werden bereits an der MVA abgetrennt. Das Verfahrensschema der Anlage VI zeigt Abb. 5. Die Rohasche wird zunächst bei 50 mm gesiebt. Aus dem Material > 50 mm werden die Eisenteile durch einen Überbandmagneten abgetrennt und anschließend in einer Lesestation unverbrannte Bestandteile sowie NE-Metalle, Messing und andere Mischmetalle entfernt. Danach wird das Material in einem Brecher zerkleinert und der Anlage erneut zugeführt.

Durch eine Siebung bei 4 mm wird die Fraktion 4 – 50 mm erzeugt. Aus dieser werden über zwei Magnetabscheider und zwei NE-Abscheider die Eisen- und Nichteisenmetalle < 50 mm entfernt. In der Fraktion < 4 mm erfolgt die Abtrennung der Eisenteile. Das verbleibende Material sind die aufbereiteten Stoffströme < 4 mm sowie 4 – 50 mm. Zur Verminderung der Staubentwicklung wird die aufbereitete Asche direkt beim Bandabwurf auf den Schüttkegel bewässert (siehe Abb. 17, Abschnitt 6.6).

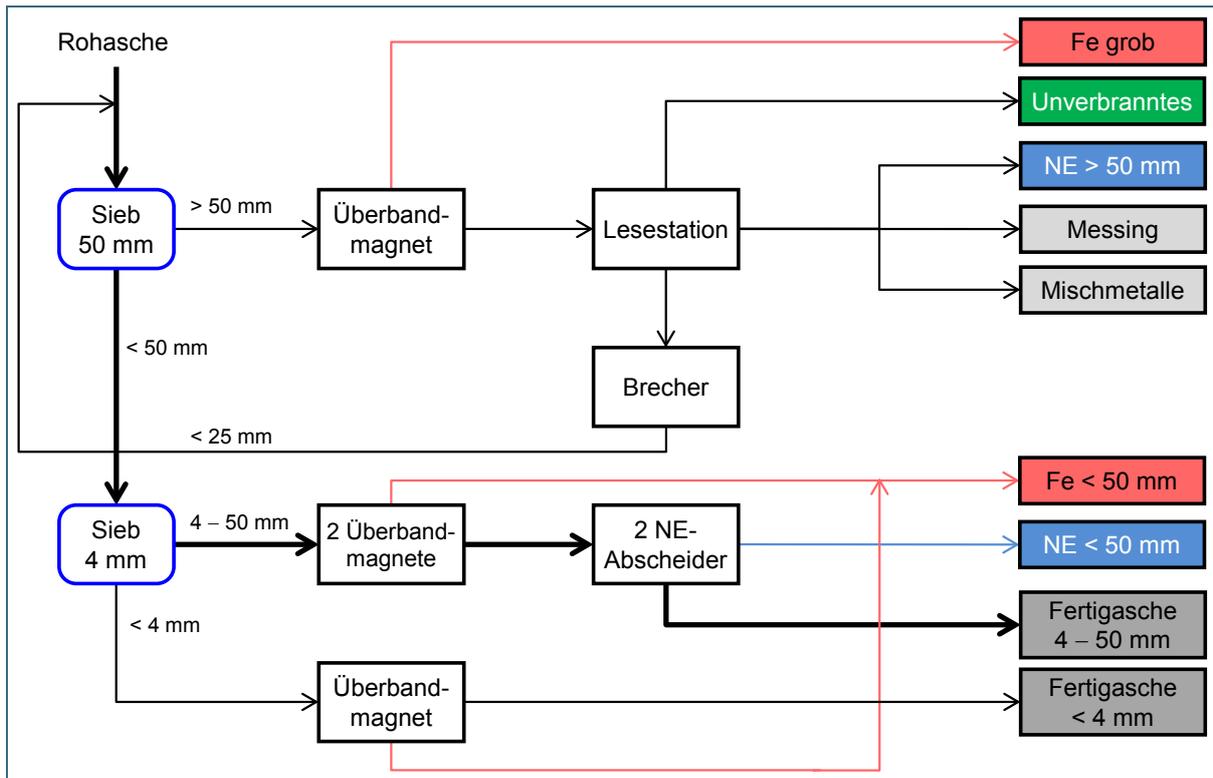


Abb. 5: Verfahrensschema der Aufbereitungsanlage VI. Hauptmassenstrom fett dargestellt

5 Probenahme und Analytik

5.1 Probenahme und Sortieranalyse

In dem Projekt wurden Müllverbrennungsaschen sowohl an Müllverbrennungsanlagen als auch bei externen Aufbereitern untersucht. Sofern vorhanden, wurden die bereits aufbereiteten Aschen beprobt, das heißt nach der Abtrennung der Metalle, um das bislang mit belastbaren Daten wenig erfasste Wertstoffpotenzial der Aschen zu ermitteln. Durch Gespräche mit den Betreibern und Besichtigungen der Anlagen wurden die zur Festlegung der Probenahmestellen sowie des Probenahmeverfahrens nötigen Informationen und Kenntnisse gewonnen und die Probenahmen vorbereitet. Die Entnahme der Proben erfolgte durch entsprechend geschultes Personal unter Beachtung der nötigen Vorsichtsmaßnahmen. Da die Metallabscheidung in mehreren Siebschnitten stattfindet, wurden die einzelnen Fraktionen separat beprobt und untersucht. Die Probenahme erfolgte entsprechend den Richtlinien der Mitteilung 32 der LAGA (PN 98) [70]. Bei der Probenahme wurden Teilmengen entnommen, die im Hinblick auf die untersuchten Merkmale repräsentativ für das Gesamtmaterial sind. Bei Abfällen handelt es sich im Allgemeinen um heterogene Gemische, was sich auch im Verbrennungsrückstand widerspiegelt. Es ist auf ein ausreichendes Volumen der entnommenen Einzelproben zu achten, um eine mögliche zeitliche oder räumliche Variabilität des zu beprobenden Materials zu berücksichtigen. Da es z. B. auf Transportbändern zu einer Entmischung des Materials ähnlich einem Haufwerk kommen kann, ist bei der Probenahme die komplette Breite des Materialstroms zu erfassen.

Die Probenahme an den Anlagen erfolgte an fünf Werktagen während des Regelbetriebs. Bei der Wahl des Zeitraums wurde darauf geachtet, dass keine Abweichungen vom Normalbetrieb stattfinden, wie z. B. Revisionsarbeiten. Täglich wurden acht Einzelproben in einem Abstand von etwa einer Stunde gezogen, um eine repräsentative Tagesprobe zu erhalten. Als Volumen einer Einzelprobe wurden circa 20 Liter festgelegt, was einer Masse von mindestens 20 kg entspricht. Aus praktischen Gründen wurden die Probenmengen mit 10-Liter-Eimern abgemessen, weshalb die Angaben aller Probenmengen im Folgenden in Litern erfolgen. Bei der Beprobung von mehreren anfallenden Stoffströmen wurden diese einzeln beprobt und untersucht. Im Falle der Probenahme von Rohasche wurde das Mindestvolumen der Einzelproben verdoppelt, da es sich gegenüber bereits aufbereiteten Teilströmen um ein heterogeneres Material handelt.

Die Abb. 6 zeigt eine schematische Darstellung des Probenahmeverfahrens. Bei einer Abweichung von dieser Vorgehensweise ist dies in der Beschreibung der einzelnen Beprobungskampagnen (siehe Abschnitt 6) aufgeführt. Jede Einzelprobe wurde direkt nach der Probenahme gewogen und anschließend auf einem Sortiertisch mit einer Kunststoffolie oder -platte als Unterlage verteilt. Das Probenmaterial wurde gleichmäßig und möglichst flach auf dem Sortiertisch ausgebreitet. Die Abtrennung der magnetischen Anteile erfolgte mit Hilfe eines Handmagneten (siehe Abb. 7). Dieser wurde mehrere Male über und durch das Material bewegt, bis keine magnetisierbaren Partikel mehr haften blieben. Das abgetrennte magnetische Material wurde gewogen und bis zum Ende des Tages gesammelt.

In der Fraktion „magnetisch“ sind nicht nur stückige Eisenteile enthalten, sondern auch Aschepartikel, die aufgrund eines hohen Gehaltes an chemisch gebundenem Eisen oder durch den Einschluss eines magnetischen Metallteiles vom Handmagneten angezogen werden.

Anschließend wurden durch optisches Sichten (Form, Oberfläche) die nichtmagnetischen Metallteile aus der Asche abgetrennt, wie z. B. Besteck, Schrauben und Drähte aus Aluminium, Kupfer, Messing oder Edelstahl. Dabei wurde das Material gründlich manuell durchkämmt. Bei fraglichen Gegenständen wurde die anhaftende Mineralik mit einer Metallfeile entfernt, um zu prüfen, ob es sich um einen metallischen Gegenstand handelt. Die metallischen Teilproben der acht Einzelproben wurden als Tagessammelproben ins Josef-Vogl-Technikum des Bayerischen Landesamtes für Umwelt gebracht.

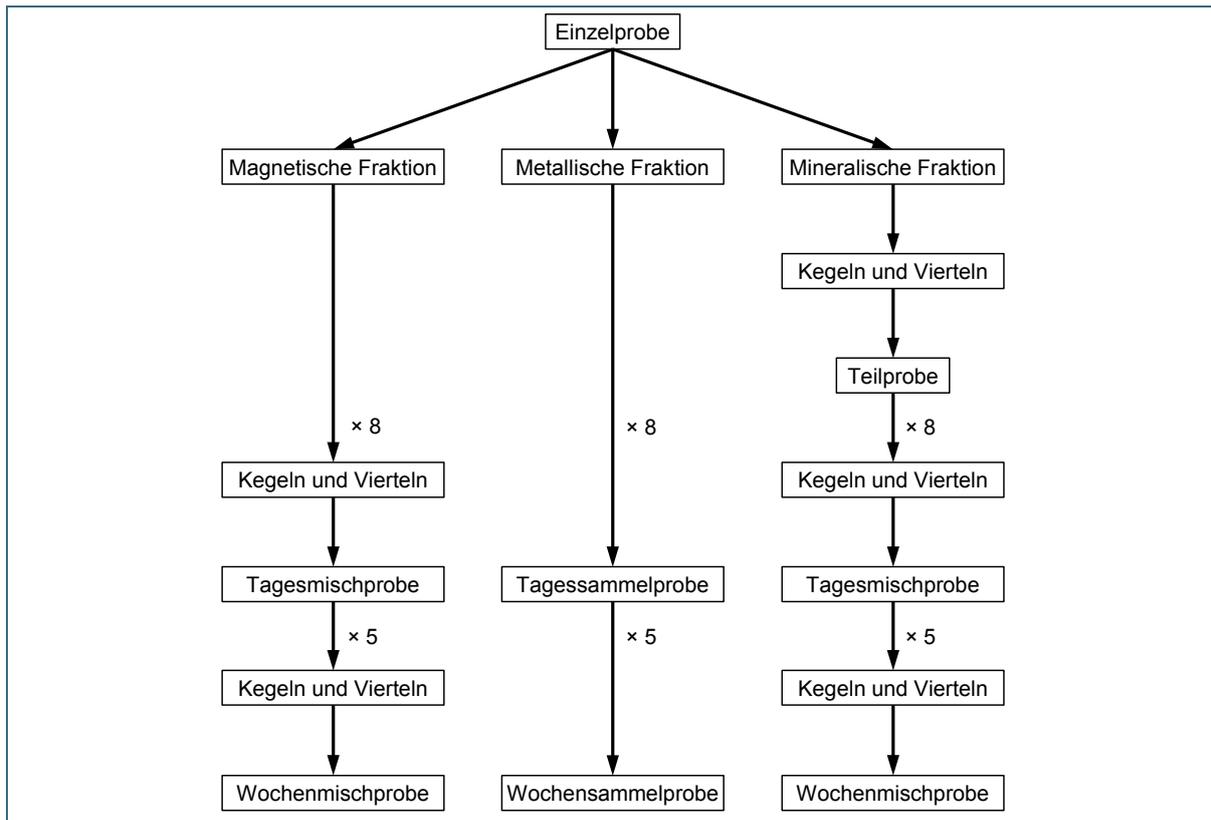


Abb. 6: Vorgehensweise (Schema) bei der Probenahme von Müllverbrennungsasche

Nichtmagnetische Metalle, die optisch nicht als Metalle erkennbar waren (z. B. NE-Metalle, die mit einer Ascheschicht überzogen bzw. in mineralisches Material eingeschlossen sind), sind durch eine optische Sortierung nicht abtrennbar und daher Bestandteil der „mineralischen“ Teilfraktion.

- Von der nach dem Sortieren verbleibenden mineralischen Fraktion wurde eine Teilprobe (10 Liter) abgetrennt und in einer Wanne zurückgestellt. Der Rest wurde verworfen. Am Ende der täglichen Probenahme wurde aus den je acht magnetischen und mineralischen Teilproben durch Kegeln und Vierteln [70] eine Tagesmischprobe generiert. Dazu wurden die vereinigten Teilproben durch mehrmaliges Schaufeln gründlich vermischt und zu einem Kegel aufgeschüttet. Anschließend wurde eine Hälfte des Materials abgetrennt und verworfen. Die andere Hälfte wurde erneut vermischt, aufgeschüttet und halbiert, bis die gewünschte Probemenge (circa 20 Liter entspricht mindestens rund 20 kg) übrig blieb.

Diese Vorgehensweise wurde an den nächsten vier Tagen wiederholt. Am Ende des letzten Tages der Probenahmekampagne wurden aus den Tagesmischproben der magnetischen und mineralischen Fraktionen Wochenmischproben erstellt.

In diesem Projekt wurden grundsätzlich die Wochenmischproben untersucht. Von einer Anlage wurden auch die generierten Tagesmischproben analysiert, um die Streubreite ausgewählter Materialkenngrößen, insbesondere der Elementgehalte, zu prüfen.



Abb. 7:
Abtrennen der magnetischen Bestandteile mit Hilfe eines Handmagneten

5.2 Probenvorbereitung

Die Gewinnung der Analysenproben erfordert eine Vielzahl von mechanischen Probenaufbereitungsschritten, insbesondere diverse Teilungs- und Zerkleinerungsschritte. Die Asche lag teilweise bereits durch das Aufbereitungsverfahren in verschiedenen Größenfraktionen vor. Die erste Fraktionierung der Proben in eine magnetische, metallische und mineralische Teilprobe wurde bereits vor Ort durchgeführt. Im Josef-Vogl-Technikum des Bayerischen Landesamtes für Umwelt erfolgte die weitere Probenbehandlung der magnetischen und mineralischen Wochenmischproben. Im Folgenden sind die einzelnen Arbeitsschritte der Probenaufbereitung beschrieben (vergleiche Abb. 8). Von einer Anlage wurden neben den Wochen- auch die Tagesmischproben aufbereitet.

Teilen

In einem ersten Arbeitsschritt wurde die Laborprobe (Wochen- oder Tagesmischprobe) geteilt, um eine Prüfprobe zu erzeugen. Für die Feinfraktionen der Aschen wurde ein Probenteiler (Modell PT 100, Fa. Retsch, Haan) verwendet. Da die Körnung der Grobfraktionen zu groß für den Probenteiler war, erfolgte die Probenteilung durch „fraktioniertes Schaufeln“ nach LAGA PN 98 [70]. Gleich große Teilmengen der Probe werden abwechselnd in mehrere Behälter geschaufelt. In der vorliegenden Arbeit wurden die Proben etwa geviertelt, der Rest als Rückstellprobe verwendet. Durch „fraktioniertes Schaufeln“ wurden aus der Prüfprobe Teilproben zur Bestimmung des Trockenrückstands sowie der Korngrößenverteilung entnommen.

Mahlen

Nach der Siebanalyse und der Auftrennung der Probe in die entsprechenden Kornklassen wurden diese auf Analysenfeinheit gemahlen. Verwendet wurde eine Planeten-Schnellmühle (Modell PM 4000, Fa. Retsch, Haan; Mahlwerkzeuge aus Zirkondioxid, zwei Mahldurchgänge à 30 min, 150 – 180 U/min). Vor diesem Zerkleinerungsschritt wurden enthaltene Metallreste wie Drähte oder kleine Federn aus den Proben entfernt. Einige Metallreste wurden erst durch das Mahlen freigelegt und zusammen mit Rückständen, die sich nicht zerkleinern ließen, entnommen.

Zur Analyse der Elementgehalte in den ungesiebten Wochenmischproben wurde eine Teilprobe entnommen, getrocknet und durch einen Backenbrecher vorzerkleinert. Anschließend erfolgte die Mahlung auf Analysenfeinheit in der Planeten-Schnellmühle.

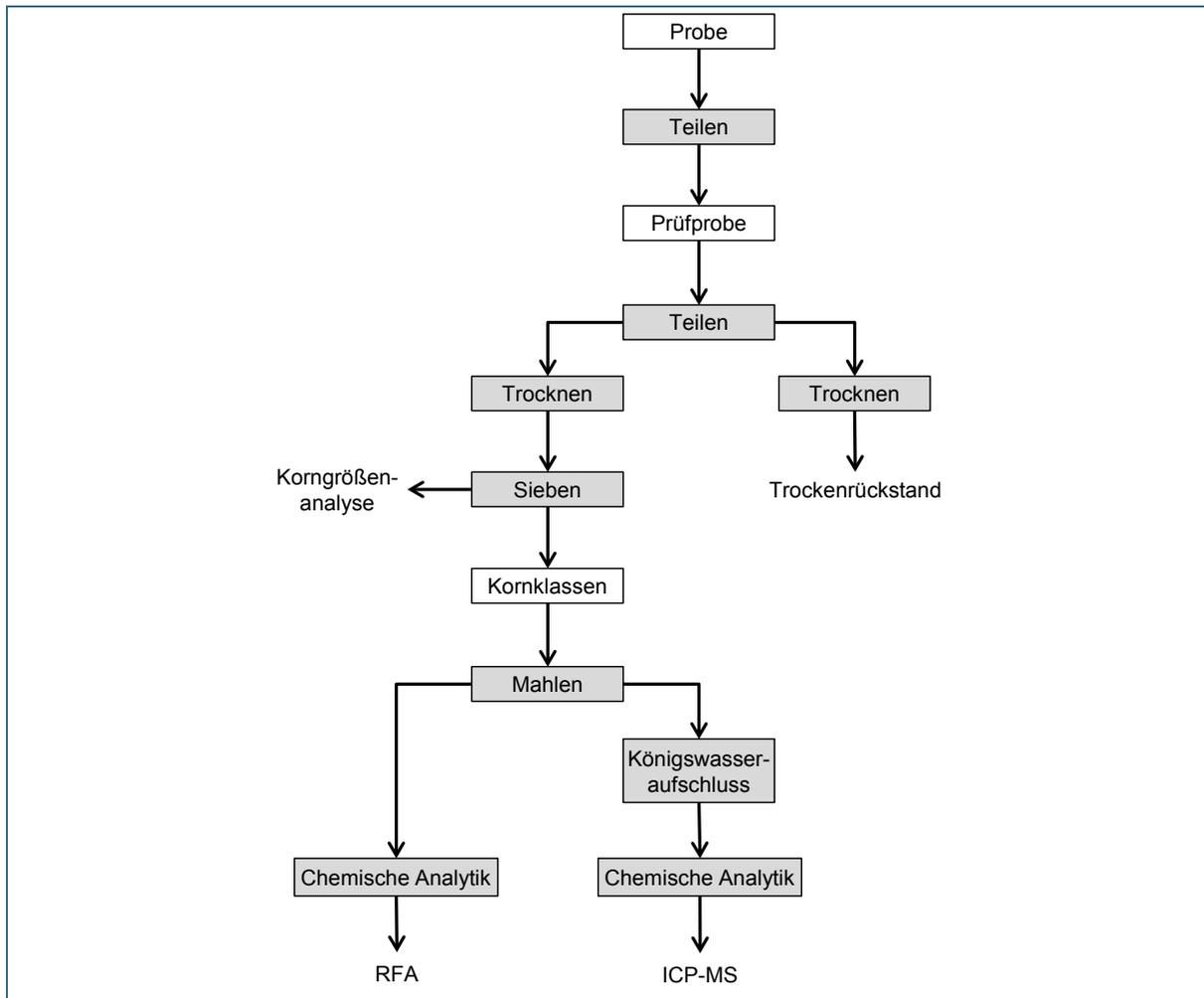


Abb. 8: Aufbereitungsgang zur Gewinnung der Analysenproben für die chemische Analytik (RFA: Röntgenfluoreszenzanalyse, ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma)

5.3 Physikalisch-chemische Analysen

5.3.1 Grundcharakterisierung (Trockenrückstand, Korngrößenverteilung)

Trockenrückstand

Zur Bestimmung des Trockenrückstands (Doppelbestimmung) wurde eine Probenmenge von mindestens 200 g der ungemahlten Proben (Wochenmischproben bzw. Tagesmischproben) 24 Stunden bei einer Temperatur von 105 °C im Trockenschrank getrocknet [64, 65]. Die Masse der getrockneten Probe ist die Trockenmasse, bezogen auf die Originalprobe ergibt sich der Trockenrückstand in Prozent. Die Umrechnung der Konzentrationsangaben von Trocken- auf Originalsubstanz erfolgte mit dem Mittelwert der Doppelbestimmungen.

Korngrößenverteilung

Für die Analyse der Korngrößen wurden Siebe mit den in DIN 18123:2011-04 [71] zur Untersuchung von Boden aufgeführten Maschenweiten 0,063 mm, 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 1,0 mm, 2,0 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm und 63 mm verwendet. Nach Trocknung der Proben wurden zwei Teilproben (je mindestens 500 g) gesiebt. Für die chemischen Analysen wurden die 12 Korngrößenfraktionen zu 5 Kornklassen zusammengefasst (siehe Tab. 2). Für die Analyse der beprobten Feinfraktio-

nen wurden die Kornklassen I und II und für die Analyse der Grobfractionen die Kornklassen IV und V zu jeweils einer Klasse I/II bzw. IV/V vereinigt.

Tab. 2: Einteilung der Kornklassen für die chemische Analytik

Kornklasse	Siebrückstände [mm]	Korngröße [mm]		
		Rohasche	Feinfraktion	Grobfraction
I	63 / 31,5 / 16	> 16	> 8	> 16
II	8	8 – 16		8 – 16
III	4 / 2,0	2 – 8	2 – 8	2 – 8
IV	1,0 / 0,5	0,5 – 2	0,5 – 2	< 2
V	0,25 / 0,125 / 0,063 / < 0,063	< 0,5	< 0,5	

5.3.2 Elementanalytik

Die Elementanalytik wurde möglichst an nicht-metallischen bzw. von Metallteilen freien Proben durchgeführt. Metallteile lassen sich mechanisch weder homogenisieren (nur Metallschmelze möglich) noch auf Analysenfeinheit zerkleinern, wie es die übliche chemische Umweltanalytik erfordert.

Königswasseraufschluss mit Massenspektrometrie

Dieses Analyseverfahren [72] dient der Bestimmung der in Königswasser löslichen Bestandteile der Probe. Von der gemahlene Probe wurden 3 g mit 21 mL HCl (37 Mass.-%) und 7 mL HNO₃ (65 Mass.-%) versetzt und zwei Stunden in einer Aufschlussapparatur unter Rückfluss am Siedepunkt gehalten. Anschließend wurde der Rückstand abfiltriert und das Filtrat auf 100 mL aufgefüllt. Der Aufschluss und die anschließende Analyse erfolgten als Doppelbestimmung. In dem Filtrat wurden mit einem Massenspektrometer (Modell 7500 cx, Fa. Agilent, Böblingen) mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) die mit diesem Verfahren analysierbaren Elemente bestimmt.

Durch das Königswasser werden die Proben in der Regel nicht vollständig aufgeschlossen. Einige Elemente (z. B. Silizium und Chrom) bilden in Königswasser schlecht lösliche Oxide und sind mit diesem Verfahren nicht analysierbar.

Röntgenfluoreszenzanalyse

Sämtliche Proben wurden zusätzlich mittels Röntgenfluoreszenz analysiert (RFA). Die Bestimmung der Elementgehalte erfolgte mit einem RFA-Spektrometer (Modell XEPOS plus, Fa. Spectro, Kleve). Dazu wurden aus den gemahlene Proben Presslinge hergestellt, um deren oberflächennahe Schicht zu untersuchen. Die Eindringtiefe des Röntgenstrahls in den Pressling liegt im ein- bis zweistelligen Mikrometerbereich, so dass die Homogenität der Probe eine wichtige Voraussetzung für diese eher halbquantitative Bestimmungsmethode ist.

Analysierte Elemente

Die in den Müllverbrennungaschen analysierten Elemente sind in Tab. 3 aufgelistet. Für die Mehrzahl der insgesamt 53 Elemente liegen Messwerte beider oben genannten Analyseverfahren vor. In der Tabelle ist für jedes Element das Bestimmungsverfahren angegeben, mit dessen Analysewerten die weiteren Betrachtungen und Hochrechnungen durchgeführt worden sind. Für die Auswahl war neben der Lage der Messwerte (z. B. kleiner Bestimmungsgrenze versus deutlich darüber) die langjährige Erfahrung bei der Analytik von Umweltproben maßgebend.

Tab. 3: Analyalisierte Elemente mit Nennung der zugehörigen Analysenmethode (RFA bzw. ICP-MS) für die weitere Ergebnisauswertung

Element	Analysemmethode		Element	Analysemmethode	
	RFA	ICP-MS		RFA	ICP-MS
Aluminium (Al)	x		Magnesium (Mg)	x	
Antimon (Sb)		x	Mangan (Mn)		x
Arsen (As)		x	Molybdän (Mo)		x
Barium (Ba)	x		Natrium (Na)	x	
Beryllium (Be)		x	Neodym (Nd)		x
Bismut (Bi)		x	Nickel (Ni)		x
Blei (Pb)	x		Niob (Nb)		x
Brom (Br)	x		Phosphor (P)	x	
Cadmium (Cd)		x	Platin (Pt)		x
Calcium (Ca)	x		Praseodym (Pr)		x
Cäsium (Cs)		x	Rubidium (Rb)		x
Cer (Ce)		x	Samarium (Sm)		x
Chlor (Cl)	x		Schwefel (S)	x	
Chrom (Cr)	x		Selen (Se)		x
Eisen (Fe)		x	Silber (Ag)		x
Erbium (Er)		x	Silizium (Si)	x	
Europium (Eu)		x	Strontium (Sr)	x	
Gadolinium (Gd)		x	Tantal (Ta)		x
Gallium (Ga)		x	Tellur (Te)	x	
Germanium (Ge)		x	Thallium (Tl)		x
Gold (Au)		x	Titan (Ti)	x	
Indium (In)		x	Vanadium (V)	x	
Kalium (K)	x		Wolfram (W)		x
Kobalt (Co)		x	Yttrium (Y)		x
Kupfer (Cu)		x	Zink (Zn)	x	
Lanthan (La)		x	Zinn (Sn)	x	
Lithium (Li)		x			

6 Probenahmekampagnen

6.1 Anlage I

Die Probenahme an der Anlage I wurde in der Woche vom 14. – 18.10.2013 durchgeführt. Die Probenahmestellen waren die beiden Bandabwürfe der Fraktionen < 6 mm (Feinfraktion) und 6 – 45 mm (Grobfraktion) des aufbereiteten Materials. Um einen repräsentativen Anteil des Materials zu gewinnen, wurde das Probenahmegefäß (Volumen: 5 Liter) einige Male quer zum Materialstrom durch den fallenden Stoffstrom bewegt, bis eine Probenmenge von zwei vollen 10-Liter-Eimern erreicht war. Die Abb. 9 zeigt die Probenahme der Fraktion 6 – 45 mm am Bandabwurf an der Anlage I.



Abb. 9:
Probenahme der Fraktion 6 – 45 mm an der Anlage I

Während der Probenahme war die im Verfahrensschema der Anlage gezeigte Prallmühle zur Zerkleinerung des Materials nach der Lesestation 1 (vergleiche Abb. 4) nicht in Betrieb.

Außerdem erfolgte die Materialaufgabe auf das 6 mm-Sieb nicht kontinuierlich, das heißt, zeitweise wurde ein Teilstrom des aufbereiteten Materials < 45 mm am Sieb vorbei direkt zum Abwurf der Fraktion < 6 mm geleitet. Durch diese Maßnahme können größere Aschekörner in der Feinfraktion enthalten sein. Laut Anlagenbetreiber geschieht dies aufgrund der schlechteren Trennleistung des Siebes bei hoher Feuchtigkeit des Materials: Ist die Asche zu feucht, wird der Feinanteil < 6 mm nicht ausreichend abgetrennt und gelangt vermehrt in die Grobfraktion. Ein zu hoher Anteil des feinen Materials beeinträchtigt die Verwertbarkeit der Aschefraktion.

Die Einzelproben wurden, wie bereits im Abschnitt 5.1 beschrieben, in eine magnetische, metallische und mineralische Teilfraktion getrennt. Die separierten magnetischen und metallischen Fraktionen wurden als Tagesmisch- bzw. -sammelproben (beide Größenfraktionen) ins Josef-Vogl-Technikum nach Augsburg transportiert. Die Wochenmischproben der magnetischen Teilproben wurden anschließend aus den jeweils 5 magnetischen Tagesmischproben einer Größenfraktion erstellt.

6.2 Anlage II

In der Woche vom 04. – 08.11.2013 fand die Probenahme an der Anlage II statt. Die Entnahme der Proben der aufbereiteten Müllverbrennungsasche erfolgte an den Transportbändern, die das Material aus der Aufbereitungshalle in eine Lagerhalle befördern (vergleiche Abb. 10). In einstündigem Abstand wurden pro Tag jeweils acht Einzelproben der Fraktionen < 16 mm sowie 16 – 32 mm gezogen. Die Probenahmeschaufel wurde mehrere Male quer durch den Stoffstrom bewegt, um die komplette Breite des Materials zu beproben. Die anschließende Sortierung der Proben (vergleiche Abschnitt 5.1) erfolgte in der Lagerhalle.

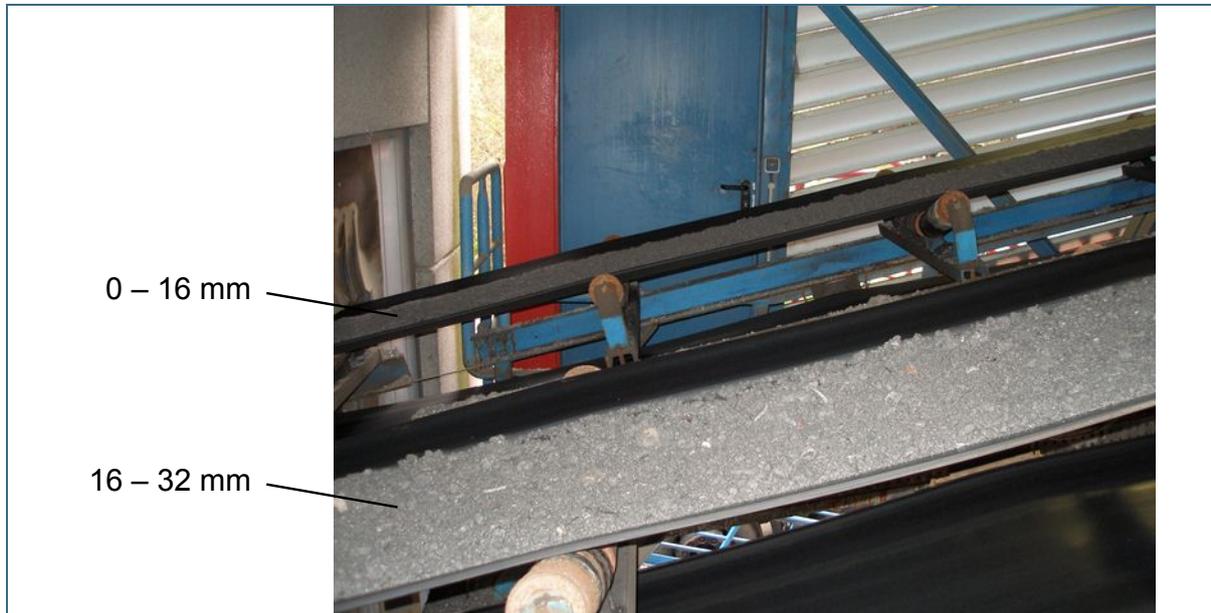


Abb. 10: Probenahmestellen an der Anlage II. Vorderes Förderband: Fraktion 16 – 32 mm, hinteres Förderband: Fraktion < 16 mm

Von dem magnetischen Anteil wurde am Ende jedes Tages eine Teilfraktion (5 Liter je Größenfraktion) als Tagesmischprobe abgetrennt. Weitere 5 Liter wurden für die Wochenmischprobe zurückgestellt. Am Ende der Probenahmewoche wurden diese 25 Liter komplett als Wochenmischprobe verwendet.

Im Fall der mineralischen Fraktion wurden am Ende des Tages ein Teil als Tagesmischprobe und ein Teil für die Wochenmischprobe (jeweils circa 20 Liter) separiert. Aus diesen Fraktionen wurden durch erneutes Kegeln und Vierteln die Wochenmischproben (circa 40 Liter) der beiden Größenfraktionen < 16 mm und 16 – 32 mm erzeugt.

Zur Bilanzierung der Massenströme der Schlackenaufbereitungsanlage fand am 13.11.2013 eine Leistungsfahrt statt. Die Beprobung des Inputs erfolgte am Förderband, das die Rohasche zur Schlackenaufbereitung transportiert, direkt vor der Aufgabe der Rohasche auf das erste Anlagensieb. Bei Rohasche handelt es sich um ein heterogenes Gemisch mit hohem Schrottanteil, der während des Aufbereitungsprozesses abgetrennt wird und daher im Output-Material fehlt. Das etwa 1 m breite Band wurde in einstündigem Abstand gestoppt und ein vorher definierter Bereich geleert (siehe Abb. 11). Aufgrund der Mengenschwankung des Inputs wurde eine Stelle als „Startpunkt“ für den Probenahmebereich festgelegt. Das nachfolgende Material wurde bis zu einer Probenmenge von etwa 10 Liter entnommen. Enthaltene große Schrottteile wurden direkt bei der Probenahme separat gewogen und anschließend wieder zum Materialstrom gegeben. Die entnommene Rohasche wurde ebenfalls gewogen und in 10-Liter-Eimern als stündliche Proben gesammelt.



Abb. 11:
Probenahme von Rohasche während der Leistungsfahrt an der Anlage II

Die Beprobung der Output-Ströme erfolgte an den gleichen Stellen wie bei der einwöchigen Probenahmekampagne. Alle Stunde wurden von jeder Fraktion Proben in 5-Liter-Eimer gefüllt. Während der Leistungsfahrt wurden acht Proben des Inputs und je acht Proben des Output-Materials entnommen.

6.3 Anlage III

In der Zeit vom 13. – 17.01.2014 wurde die Probenahme an der Anlage III durchgeführt. Aufgrund von Revisionsarbeiten war eine der vier Linien außer Betrieb. Nach Aussagen des Betreibers wurde der anfallende Müll komplett in den verbleibenden drei Ofenlinien verbrannt. Das Fehlen eines bestimmten Input-Stroms kann somit ausgeschlossen werden.

Beprobte wurde die anfallende Rohasche direkt am Abwurf des Nassentschlackers. Um einen Querschnitt des Materials der gesamten Anlage zu erhalten, wurden die vier Entschlacker der drei Linien abwechselnd beprobt: von Montag bis Donnerstag je ein Entschlacker; am Freitag wurde die Probenahmestelle nach je zwei Probenahmen gewechselt. Da die Rohasche heterogener als aufbereitete Müllverbrennungsasche ist, wurde die Menge der Einzelproben erhöht. Eine Holzkiste entsprechender Größe wurde auf den Gitterrost des Entschlackers gestellt, um die Rohasche aufzufangen (siehe Abb. 12). Mit Hilfe von Schaufeln und Haken wurde die abgeschreckte Asche gleichmäßig vom Entschlacker austrag abgestochen, da der automatische Austrag der Rohasche nur etwa alle 20 Minuten erfolgt und dabei teilweise sehr unterschiedlich große Mengen ausgetragen werden. Die entnommene Asche wurde anschließend in Wannen geschaufelt und zum Sortiertisch gebracht. Dort wurden zunächst große magnetische Schrottteile (z. B. Dosen, Rohre) entfernt und gewogen. Die restliche Probe wurde mit Hilfe des Handmagneten und durch optische Sichtung in eine magnetische, eine metallische und eine mineralische Teilprobe aufgetrennt. Die weitere Vorgehensweise erfolgte wie in Abschnitt 5.1 (vergleiche Abb. 6) beschrieben. Von der magnetischen und der mineralischen Teilfraktion wurden zunächst Tagesmischproben und anschließend je eine Wochenmischprobe erstellt.



Abb. 12:
Probenahme am Entschlackerabwurf der Anlage III

Zusätzlich konnten bei der Anlage III Proben von Rohasche trocken genommen werden. Einmal täglich wurde Asche vor dem Nassentschlacker entnommen und auf Metallblechen abgekühlt (siehe Abb. 13). Die Masse einer Einzelprobe betrug zwischen 18 und 34 kg. Insgesamt wurden an den fünf Tagen 130 kg Rohasche trocken genommen. Nach dem Abkühlen wurde die Rohasche trocken analog zur feuchten Asche aus den Nassentschlackern sortiert. Die abgetrennte magnetische Fraktion und die separierten Metallanteile wurden komplett mit ins Josef-Vogl-Technikum genommen; von der mineralischen Fraktion wurde eine Wochenmischprobe (circa 60 L) erstellt.



Abb. 13:
Rohasche trocken der Anlage III, zum Abkühlen ausgebreitet auf einem Metallblech

6.4 Anlage IV

Die einwöchige Probenahmekampagne an der Anlage IV fand vom 31.03. – 04.04.2014 statt. Beprobte wurden die beiden Output-Ströme der Aufbereitungsanlage: die Fraktion > 32 mm nach Abtrennung des Eisenschrotts sowie die Fraktion < 32 mm nach Abscheidung von Eisen sowie Nichteisenmetallen.

Der Abwurf des Materials < 32 mm nach der Aufbereitung erfolgt in einer Höhe von circa 6 m auf einen Schüttkegel (vergleiche Abb. 14). Zur Beprobung des gesamten Stoffstroms wurde das Förderband mit Hilfe eines Radladers um einige Meter verschoben und die Asche in einer Kunststoffwanne aufgefangen. Zur Probengewinnung der Fraktion > 32 mm wurde das herabfallende Material (vergleiche Abb. 15 linke Box) in der Schaufel eines Radladers (nicht dargestellt) gesammelt.



Abb. 14: Abwurf der Fraktion < 32 mm der Anlage IV



Abb. 15: Teil der Aufbereitungsanlage der Anlage IV

Über den Tag verteilt wurden von der Fraktion < 32 mm acht Einzelproben von je circa 20 kg genommen und in eine magnetische, metallische und mineralische Fraktion aufgetrennt. Aufgrund der Gegebenheiten vor Ort (Laufzeit der Anlage, verfügbares Material) wurden teilweise mehrere Einzelproben in kürzeren Zeitabständen entnommen. Insgesamt wurden circa 700 kg dieser Fraktion beprobt. Die Sortierung erfolgte analog zu den vorherigen Probenahmekampagnen. Von den magnetischen und mineralischen Anteilen wurden jeweils Tages- und schließlich Wochenmischproben (circa 40 kg) zur Untersuchung im Labor gebildet.

Im Fall des Grobmaterials > 32 mm erfolgte die Probenahme drei- bis viermal täglich. Aufgrund der Korngröße und Heterogenität des Materials wurde eine größere Menge beprobt (insgesamt etwa 1.200 kg). Aus dieser Fraktion wurden ebenfalls die magnetisierbaren Anteile mittels Handmagneten sowie die weiteren metallischen, nicht magnetischen Bestandteile separiert und gewogen. Zur weiteren Untersuchung wurde eine Wochenmischprobe (circa 60 kg) des verbleibenden mineralischen Materials generiert.

6.5 Anlage V

An der Anlage V wurde die Probenahmekampagne vom 12. – 16.05.2014 durchgeführt. Es erfolgt zwar eine Siebung der Rohasche bei 40 mm sowie eine anschließende Abtrennung von Eisenschrott aus den beiden Fraktionen. Jedoch war eine Probenahme dieser aufbereiteten Stoffströme aus Sicherheitsgründen nicht möglich. Deshalb wurde an der Anlage V die Rohasche beprobt. Die Proben wurden direkt am Nassentschlacker vor dem Abwurf auf ein Transportband mit Schaufeln entnommen (siehe Abb. 16). Von Montag bis Donnerstag wurde je einer der vier Entschlacker beprobt. Für die Beprobung des Entschlackers I war ein Podest nötig, das für einen Tag zur Verfügung stand. Daher konnte dieser Entschlacker am Freitag nicht mehr beprobt werden. Die Proben wurden lediglich aus den drei Entschlackern entnommen, die ohne Podest leicht zu erreichen sind.



Abb. 16:
Probenentnahme der
Rohasche an Anlage V

Die Rohasche wurde in Wannen geschaufelt und zum Sortiertisch transportiert. Dort erfolgte die Abtrennung von Grobschrott, dem magnetischen Anteil sowie den nichtmagnetischen (NE-)Metallen. Die erzeugten Wochenmischproben der magnetischen und mineralischen Fraktion sowie die Tagessammelproben der metallischen Fraktion wurden ins Josef-Vogl-Technikum transportiert.

6.6 Anlage VI

Die Probenahme an der Anlage VI fand nicht innerhalb einer Kalenderwoche statt. Aufgrund von Betriebsstörungen (Softwarefehler) an der Anlage konnten bei dem zunächst geplanten Termin im August 2014 nur an zwei Tagen Proben entnommen und sortiert werden. Die bis dahin generierten Tagesmischproben wurden luftdicht gelagert, bis daraus nach der zweiten Probenahme im September 2014 Wochenmischproben erzeugt wurden.

Beprobt wurden die aufbereiteten Stoffströme der Anlage: die Feinfraktion mit der Körnung < 4 mm und die Grobfraktion mit der Körnung 4 – 50 mm. Die Einzelproben wurden mit Hilfe eines Probenahmegefäßes aus dem fließenden Strom nach Abwurf auf einen Schüttkegel entnommen (vergleiche Abb. 17).



Abb. 17:
Probenahme der Grob-
fraktion an der Anlage
VI

7 Untersuchungsergebnisse und Bewertung³

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der sechs Probenahmekampagnen dargestellt. Die einzelnen Anlagen wurden mit Großbuchstaben anonymisiert. Die Einteilung der beprobten Ascheströme erfolgt nach der Ascheart: Rohasche (trocken oder feucht nach Nassentschlacker), Fein- und Grobfraction (nach Aufbereitung).

Bei der Anlage C ist auf folgende Besonderheit hinzuweisen: Die aufbereitete Asche > 32 mm, von der die Eisenmetalle abgetrennt wurden, entspricht einem Anteil von circa 9 Mass.-% der gesamt anfallenden Rohasche. Diese wird von einem externen Unternehmen weiter aufbereitet und im Folgenden nicht näher betrachtet. Die aufbereitete Asche < 32 mm wird aufgrund des relativ breiten Korngrößenspektrums zu der Kategorie der Rohaschen gezählt. Aus dieser Fraktion wurden vor der Probenahme bereits der enthaltene Eisenschrott durch zwei Magnetabscheider sowie Nichteisenmetalle durch einen NE-Abscheider entfernt.

Eine Zusammenstellung der Anlagen A bis F und Angabe der Fe-/NE-Abtrennung sowie der beprobten Aschenart gibt Tab. 4.

Tab. 4: Übersicht über die durchgeführte Ascheaufbereitung vor der Probenahme der Aschen an den Anlagen A bis F

Anlage	Fe-Abtrennung	NE-Abtrennung	Beprobte Aschenart
A	Nein	Nein	Rohasche trocken, feucht
B	Nein	Nein	Rohasche feucht
C	Ja	Ja	Rohasche feucht
D	Ja	Ja	Fein-, Grobfraction
E	Ja	Ja	Fein-, Grobfraction
F	Ja	Ja	Fein-, Grobfraction

7.1 Sortieranalysen

Nach den Probenahmen wurden die Einzelproben, wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, in die Anteile magnetisch, metallisch und mineralisch separiert. Im Fall der Rohaschen wurden magnetische Metallteile (Eisen) mit einer Größe ab etwa 50 mm separat erfasst und als „Grobschrott“ bezeichnet.

Die Zusammensetzung der untersuchten Rohaschen ist bezogen auf Originalsubstanz – auf Trockensubstanz siehe Anhang Tab. A-1 – anhand der Wochenmittelwerte in Abb. 18 dargestellt. Während die Rohasche der Anlage A einen Grobschrott-Anteil von 16,3 Mass.-% enthält, ergaben sich für die Rohasche der Anlage B circa 5 Mass.-% Grobschrott. Die maschinelle Abtrennung des Eisenschrottes bei der Aufbereitung an der Anlage C führt zu geringen Gehalten an Eisen. Während der magnetische Anteil bei den Anlagen A und C bei etwa 9 Mass.-% liegt, fällt er bei der Anlage B mit 12,4 Mass.-% höher aus. Auch bei den Nichteisen-Metallen zeigt sich die positive Wirkung der Ascheaufbereitung: Die Rohasche C enthält mit 0,23 Mass.-% deutlich weniger NE-Metalle (Fraktion metallisch) als die Aschen der Anlagen A und B.

³ Sämtliche Zahlenangaben sind jeweils für sich gerundet, so dass sich bei der Rechnung von gerundeten Zahlenwerten (Addition, Multiplikation) geringfügige Abweichungen zu den Textangaben ergeben können.

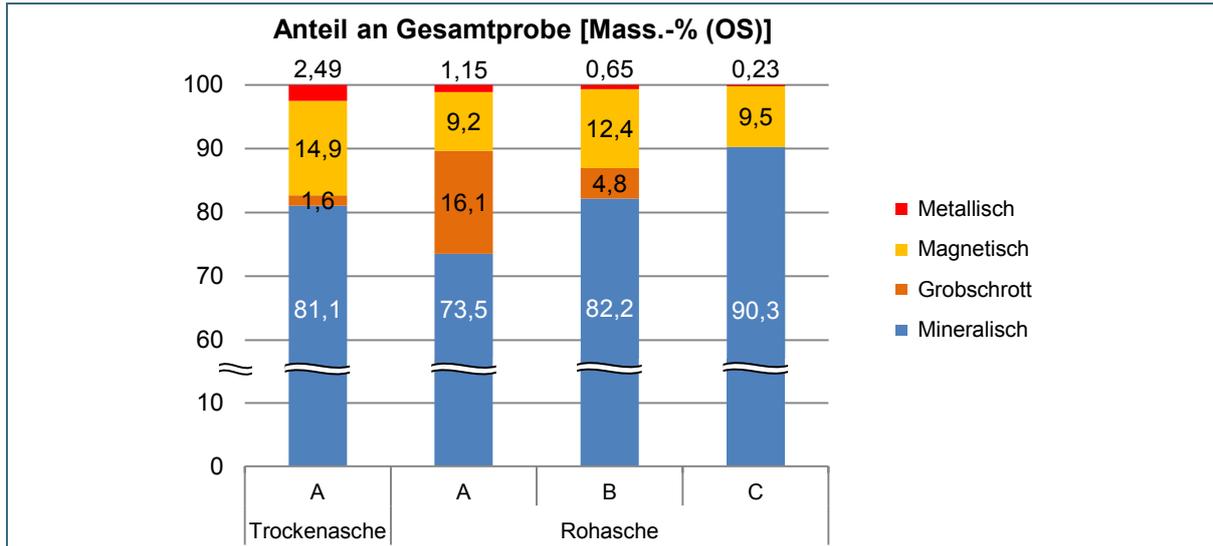


Abb. 18: Prozentuale Zusammensetzung der untersuchten Rohaschen (Wochenmittelwerte). Prozentwerte auf Originalsubstanz bezogen

Bei den Rohaschen (Anlagen A bis C) schwankte während der fünftägigen Probenahme die Aschezusammensetzung in den Hauptbestandteilen mineralisch und magnetisch um maximal 3,6 bzw. 15,2 % (relative Standardabweichung). Beispielhaft zeigt Abb. 19 den Verlauf der Aschezusammensetzung für die Anlage B in der Probenahmewoche.

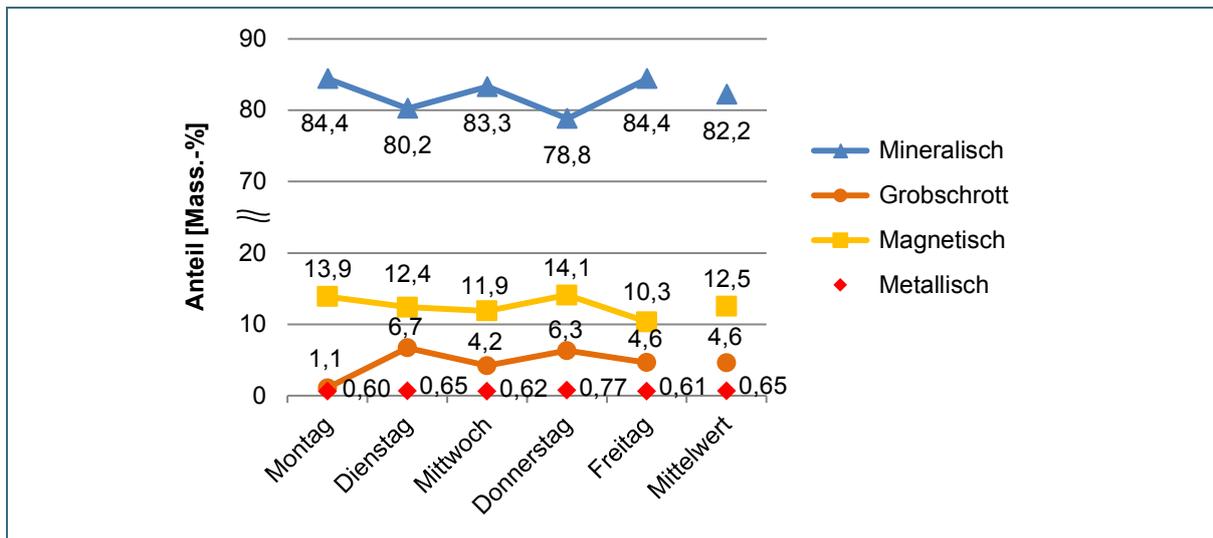


Abb. 19: Zusammensetzung der Rohasche der Anlage B in der Probenahmewoche

Stärkere Schwankungen wurden bei der untersuchten Rohasche trocken (Anlage A) beobachtet. Dies ist durch die Methode der Probenahme bedingt. Täglich konnte gegenüber den acht Einzelproben wie bei der Rohasche nur eine Probe der Rohasche trocken gezogen werden. Die Proben wurden infolge der beschränkten Zugänglichkeit des Feuerraums mit einer kleinen Schaufel entnommen, bevor die Asche in den Nassentschlacker fällt. Die ermittelten Werte dienen als Anhaltspunkte für trocken ausgetragene Rohaschen. Große, sperrige Bestandteile, wie etwa Metallteile, sind probenahmebedingt sicher unterrepräsentiert. Die Anteile an Grobschrott betragen bei diesen Proben durchschnittlich 1,6 Mass.-%, an magnetischen 14,9 Mass.-% und an metallischen Bestandteilen 2,49 Mass.-%. Aufgrund fehlender Anhaftungen sind in der Rohasche trocken Metallteile optisch leichter zu erkennen als in Rohascheproben nach Passieren des Nassentschlackers.

Der magnetische Anteil der Rohasche trocken wurde im Josef-Vogl-Technikum nachsortiert: Von der knapp 20 kg schweren Probe waren 4,5 Mass.-% Batterien und 8,9 Mass.-% Kronkorken. Die insgesamt 54 Batterien setzten sich aus 31 Stück Typ AA (66,9 Mass.-% der Batterien), 20 Stück Typ AAA (19,5 Mass.-% der Batterien) und jeweils ein Stück Typ C und D sowie einer Knopfzelle zusammen [73, 74]. Da der Anteil an magnetischen, nicht-metallischen Aschepartikeln weniger als 1 Mass.-% der Fraktion ausmachte, war zu wenig Material für weitere Analysen vorhanden. Somit liegt nur die Analytik der mineralischen Rohasche trocken vor.

Die Abb. 20 zeigt die Zusammensetzung der aufbereiteten Fein- und Grobfraktionen bezogen auf die Originalsubstanz. Die Tab. A-1 im Anhang enthält die Aschezusammensetzung bezogen auf die Trockensubstanz. Die magnetischen Anteile liegen in allen Aschen in einem schmalen Korridor zwischen 8,6 und 11,2 Mass.-%. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Gehalte an metallischen Bestandteilen (< 0,05 Mass.-%) in den Feinfraktionen gegenüber den Grobfraktionen um mindestens eine Größenordnung geringer sind. Bei den Grobfraktionen fällt auf, dass mit einem breiteren Kornspektrum (z. B. Anlage F) nicht zwangsläufig ein höherer „Rest“gehalt an NE-Metallen in den aufbereiteten Aschen einhergeht.

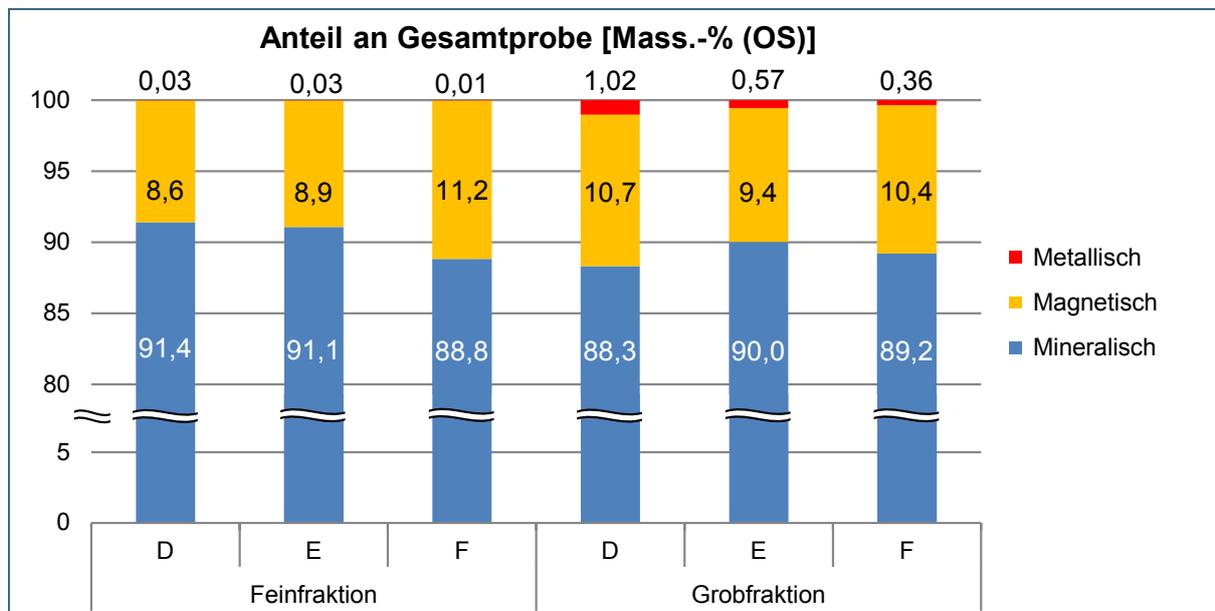


Abb. 20: Prozentuale Zusammensetzung der untersuchten Fein- und Grobfraktionen (Wochenmittelwerte). Prozentwerte auf Originalsubstanz bezogen

Bei den aufbereiteten Aschen traten bei den Hauptbestandteilen innerhalb der fünftägigen Probenahmen folgende Schwankungen (relative Standardabweichung, Maximalwerte) auf:

Feinfraktion: 1,4 % (mineralisch) und 14,7 % (magnetisch)

Grobfraktion: 1,6 % (mineralisch) und 12,7 % (magnetisch)

Am Beispiel der Anlage E ist der Verlauf der Zusammensetzung der Fein- und Grobfraktion in Abb. 21 dargestellt.

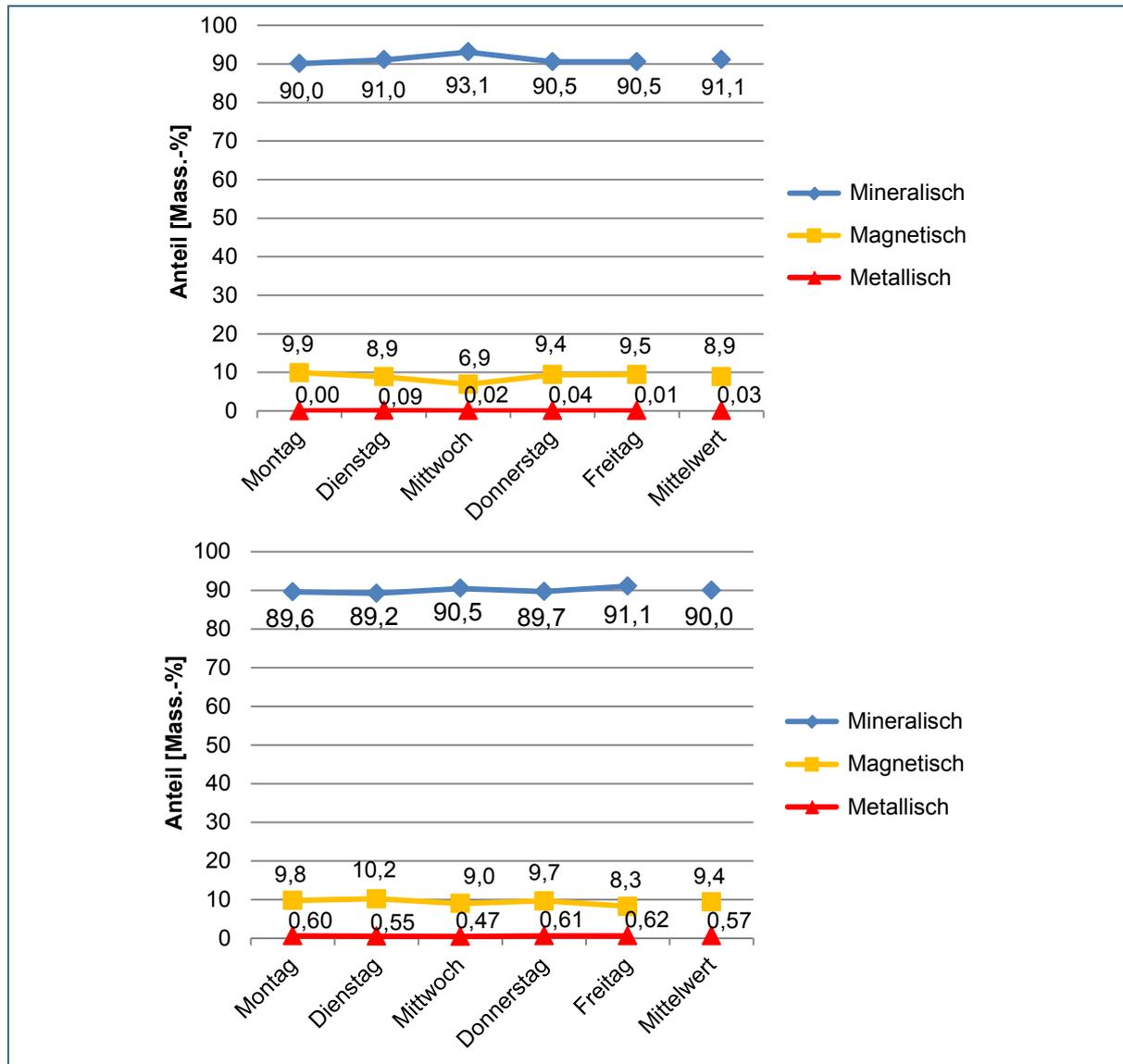


Abb. 21: Zusammensetzung der Fein- (oben) und Grobfraction (unten) der aufbereiteten Asche der Anlage E in der Probenahmewoche

Bei der Probenaufbereitung für die chemische Analytik wurden aus den magnetischen und mineralischen Teilproben die Metallstücke entfernt: Durch die Zerkleinerung der Aschepartikel wurden eingeschlossene Metallteilchen freigelegt und manuell aus den Proben abgetrennt. Die Tab. 5 zeigt die prozentualen Anteile der im Labor abgetrennten Metalle an den jeweiligen Teilproben. Darin enthalten sind sowohl erkennbare metallische Teile, wie z. B. Drähte und Federn, als auch Rückstände > 1 mm, die durch mehrmalige Mahldurchgänge nicht zerkleinert werden konnten.

In den magnetischen Teilproben sind neben Eisenteilen wie z. B. Nägel und Kronkorken auch magnetisierbare Aschepartikel enthalten. Erstere wurden vor dem Mahlen der Proben manuell entfernt. Ebenso sind in den mineralischen Teilproben in der Regel Metallpartikel enthalten, die bei der optischen Sichtung nicht erkannt werden konnten.

Tab. 5: Prozentualer Anteil der im Labor abgetrennten Metallteile an den mineralischen und magnetischen Teilproben. Angaben in Mass.-% (TS)

		Ascheart		Teilprobe	
				Mineralisch	Magnetisch
Anlage	A	Rohasche	Trocken	2,09	–
	A		Feucht	2,58	3,67
	B			4,93	3,54
	C			5,30	1,08
	D	Aufbereitete Asche	Feinfraktion	4,23	1,02
	E			4,00	0,50
	F			1,49	0,38
	D		Grobfraktion	6,42	3,39
	E			6,06	2,16
	F			4,68	1,10

7.2 Trockenrückstand

Die Trockenrückstände, vergleiche Tab. 6, wurden in den mineralischen und magnetischen Wochenmischproben vor Abtrennung der Metallanteile bestimmt.

Tab. 6: Trockenrückstände (in Mass.-%) der untersuchten Ascheproben

		Ascheart		Teilprobe	
				Mineralisch	Magnetisch
Anlage	A	Rohasche	Trocken	99,7	–
	A		Feucht	85,0	89,4
	B			86,2	90,7
	C			89,9	93,1
	D	Aufbereitete Asche	Feinfraktion	87,9	90,8
	E			89,3	91,5
	F			85,1	88,1
	D		Grobfraktion	91,9	94,2
	E			96,0	95,9
	F			92,9	95,2

Die mineralische Rohasche trocken der Anlage A weist mit 99,7 Mass.-% erwartungsgemäß den höchsten Trockenrückstand aller untersuchten Aschefraktionen auf. Die Trockenrückstände der weiteren mineralischen Ascheteilproben liegen zwischen 85,0 und 96,0 Mass.-%. Sie sind damit einige Prozentpunkte niedriger als die der entsprechenden magnetischen Teilproben (88,1 bis 95,9 Mass.-%). Die in der Regel hohen Metallgehalte der magnetischen Teilproben und die geringe Wasseraufnahme der Metallteile führen zu diesem Ergebnis. Bei den aufbereiteten Aschen weisen die Feinfraktionen niedrigere Werte für die Trockenrückstände als die Grobfraktionen auf. Aufgrund der größeren spezifischen Oberfläche der Feinfraktion – die spezifische Oberfläche ist indirekt proportional zum Korndurchmesser – kann sich an deren Partikeln mehr Feuchte anlagern.

7.3 Korngrößenverteilung

Wenn sich bei der Ascheaufbereitung an den Anlagen nach der Siebung bis zur Probenahmestelle weitere Aufbereitungsschritte oder anderweitige mechanische Belastungen des Kornmaterials (z. B. Abwurf vom Förderband) anschließen, ist damit in der Regel eine Verschiebung der Korngrößen in Richtung kleinere Kornklassen zu beobachten. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass die Asche durch den Kontakt mit Umgebungsluft Feuchte verliert und sich dadurch der Kornverband auflöst (z. B. Reduktion der Adhäsionskräfte). Das heißt, die Korngrößenverteilungen in den Ascheproben decken sich nicht mit den aus den Siebschnitten zu erwartenden Körnungsspektren. Vielmehr haben sich die Korngrößen in Richtung Feinkorn verschoben.

Die Korngrößenanalysen im Labor erfolgten an getrockneten Proben. Durch die mechanische Beanspruchung der trockenen Aschepartikel bei der Siebung werden Oberflächen freigelegt, wodurch sich das Kornspektrum in gewissem Umfang nochmals in Richtung kleinere Korngrößen verschiebt.

Die Abb. 22 zeigt die Korngrößenverteilung der Rohaschen (trocken, feucht) der Anlage A. Da die magnetische Teilprobe der trockenen Rohasche zum größten Teil aus stückigen Metallteilen bestand, konnte nur die mineralische Teilprobe analysiert werden. Die Korngrößenverteilung der trockenen ist der der mineralischen Rohasche (feucht) sehr ähnlich. Bei der magnetischen Rohasche (feucht) fallen die hohen Anteile der Größenfraktionen 16 – 31,5 mm und 31,5 – 63 mm auf. Diese beiden Fraktionen bestehen fast ausschließlich aus Eisenteilen.

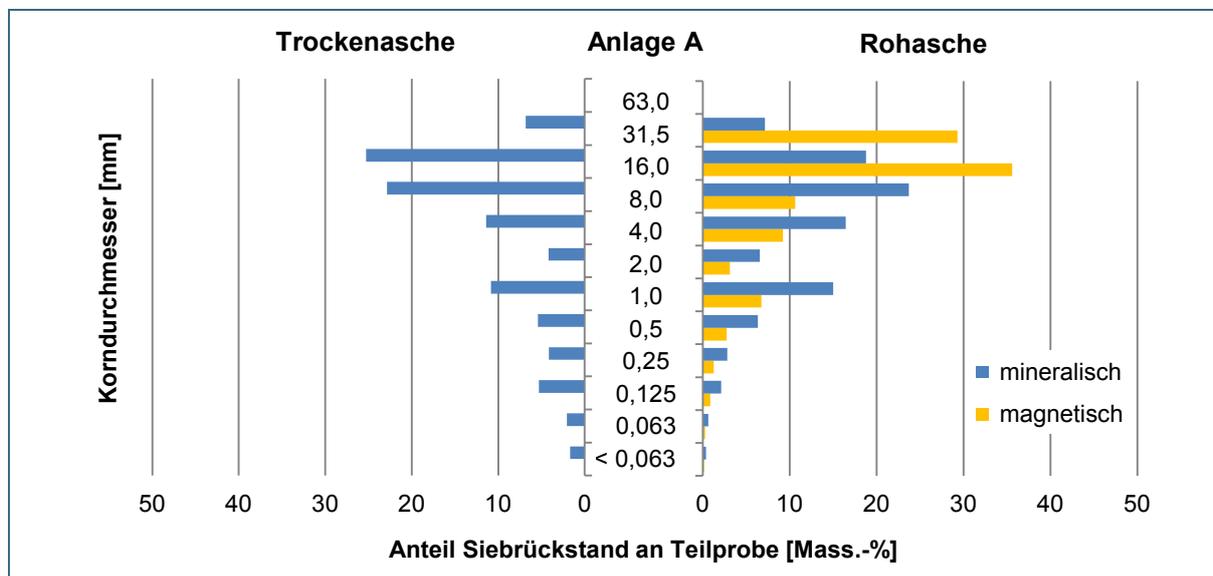


Abb. 22: Korngrößenverteilung der Trocken- und Rohasche der Anlage A

Der Verlauf der Korngrößen ist bei den Rohaschen der Anlagen B und C ziemlich ähnlich, vergleiche Abb. 23. In allen Rohaschen ist ein lokales Maximum von Partikeln mit einer Größe zwischen 1 und 2 mm zu beobachten. Der Anteil der Rohaschen, der kleiner als 2 mm ist, liegt zwischen 26,2 und 38,8 Mass.-%. Eine Ausnahme bildet die magnetische Rohasche der Anlage A, bei der diese Größenfraktion einem Anteil von 12,1 Mass.-% entspricht. Dies ist auf die hohen Anteile an Partikeln größer 16 mm zurückzuführen.

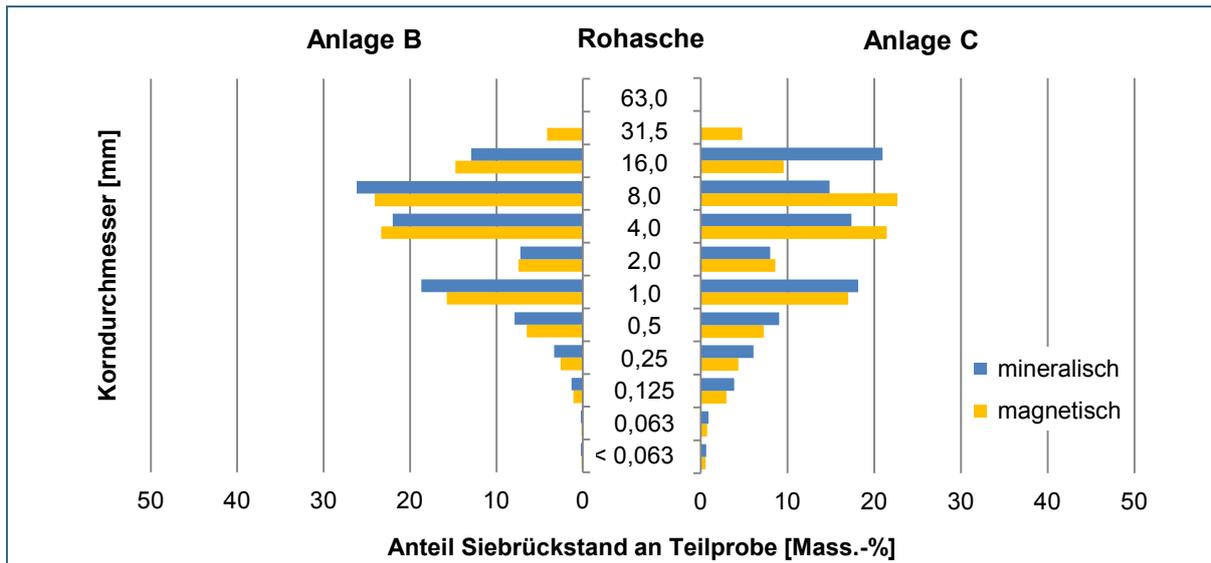


Abb. 23: Korngrößenverteilung der Rohaschen der Anlagen B und C

Die umseitige Abb. 24 zeigt die Korngrößenverteilungen der mineralischen und magnetischen Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D bis F.

Die Grobfraktion der Anlage D enthält trotz der Siebschnitte bei 16 und 32 mm einen erheblichen Anteil an Partikeln, die kleiner als 16 mm sind. Dieser beträgt circa 78 Mass.-% in der mineralischen sowie circa 66 Mass.-% in der magnetischen Teilprobe. Dies ist, wie bereits erwähnt, auf die mechanische Beanspruchung der Fraktion nach der Siebung während der Aufbereitung (Abtrennung von Eisen- und Nichteisenmetallen) sowie bei der Probenvorbereitung zurückzuführen. Der Anteil größer 16 mm an der Feinfraktion entspricht 0,6 bzw. 2,6 Mass.-%.

Bei den aufbereiteten Aschen der Anlage E ist die Verschiebung der Korngrößen in Richtung kleinerer Körnungen fast nicht gegeben. Dies ist darin begründet, dass der Siebschnitt bei 6 mm nach der Abtrennung von Eisen- und Nichteisenmetallen direkt vor dem Abwurf des Materials stattfindet. Die Grobfraktion (6 – 45 mm) enthält jeweils nur circa 1 Mass.-% an Aschekörnern, die kleiner als 4 mm sind. Da der aufbereitete Massenstrom während der Probenahme Woche nicht immer komplett auf das Feinsieb geleitet wurde, finden sich in der Feinfraktion auch Partikel mit einer Größe über 8 mm. Dieser Anteil beträgt circa 7 (mineralische Teilprobe) bzw. circa 8 Mass.-% (magnetische Teilprobe).

Die Feinfraktion der Anlage F enthält in der mineralischen bzw. magnetischen Teilprobe circa 1 bzw. 3 Mass.-% an Aschepartikeln > 4 mm. In der Grobfraktion beträgt der Anteil an Körnern kleiner als 4 mm circa 20 bzw. 22 Mass.-%. Im Aufbereitungsprozess dieser Anlage erfolgt die Siebung ähnlich wie bei Anlage D vor der Abtrennung von Eisen- und Nichteisenmetallen. Dadurch kommt es anschließend zu einer weiteren Zerkleinerung der Bestandteile bzw. zu einem Ablösen kleinerer Partikel durch mechanische Beanspruchung.

In allen untersuchten Feinfraktionen sowie der Grobfraktion aus Anlage D ist ein vergleichsweise hoher Anteil an Partikeln zwischen 1 und 2 mm enthalten. Dies wurde auch bei den Rohaschen festgestellt.

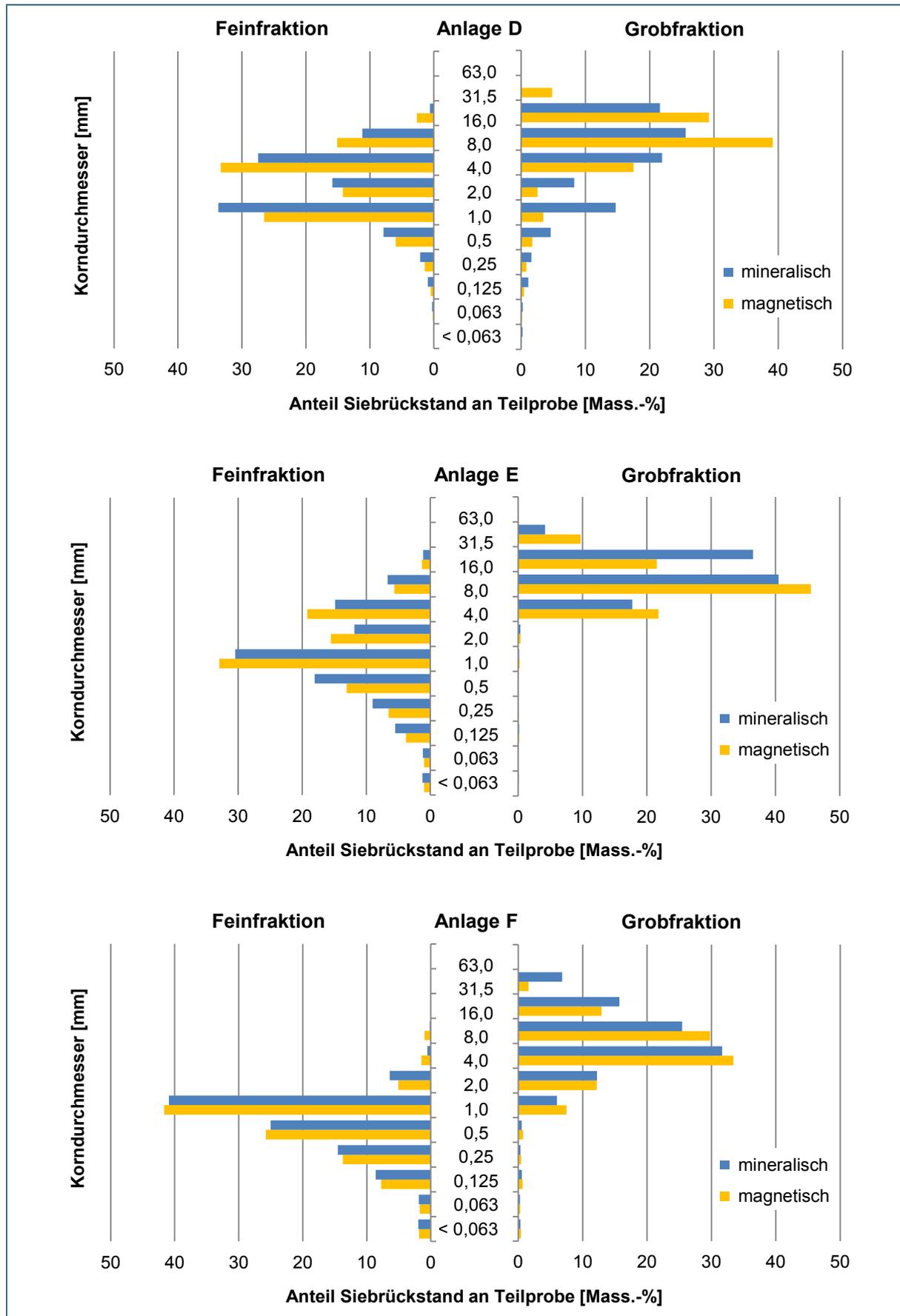


Abb. 24: Korngrößenverteilung der Fein- und Grobfractionen der Anlagen D, E und F

Nach Siebung der getrockneten Proben wurden die jeweiligen Größenfraktionen entsprechend Tab. 2 zu Kornklassen vereinigt, an denen die anschließende chemische Analytik stattfand. Die prozentuale Verteilung der Teilproben auf die Kornklassen zeigt Tab. 7.

Tab. 7: Verteilung der untersuchten Ascheproben auf die Kornklassen. Angaben in Mass.-% auf Trockensubstanz bezogen

		Ascheart		Korngröße	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
				Kornklasse	V	IV	III	II	I
Anlage	A	Rohasche	Trocken	Mineralisch	13,2	16,2	15,6	22,9	32,1
	A		Feucht	Mineralisch	6,0	21,3	23,0	23,7	26,0
				Magnetisch	2,6	9,5	12,4	10,6	64,9
	B			Mineralisch	5,1	26,6	29,2	26,2	12,9
				Magnetisch	4,0	22,2	30,8	24,1	18,9
	C			Mineralisch	11,5	27,2	25,4	14,9	21,0
				Magnetisch	8,6	24,3	30,1	22,7	14,4
				Korngröße	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
				Kornklasse	V	IV	III	I/II	
Anlage	D	Aufbereitete Asche	Feinfraktion	Mineralisch	3,4	41,6	43,3	11,8	
				Magnetisch	2,1	32,5	47,5	17,7	
	E			Mineralisch	16,9	48,5	26,7	7,8	
				Magnetisch	12,3	46,0	34,7	6,9	
	F			Mineralisch	26,9	65,9	6,9	0,1	
				Magnetisch	25,0	67,4	6,5	1,0	
				Korngröße	< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
				Kornklasse	IV/V		III	II	I
Anlage	D	Aufbereitete Asche	Grobfraktion	Mineralisch	22,5		30,2	25,6	21,6
				Magnetisch	6,7		20,0	39,2	34,1
	E			Mineralisch	0,7		18,1	40,5	40,7
				Magnetisch	0,7		22,2	45,5	31,3
	F			Mineralisch	8,0		43,9	25,4	22,6
				Magnetisch	10,1		45,6	29,8	14,5

7.4 Chemische Analysen (Einteilung nach Periodensystem)

Die chemischen Analysen wurden ausschließlich an gemahlten Proben durchgeführt: zum einen an den unfractionierten Wochenmischproben, zum anderen an den generierten Kornklassen (siehe Tab. 2). In den weiteren Abschnitten werden die Analysenergebnisse der einzelnen Elemente – geordnet nach der Zugehörigkeit zu den Gruppen im Periodensystem der Elemente – dargestellt und bewertet.

Die Anreicherung der Elemente in der mineralischen oder magnetischen Teilprobe wurde in den unfractionierten Wochenmischproben anhand der Elementgehalte c_{mineral} bzw. c_{magnet} untersucht.

Die Elementverteilung auf die Korngrößen wurde in den fraktionierten Proben wie folgt ermittelt: Aufteilung der Wochenmischproben auf die einzelnen Kornklassen und chemische Analyse der erhaltenen Fraktionen. Der Elementgehalt $c^{\text{Kornklasse } i}$ der in die i Kornklassen fraktionierten Gesamtprobe ergibt sich als Rechengröße aus der Summe der Produkte Massenanteile der mineralischen bzw. magnetischen Fraktion an der Kornklasse i $\xi_{\text{mineral } \vee \text{ magnet}}^{\text{Kornklasse } i}$ mit den Elementkonzentrationen in der mineralischen bzw. magnetischen Fraktion der Kornklasse i $c_{\text{mineral } \vee \text{ magnet}}^{\text{Kornklasse } i}$:

$$c^{\text{Kornklasse } i} = \xi_{\text{mineral}}^{\text{Kornklasse } i} \cdot c_{\text{mineral}}^{\text{Kornklasse } i} + \xi_{\text{magnet}}^{\text{Kornklasse } i} \cdot c_{\text{magnet}}^{\text{Kornklasse } i} \quad (1)$$

Angaben zu den Elementen ohne Literaturzitat – Häufigkeit in der 16 km dicken Erdkruste, Verwendung etc. – stammen aus RÖMPP Online [75] oder den Mineral commodity summaries 2015 des U.S. Geological Survey (USGS) [76]. Bei diesen Angaben ist zu beachten, dass es sich zumeist um Schätzwerte handelt.

In den folgenden Diagrammen sind neben den Elementgehalten auch die in dem LAGA Merkblatt M19 „Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle“ [31] enthaltenen so genannten Anhaltswerte für Schwermetalle (Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink) eingezeichnet. Letztere inklusive der Schwermetalle Arsen und Quecksilber, für die in [31] kein Anhaltswert genannt wird, sind bei den vierteljährlichen Probenahmen innerhalb der Qualitätskontrolle durch den Anlagenbetreiber zu bestimmen und zu protokollieren. Die in [31] genannten Zahlenwerte dienen als Anhaltswerte für die Eigenkontrolle.

In Bezug auf die Sekundärrohstoffgewinnung wesentlich wichtiger sind die Erzgehalte von abbauwürdigen Lagerstätten, mit denen die Metallgehalte in den Müllverbrennungssaschen konkurrieren. Die Erzgehalte wurden dankenswerterweise von der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) zur Verfügung gestellt [77].

Im Folgenden werden die Elemente dargestellt, bei denen durch den Verbrennungsprozess eine Anreicherung oder das Erreichen des LAGA-Anhaltswertes bzw. des Erzgehaltes erfolgt ist. Die Konzentrationen der weiteren Elemente sind im Anhang aufgeführt.

Bei den Ergebnissen der Rohasche trocken (Anlage A) handelt es sich aufgrund der Probenahmemethode um keine repräsentative Probe, vergleiche Abschnitt 7.1. Die magnetische Teilprobe der Rohasche trocken bestand hauptsächlich aus Metallteilen und wurde daher nicht analysiert, siehe Abschnitt 5.3.2. Daher fehlt in den Diagrammen der Elementgehalt der magnetischen Teilprobe der Rohasche trocken.

7.4.1 Gruppe 1: Kalium, Rubidium, Cäsium

Kalium

Kalium kommt in der Natur ausschließlich gebunden, das heißt nicht gediegen vor. Sein Anteil in der Erdkruste beträgt 2,41 %; es gehört zu den zehn häufigsten Elementen der Erdkruste (Rang 7). Kalium ist ein essenzielles Element für alle Organismen (Stoffwechselfvorgänge).

Metallisches Kalium wird technisch kaum eingesetzt. Die Weltproduktion mit 200 Mg/a ist gering und macht circa 0,1 % der Natriumproduktion aus. Kaliumverbindungen, vor allem Salze, finden in großen Mengen in Düngemitteln Einsatz.

Müllverbrennungaschen enthalten laut [35] zwischen 0,2 und 0,6 Mass.-% Kalium. Damit liegt der Kaliumgehalt in der Größenordnung von Phosphor und Schwefel [35].

In Abb. 25 ist die Anreicherung des Kaliums in den mineralischen Teilproben deutlich zu erkennen. Alle Werte der mineralischen sind höher als die der magnetischen Teilprobe. In der Grobfraktion der Anlage F liegt der gemessene Wert der mineralischen Teilprobe (Ausreißer) über den Gehalten der mineralischen Kornklassen (nicht dargestellt).

Bei der Verteilung der Kaliumgehalte auf die Kornklassen – Rohaschen siehe Abb. 26, aufbereitete Aschen siehe Abb. 27 – ist keine klare Tendenz festzustellen. Die Gehalte der Rohasche trocken sind, verglichen mit den anderen Rohaschen, relativ hoch. Grund dafür ist, dass es sich dabei um die Werte der mineralischen Teilproben handelt und Kalium – wie bereits beobachtet – in der mineralischen Teilprobe vermehrt auftritt. Bei den feuchten Roh- und bei den aufbereiteten Aschen verteilen sich die Kaliumgehalte relativ gleichmäßig über die Kornklassen. Die Werte liegen zwischen circa 7.500 und 14.000 Mg/(kg TS) (ohne die Rohasche trocken der Anlage A). Damit werden die Ergebnisse von DEIKE et al. [61] bestätigt.

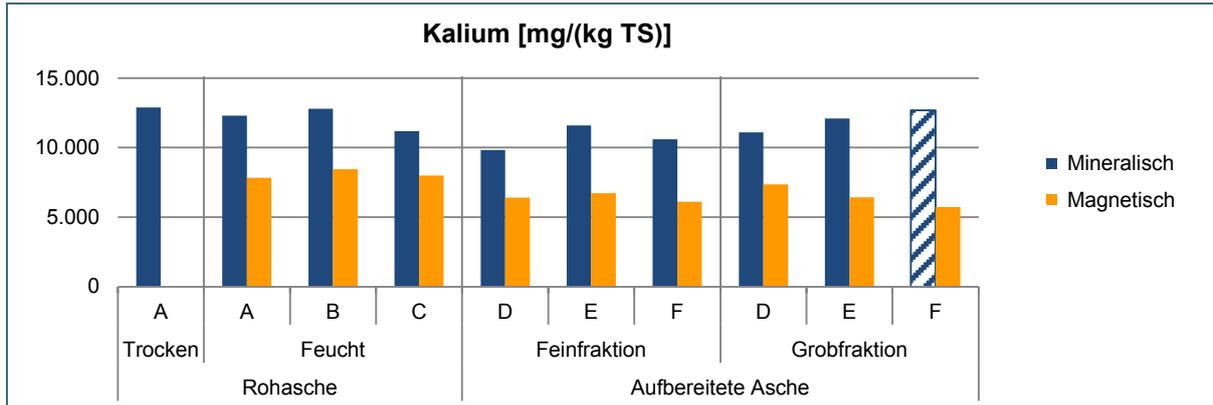


Abb. 25: Kaliumgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Schraffierte Säule: Ausreißer

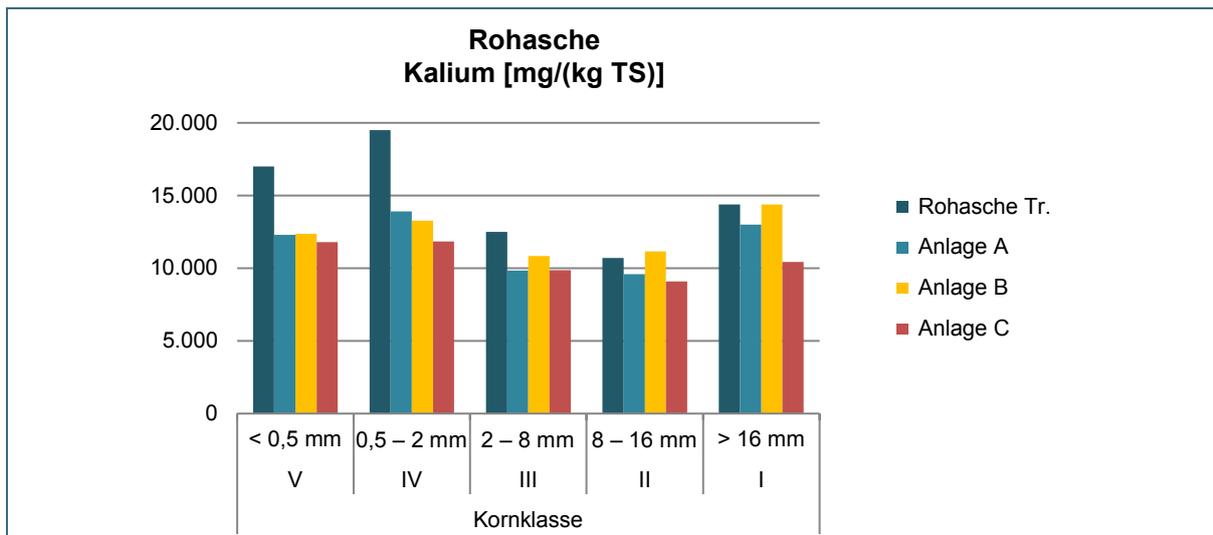


Abb. 26: Berechnete Verteilung von Kalium auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

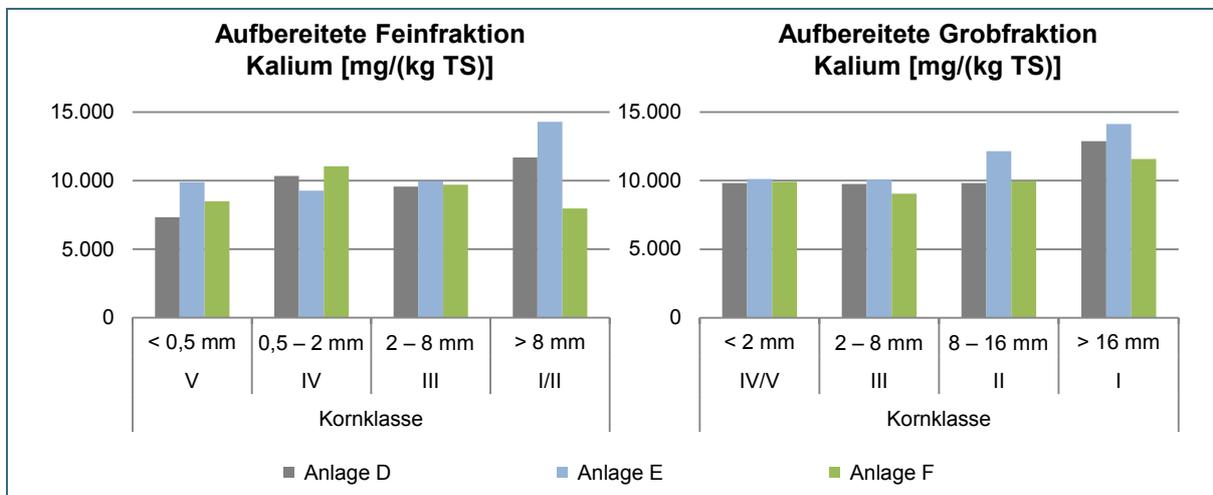


Abb. 27: Berechnete Verteilung von Kalium auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Rubidium

Das Leichtmetall Rubidium kommt in der Natur ausschließlich gebunden vor. Sein Anteil in der Erdkruste beträgt 0,09 ‰; es liegt an der 22. Stelle in der Häufigkeit des Vorkommens der Elemente.

Technisch wird metallisches Rubidium in der Halbleitertechnik, für Photokathoden und als Getter (chemisch reaktives Material zur Erhaltung eines Vakuums durch Reaktion bzw. Sorption von Gasmolekülen) in hochevakuierten Gefäßen (z. B. Röhren) benötigt. Rubidiumverbindungen finden z. B. in Arzneimitteln, Festkörperlasern und als Leuchtstoffe Verwendung.

Bei Rubidium ist wie bei Kalium eine Anreicherung in den mineralischen Teilproben festzustellen (siehe Abb. 28). Die höchste Rubidiumkonzentration wurde mit circa 13,5 mg/(kg TS) in der Rohasche trocken gemessen. Im Vergleich zu Kalium sind die Gehalte etwa um den Faktor 1.000 niedriger (vergleiche Abb. 25).

Rubidium ist in den untersuchten Rohaschen ähnlich wie Kalium über die Kornklassen verteilt.

Die Rubidiumgehalte der aufbereiteten Feinfraktionen zeigen praktisch keine Abhängigkeit von der Korngröße. Bei den aufbereiteten Grobfraktionen weisen die Kornklassen I und IV/V geringfügig höhere Gehalte als die Kornklassen II und III auf.

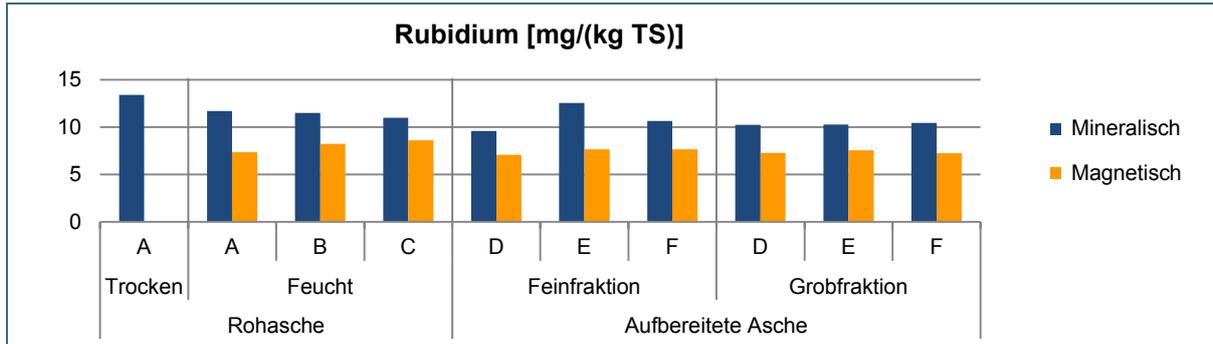


Abb. 28: Rubidiumgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

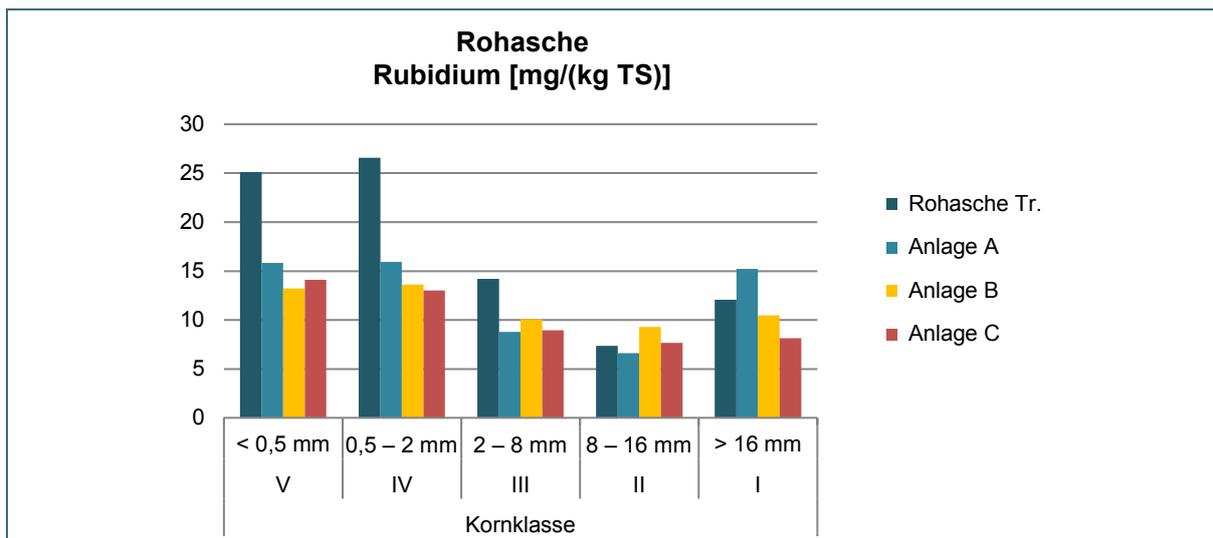


Abb. 29: Berechnete Verteilung von Rubidium auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

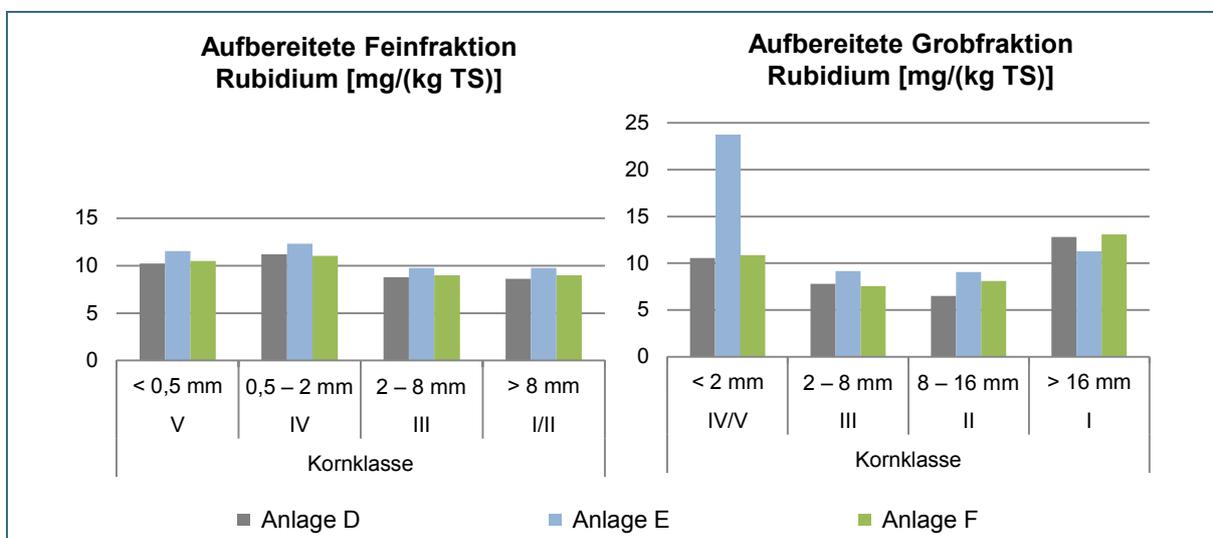


Abb. 30: Berechnete Verteilung von Rubidium auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Cäsium

Cäsium kommt nicht elementar, sondern ausschließlich in chemischen Verbindungen vor. Sein Anteil in der Erdkruste beträgt etwa 0,007 ‰; in der Häufigkeitsliste der Elemente liegt es um Platz 40 und gehört damit zu den selteneren Elementen.

Elementares Cäsium wird überwiegend für wissenschaftliche Zwecke eingesetzt. Daneben benötigt man die Substanz z. B. zur Herstellung von Photozellen, Gleichrichtern, Glühkathoden, als Gettermaterial (siehe Rubidium) und für Atomuhren.

Die Cäsiumgehalte sind in den mineralischen Teilproben (vergleiche Abb. 31) höher als in den magnetischen. Die Gehalte liegen in einem Bereich zwischen 0,6 und 0,9 mg/(kg TS) (mineralisch) bzw. zwischen 0,3 und 0,6 mg/(kg TS) (magnetisch).

Aufgrund der fehlenden Werte für die magnetische Teilprobe fallen die berechneten Konzentrationen der Kornklassen in der Rohasche trocken generell höher aus als in den feucht ausgetragenen Rohaschen (Ausnahme: Kornklasse V; vergleiche Abb. 32). Insgesamt unterscheiden sich die Konzentrationen in den verschiedenen Kornklassen kaum voneinander. In den Kornklassen IV und V (< 2 mm) wurde ein geringfügig höherer Cäsiumgehalt festgestellt als in den Kornklassen II und III (2 – 16 mm).

In den aufbereiteten Fein- und Grobfraktionen zeigt sich eine ähnliche Verteilung (vergleiche Abb. 33). Die Cäsiumgehalte sind in der Fraktion < 2 mm sowie in der Fraktion > 16 mm (Grobfraktion) minimal erhöht.

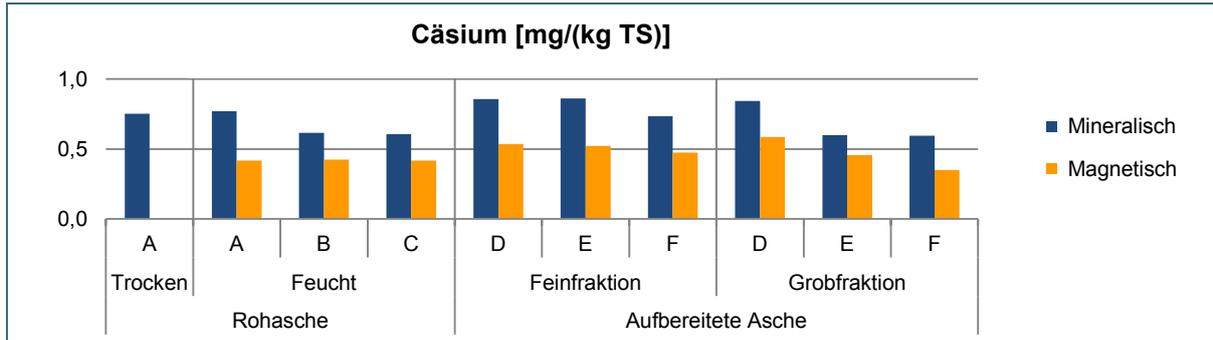


Abb. 31: Cäsiumgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

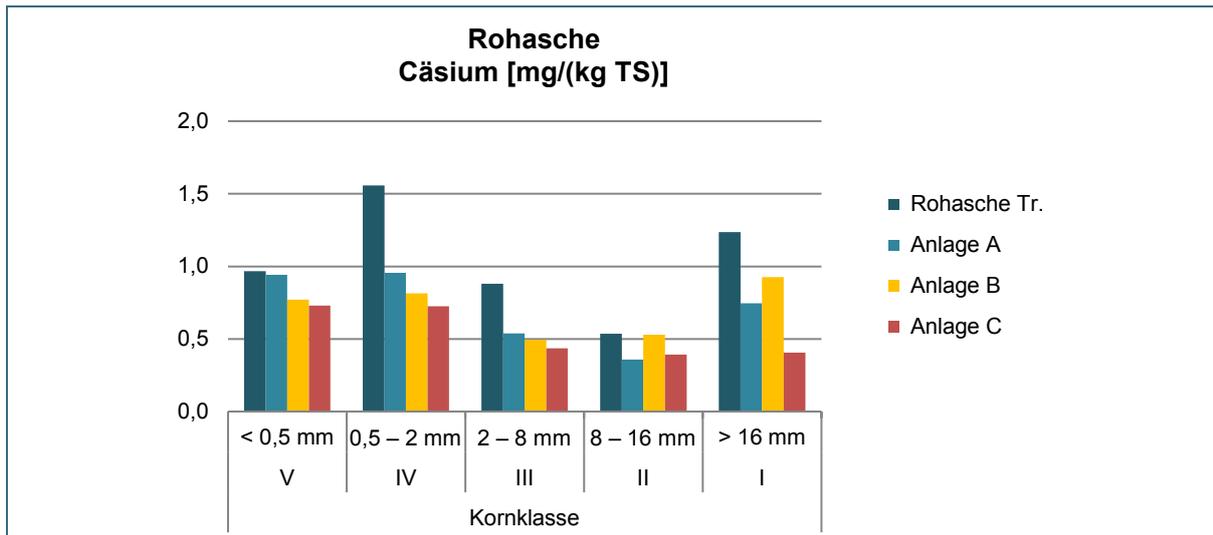


Abb. 32: Berechnete Verteilung von Cäsium auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

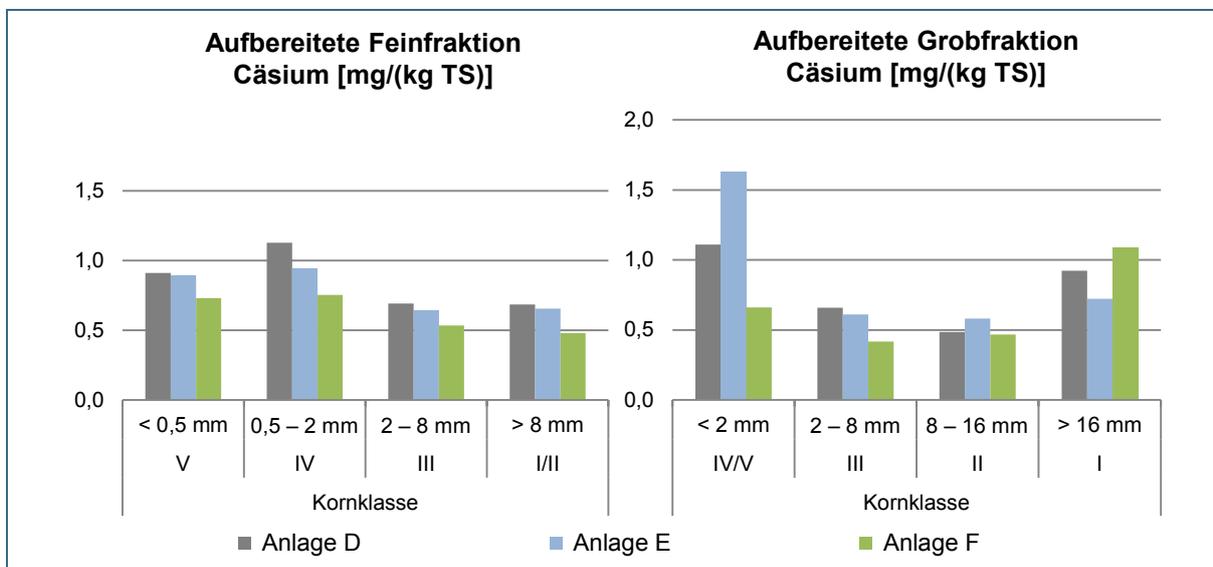


Abb. 33: Berechnete Verteilung von Cäsium auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

7.4.2 Gruppe 2: Magnesium, Calcium

Magnesium

Magnesium kommt aufgrund seiner hohen chemischen Reaktivität in der Natur in gebundenem Zustand vor allem als Carbonat, Silikat, Chlorid und Sulfat vor. Der Anteil von Magnesium an der Erdrinde beträgt 1,9 %. Damit liegt das Leichtmetall auf Platz 8 in der Häufigkeitsliste der Elemente.

Das Erdalkalimetall ist vielfach Bestandteil von Legierungen (Aluminium-Magnesium- und Magnesiumlegierungen), bei denen es vor allem auf ein geringes Gewicht ankommt, z. B. im Flugzeug- und Fahrzeugbau [3]. In der Metallindustrie findet es als Reduktionsmittel für die Titanherstellung Anwendung.

In Müllverbrennungsaschen ist Magnesium mit Gehalten zwischen 0,5 und 2,0 % enthalten [35]. Die Abb. 34 zeigt die Anreicherung von Magnesium in den mineralischen Teilproben. Die höchsten Konzentrationen wurden in der Feinfraktion der Anlage F festgestellt. Die Gesamtgehalte liegen in den mineralischen Teilproben zwischen 14.300 und 22.700 mg/(kg TS), in den magnetischen Teilproben zwischen 10.300 und 16.600 mg/(kg TS).

In den untersuchten Rohaschen (siehe Abb. 35) ist ein moderater Anstieg der Konzentration mit abnehmender Korngröße zu beobachten.

Bei den Fein- und Grobfraktionen der aufbereiteten Aschen fallen deutliche Unterschiede der Magnesiumkonzentrationen zwischen den drei beprobten Anlagen – Δ minimal 7 %, maximal 43 % – auf (siehe Abb. 36). Während in der Asche der Anlage E in jeder Kornklasse der geringste Gehalt gemessen wird, enthalten die Proben der Anlage F mit Ausnahme der Kornklasse I der Grobfraktion am meisten Magnesium.

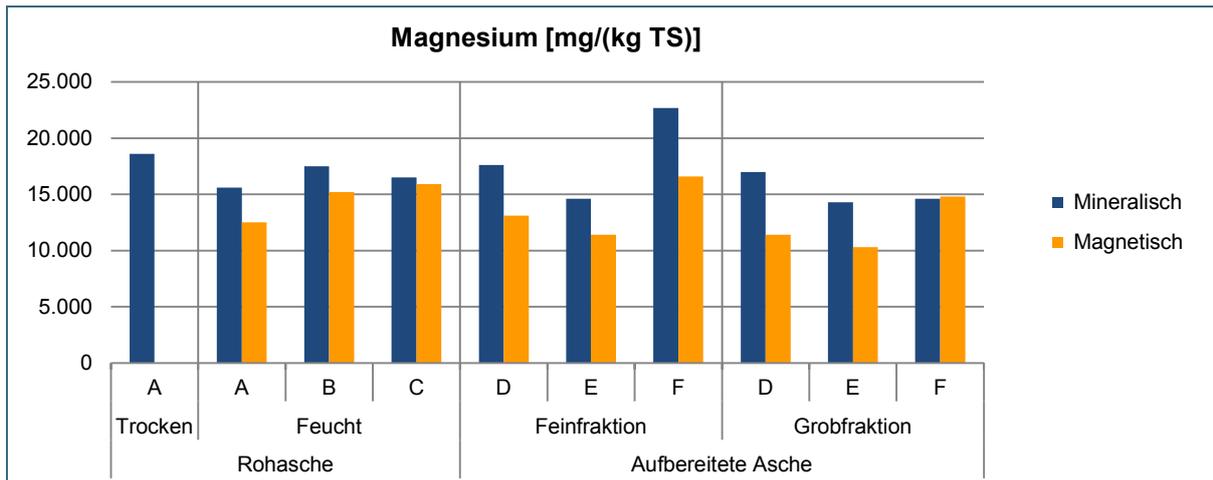


Abb. 34: Magnesiumgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

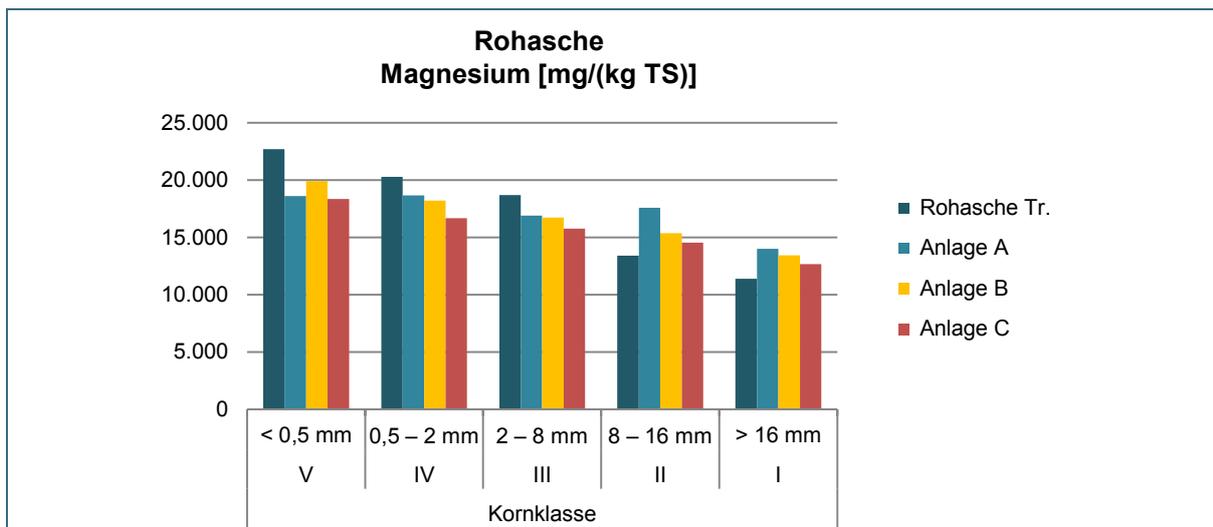


Abb. 35: Berechnete Verteilung von Magnesium auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

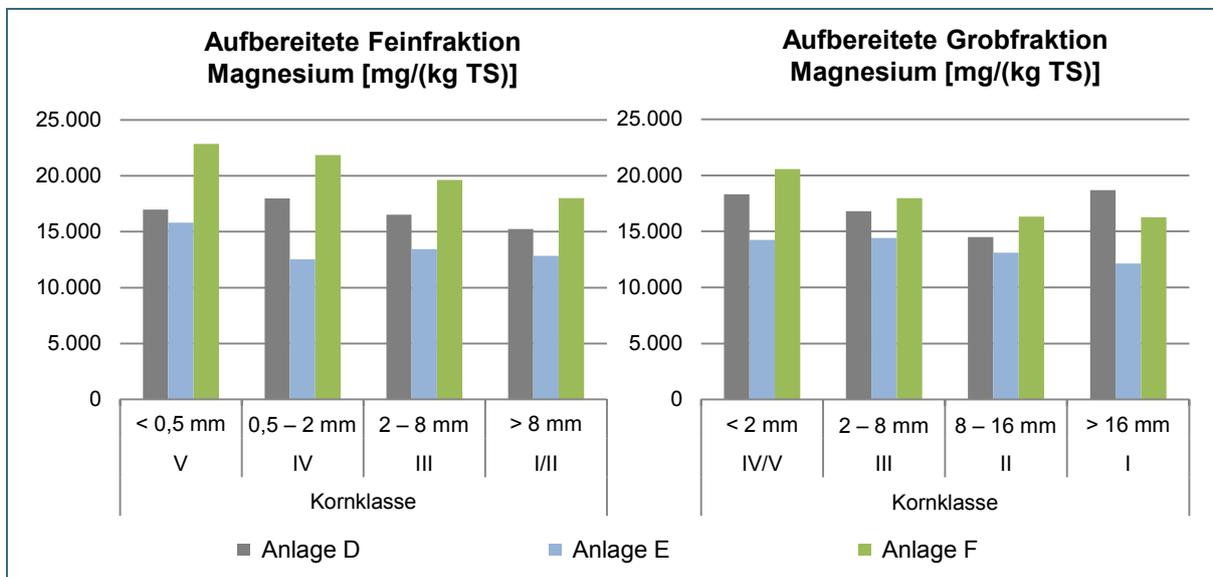


Abb. 36: Berechnete Verteilung von Magnesium auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Calcium

Calcium ist mit einem Anteil an der Erdrinde von 3,6 % das fünfthäufigste Element nach Sauerstoff, Silizium, Aluminium und Eisen. In der Natur liegt es gebunden in Form von Silikaten, Phosphaten, Carbonaten und Sulfaten vor. Diese Calciumverbindungen sind in Wasser schwer oder nicht löslich.

Calciumverbindungen werden vor allem in der Düngemittelindustrie benötigt, während der Einsatz von metallischem Calcium bei der Eisen- und Stahlherstellung von nachrangiger Bedeutung ist.

In fast allen Wochenmischproben – Ausnahme Anlage F Grobfraktion – ist die unterschiedlich stark ausgeprägte Anreicherung von Calcium in der mineralischen Teilprobe festzustellen (vergleiche Abb. 37). Die Gehalte der mineralischen Fraktion liegen zwischen 125.000 und 186.000 mg/(kg TS) und im Schnitt 15 % über den Werten der magnetischen Fraktion.

Sowohl in den Rohaschen (Abb. 38) als auch in den aufbereiteten Fein- und Grobaschen (Abb. 39) ist eine leichte Zunahme der Calciumkonzentration mit abnehmender Partikelgröße zu erkennen. Letzteren Sachverhalt bestätigen auch die Ergebnisse von [61].

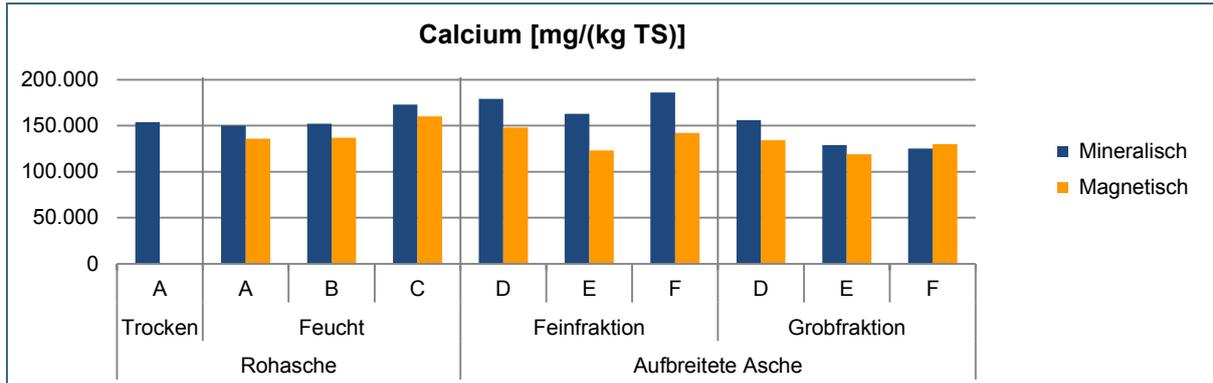


Abb. 37: Calciumgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

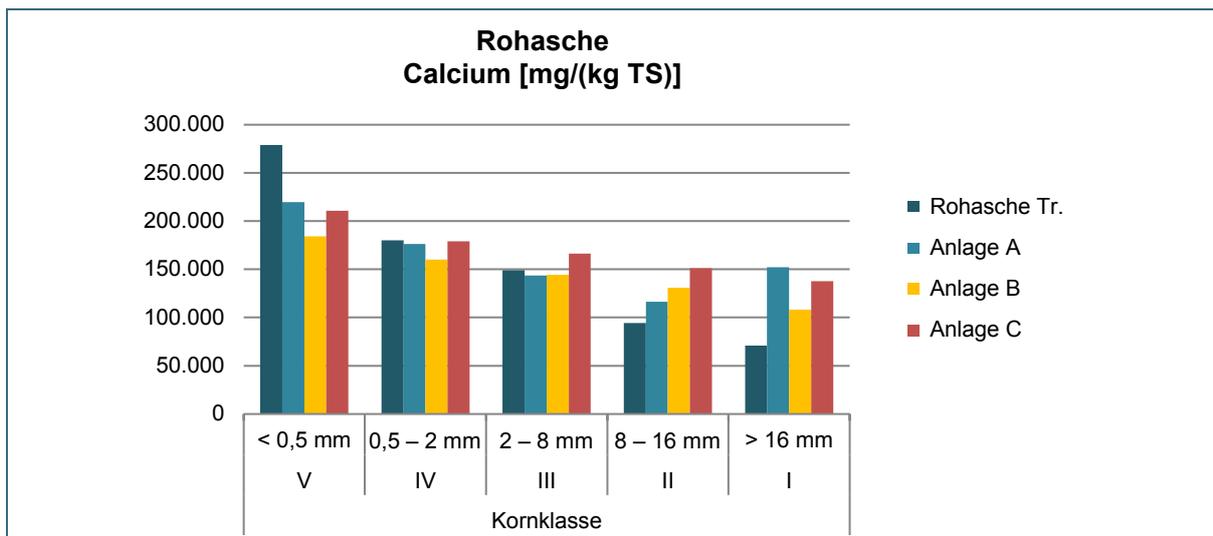


Abb. 38: Berechnete Verteilung von Calcium auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

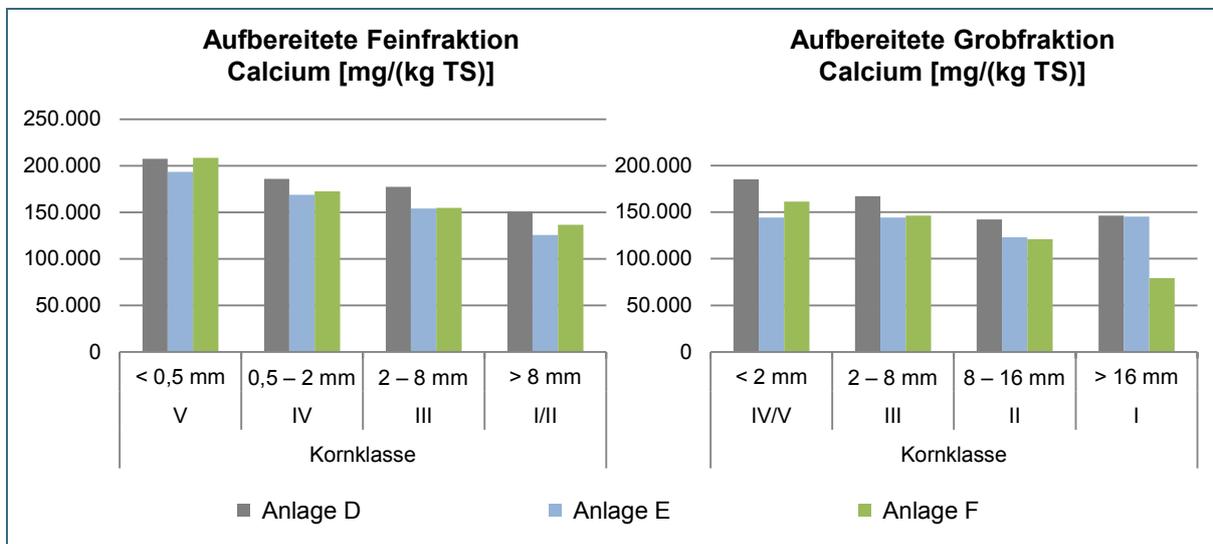


Abb. 39: Berechnete Verteilung von Calcium auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

7.4.3 Seltenerdmetalle: Praseodym, Neodym, Europium

Zu der Gruppe der 17 Seltenerdmetalle gehören drei Elemente der 3. Gruppe des Periodensystems (Scandium, Yttrium und Lutetium) sowie die so genannten Lanthanoide. Dies sind Lanthan und die 13 darauf folgenden Elemente bis einschließlich Ytterbium.

Die Seltenerdmetalle kommen in der Erdkruste vergesellschaftet als Oxide vor. Im Jahr 2013 wurden circa 110.000 Mg Metalloxide gefördert, wobei knapp 86 % aus China stammten [76].

Viele Seltenerdmetalle werden in Energiespartechnologien und Hightech-Produkten verwendet. Sie sind aktuell von großem wirtschaftlichem Interesse [3]. Sie werden z. B. für Leuchtmittel wie LCD-Bildschirmen, leistungsstarke Magnete (in Windkraftanlagen) und zur Herstellung von Spezialgläsern benötigt [78].

Insgesamt wurden neun Metalle aus dieser Gruppe analysiert (alle mittels ICP-MS). Auf die Analyseergebnisse der Elemente Praseodym, Neodym und Europium wird im Folgenden näher eingegangen. Die Ergebnisse der verbleibenden Metalle (Yttrium, Lanthan, Cer, Samarium, Gadolinium, Erbium) sind im Anhang zu finden.

Praseodym

Praseodym ist vor allem in den Mineralen Allanit, Bastnäsit und Monazit mit Cer vergesellschaftet. Die Häufigkeit in der Erdkruste beträgt 0,0052 ‰.

Praseodym wird in Legierungen für Dauermagnete und in Verbindungen als Farbstoff (zum Färben von Glas und Keramiken) verwendet.

In den meisten Proben fällt eine deutliche Anreicherung von Praseodym in den magnetischen Teilproben auf (siehe Abb. 40), was auf die magnetischen Eigenschaften dieses Elements zurückzuführen ist. Insgesamt liegen die Gehalte auf einem niedrigen Niveau im unteren einstelligen mg/kg-Bereich. Die Gehalte der magnetischen Teilproben schwanken relativ stark und können maximal 8 mg/(kg TS) erreichen. Für die magnetische Teilprobe der Rohasche der Anlage B (Ausreißer) wurde demgegenüber ein stark erhöhter Wert von 25 mg/(kg TS) gemessen.

Die Rohasche der Anlage A zeigt in den Kornklassen V bis III (< 8 mm) erhöhte Praseodymkonzentrationen, verglichen mit den anderen untersuchten Rohaschen (Abb. 41). Abgesehen davon ist das Element relativ gleichmäßig auf die Kornklassen verteilt. In der Rohasche trocken und der Rohasche der Anlage A liegen in der Korngröße 8 – 16 mm (Kornklasse II) die niedrigsten Konzentrationen vor.

In den aufbereiteten Fein- und Grobfraktionen ist ein leichter Anstieg der Praseodymgehalte in kleineren Korngrößen zu beobachten (Abb. 42, links). Die Werte liegen zwischen circa 2 und 5 mg/(kg TS) in den Feinfraktionen und zwischen circa 2 und 10 mg/(kg TS) in den Grobfraktionen.

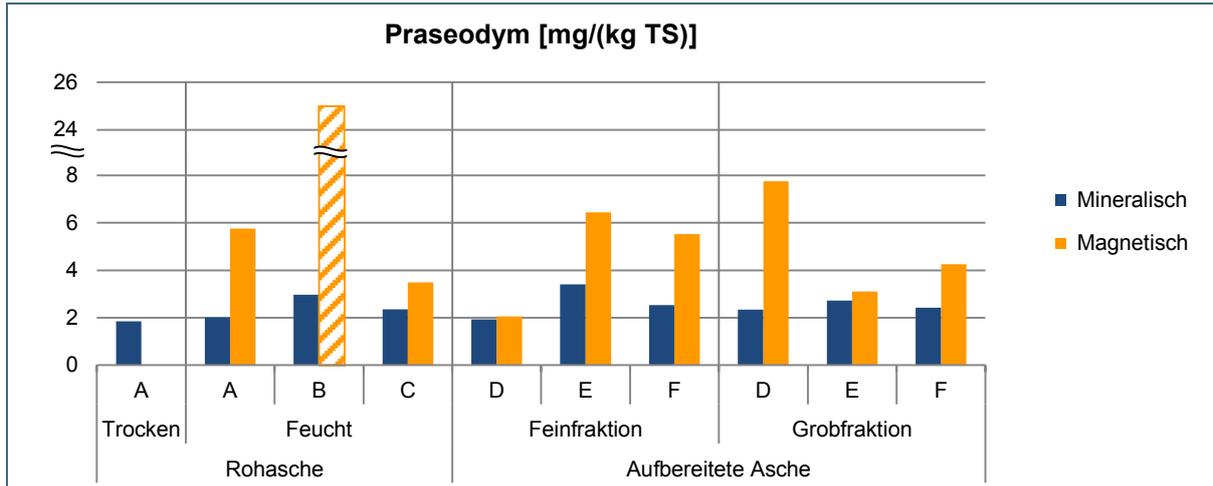


Abb. 40: Praseodymgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Schraffierte Säule: Ausreißer

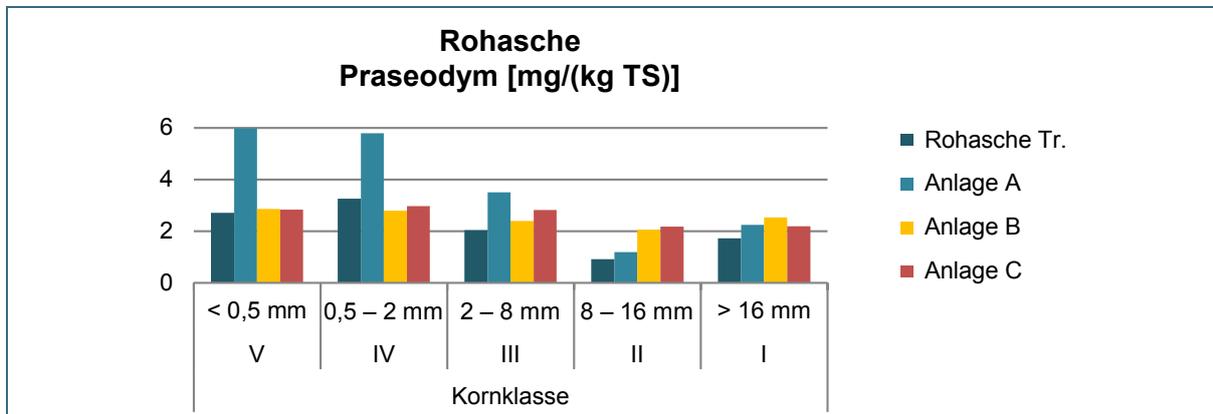


Abb. 41: Berechnete Verteilung von Praseodym auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

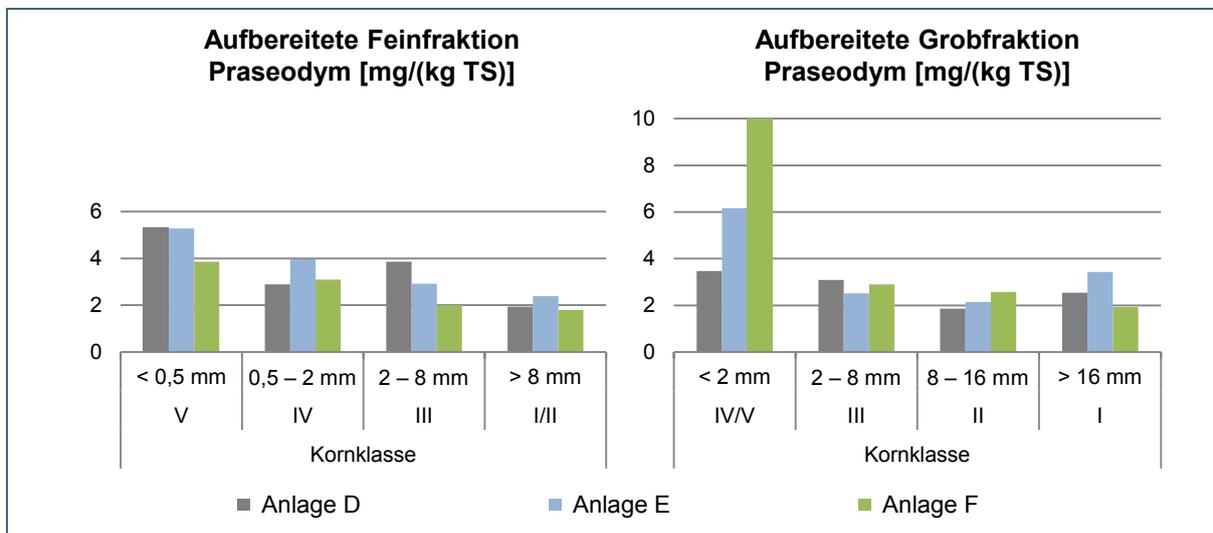


Abb. 42: Berechnete Verteilung von Praseodym auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Neodym

Neodym ist vor allem in den Mineralen Allanit, Bastnäsit und Monazit mit Cer vergesellschaftet. Die Häufigkeit in der Erdkruste beträgt 0,024 ‰.

Neodym ist ein wichtiger Werkstoff für Hochleistungsdauermagneten, die für Anwendungen in der Energieerzeugung (z. B. Windräder) benötigt werden. Neodymlaser finden in der Werkstoffbearbeitung, in der Vergütung von Metalloberflächen etc. Anwendung. Neodymverbindungen werden zum Färben von Emaille, Porzellan und Gläsern eingesetzt.

Die Studien [3, 79] stufen Neodym als einen Rohstoff ein, der in Zukunft knapp werden könnte.

In Abb. 43 sind die Gehalte der untersuchten Wochenmischproben der Anlagen A bis F dargestellt. Eine gewisse bis deutliche Anreicherung in den magnetischen Teilproben zeigt sich bei allen Anlagen. Die Gehalte liegen in den mineralischen Proben zwischen 7 und 14 mg/(kg TS), in den magnetischen zwischen 8 und 32 mg/(kg TS) (ohne den Ausreißer).

In den untersuchten Rohaschen (siehe Abb. 44) wurden die höchsten Neodymgehalte in den Kornklassen IV und V (kleiner 2 mm) ermittelt. Hin zu größeren Körnungen fallen die Konzentrationen leicht ab. Die niedrigsten Gehalte weist bei allen drei Anlagen die Kornklasse II (8 – 16 mm) auf.

In den aufbereiteten Feinfraktionen ist bei den Anlagen E und F eine Anreicherung zu kleineren Korngrößen festzustellen (siehe Abb. 45). Bei den Grobfraktionen fallen vor allem die hohen Werte in der Kornklasse IV/V bei den Anlagen E und F auf.

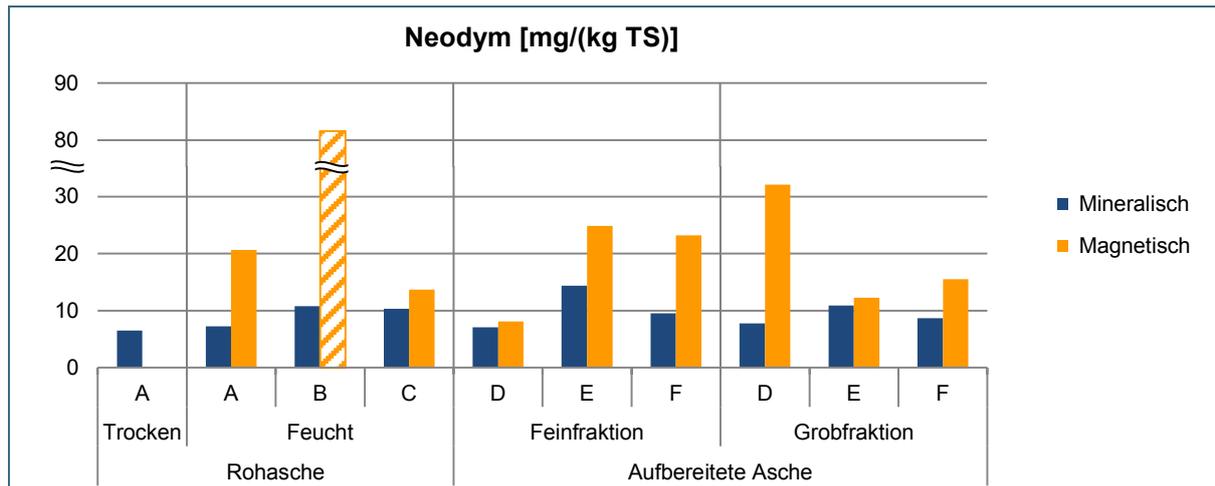


Abb. 43: Neodymgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Schraffierte Säule: Ausreißer

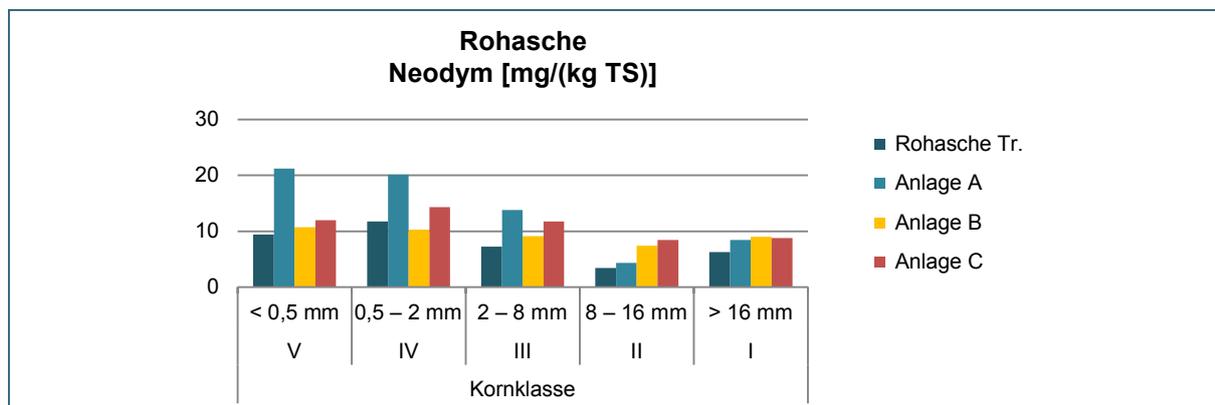


Abb. 44: Berechnete Verteilung von Neodym auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C.

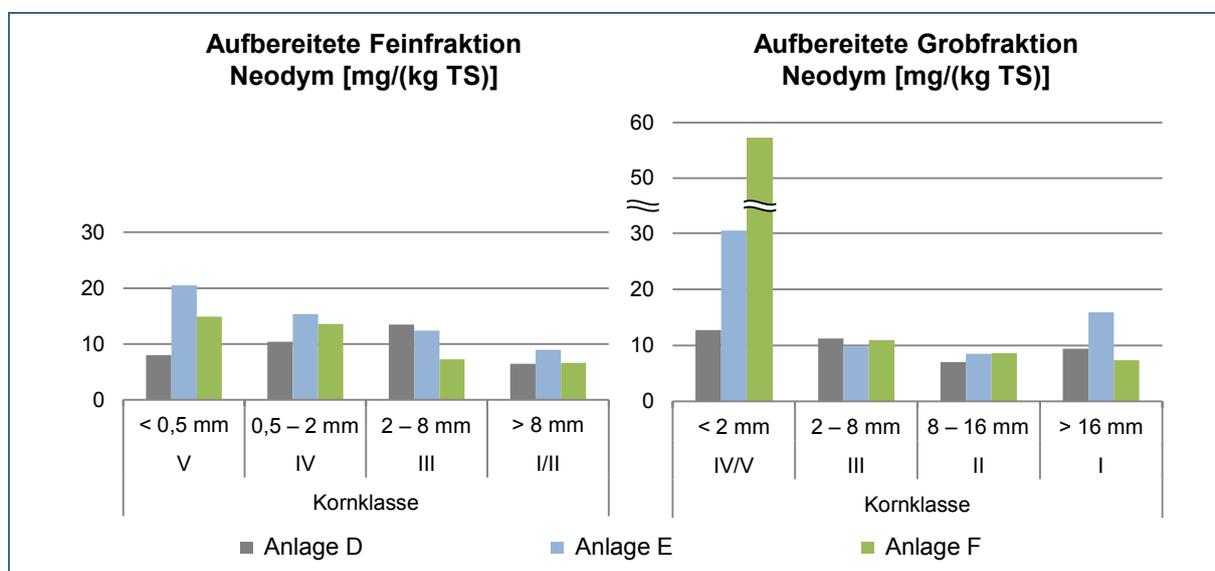


Abb. 45: Berechnete Verteilung von Neodym auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Europium

Europium ist nach Promethium das seltenste Metall der Lanthanoide. Sein Anteil in der Erdkruste beträgt 0,000099 ‰.

Europium wird in Leuchtstoffen als Aktivator verwendet, wie sie z. B. in Plasmabildschirmen enthalten sind. Auch findet es Anwendung als Absorber für Neutronen in der Kerntechnik.

Bei fast allen Anlagen enthalten die mineralischen Teilproben mehr Europium als die magnetischen, siehe Abb. 46. Dabei fallen die hohen Europiumgehalte in den Proben der Anlage D auf. Die Aschen der anderen Anlagen enthalten maximal 0,6 mg/(kg TS) Europium. Die Konzentrationen liegen in den mineralischen Teilproben zwischen 0,3 und 1,6 mg/(kg TS) und in den magnetischen Teilproben zwischen 0,3 und 0,9 mg/(kg TS).

Die Abb. 47 zeigt gegenüber den Kornklassen I und II leicht erhöhte Europiumkonzentrationen in den Kornklassen III bis V (< 8 mm). Der jeweils höchste Gehalt der feucht ausgetragenen Rohaschen wird in der Fraktion 2 – 8 mm gemessen.

Wie bei den Gesamtgehalten kommen für die Anlage D die erhöhten Gehalte auch in den fraktionierten Proben zum Ausdruck (vergleiche Abb. 48). Während die Proben der Anlagen E und F Europiumgehalte bis 0,6 mg/(kg TS) aufweisen und kaum Unterschiede zwischen Fein- und Grobfraktion vorliegen, erreichen die Werte bei Anlage D maximal 2,5 (Feinfraktion, Kornklasse IV) bzw. 1,7 mg/(kg TS) (Grobfraktion, Kornklasse III).

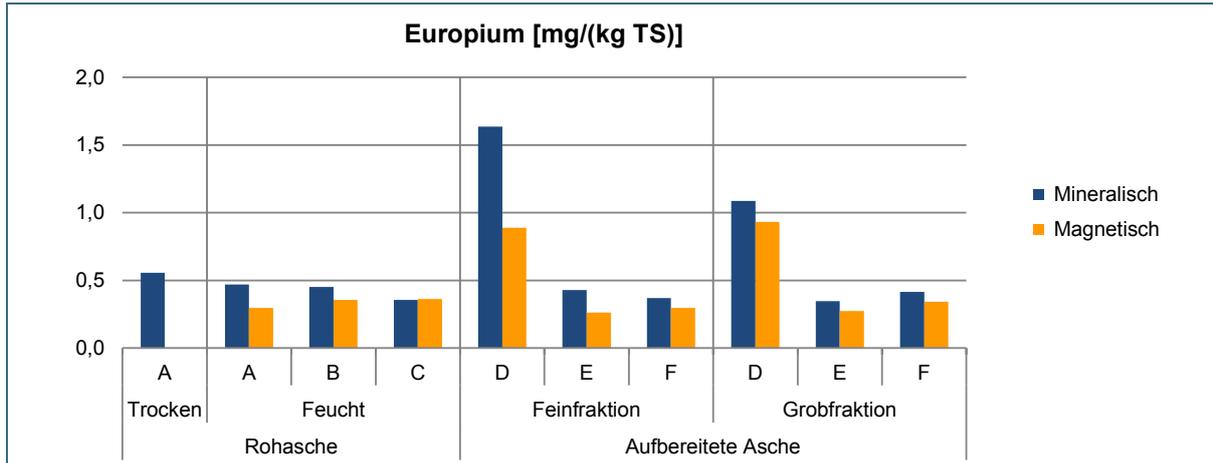


Abb. 46: Europiumgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

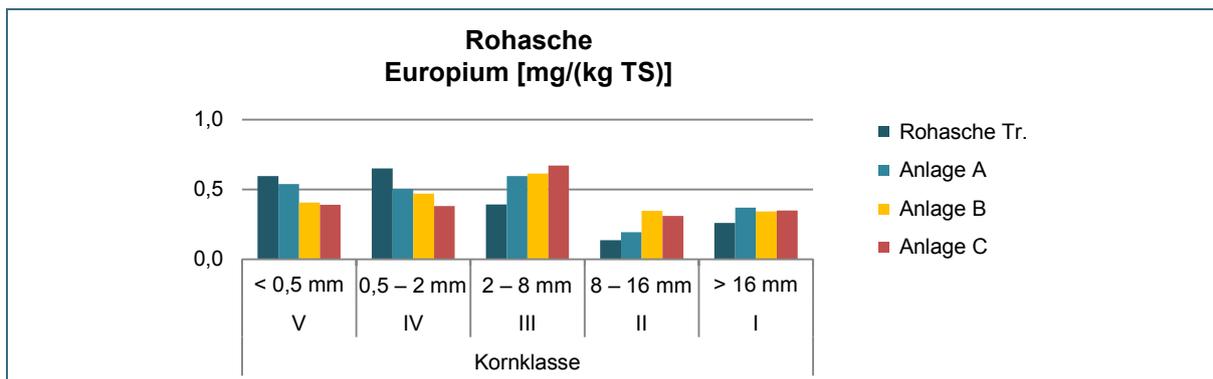


Abb. 47: Berechnete Verteilung von Europium auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B, und C

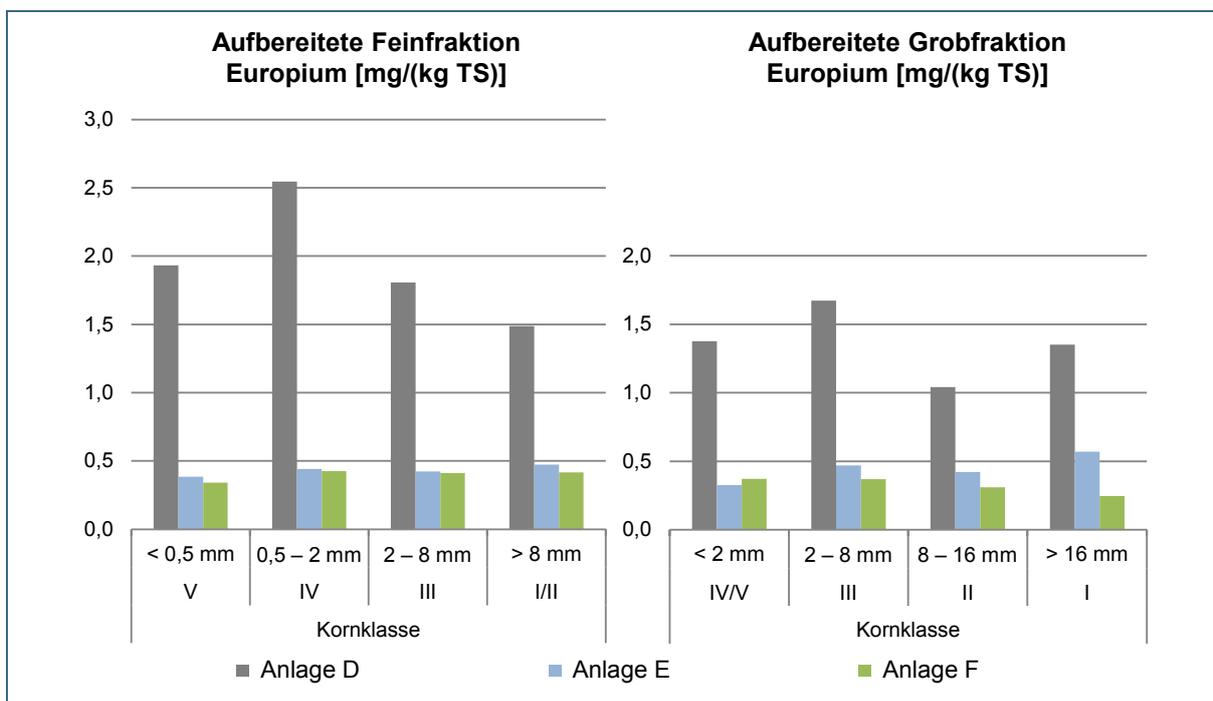


Abb. 48: Berechnete Verteilung von Europium auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

7.4.4 Gruppe 4: Titan

Titan ist neben Aluminium, Eisen und Magnesium eines der am häufigsten vorkommenden Metalle. In der Erdkruste beträgt der Titangehalt 5,6 %. Damit kommt es auf Rang 10 der häufigsten Elemente.

Die größten Vorkommen an Titan haltigen Mineralien wie Ilmenit, Rutil, Titanit und Eisenerzen findet man in China, Australien, Indien und Südafrika. Die Gehalte in Titanerzen liegen nach [77] bei rund 15 %. Die Produktion von Titan betrug im Jahr 2013 rund 209.000 Mg (ohne USA), wobei die Hauptproduktionsländer China (50 %), Russland (21 %) und Japan (20 %) waren.

Durch seine hohe Korrosionsbeständigkeit, niedrige Dichte und seinen geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten findet Titan nicht nur in der Luft- und Raumfahrttechnik, sondern auch in der Medizin (Implantate) vielfach Verwendung. Titanlegierungen werden vor allem im Apparatebau der chemischen Industrie verwendet. Titandioxid ist die Substanz, die als Farbpigment für das Weiß in der Keramik, dem Papier, den Kunststoffen und in der Zahnpasta verantwortlich ist.

Die Titangehalte der mineralischen und magnetischen ungesiebten Wochenmischproben der Anlagen A bis F sind in Abb. 49 dargestellt. Bei den nass ausgetragenen Aschen findet sich meistens in der mineralischen Teilprobe eine höhere Titankonzentration als in der magnetischen. Die Gehalte der Wochenmischproben liegen zwischen 5.500 und 9.000 mg/(kg TS).

In den Rohaschen der Anlage A (nass und trocken ausgetragen) zeigt sich ein Anstieg der Titankonzentrationen mit abnehmender Partikelgröße (vergleiche Abb. 50). Am wenigsten Titan ist jeweils in der Kornklasse II (8 – 16 mm) enthalten. Keine Abhängigkeit von der Korngröße ist in den Rohaschen der Anlagen B und C zu erkennen.

In den aufbereiteten Fein- und Grobfraktionen der Aschen aus den Anlagen D, E und F (vergleiche Abb. 51) ist Titan auf die einzelnen Kornklassen mit rund 6.000 mg/(kg TS) relativ gleichmäßig verteilt.

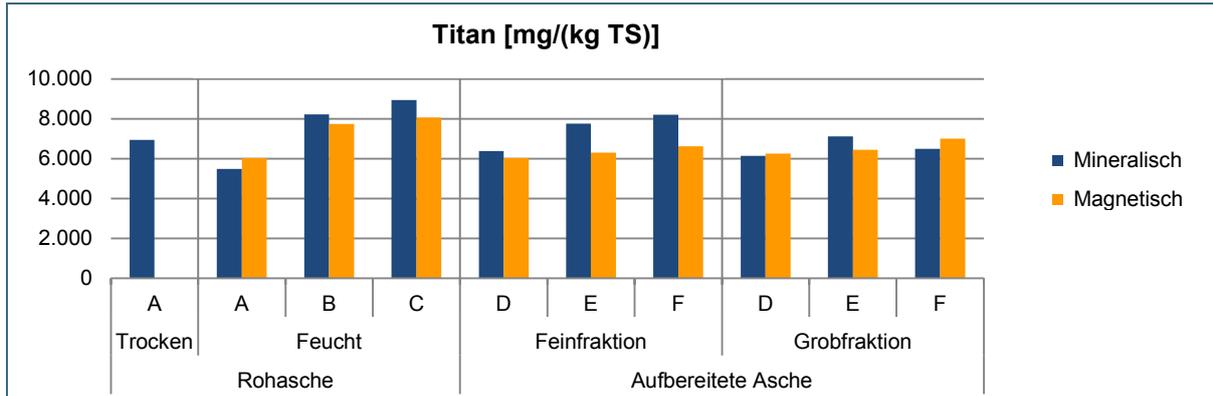


Abb. 49: Titangehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

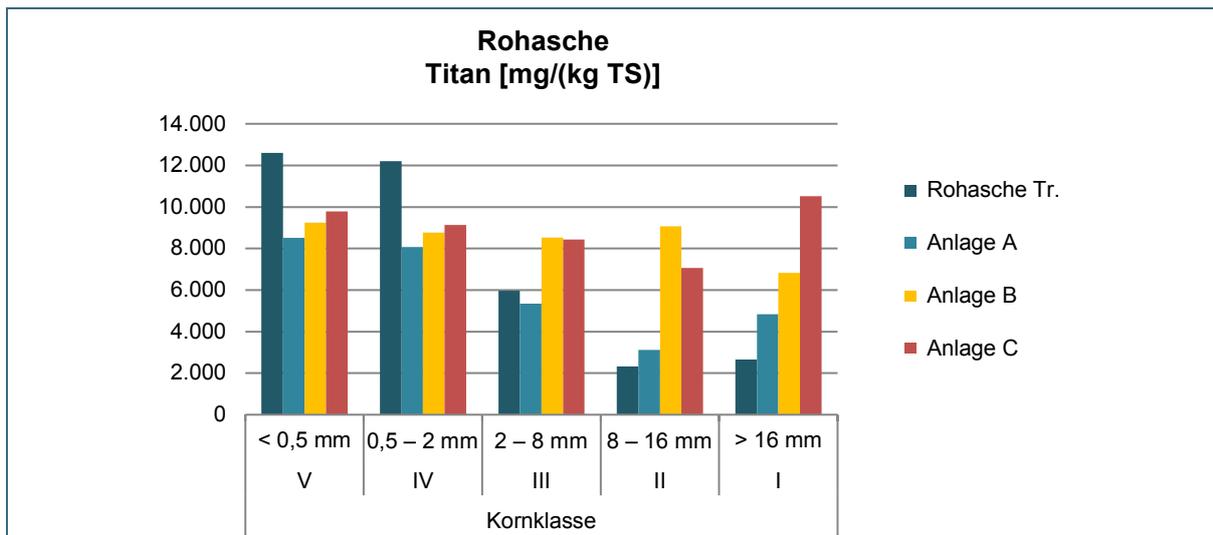


Abb. 50: Berechnete Verteilung von Titan auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B, und C

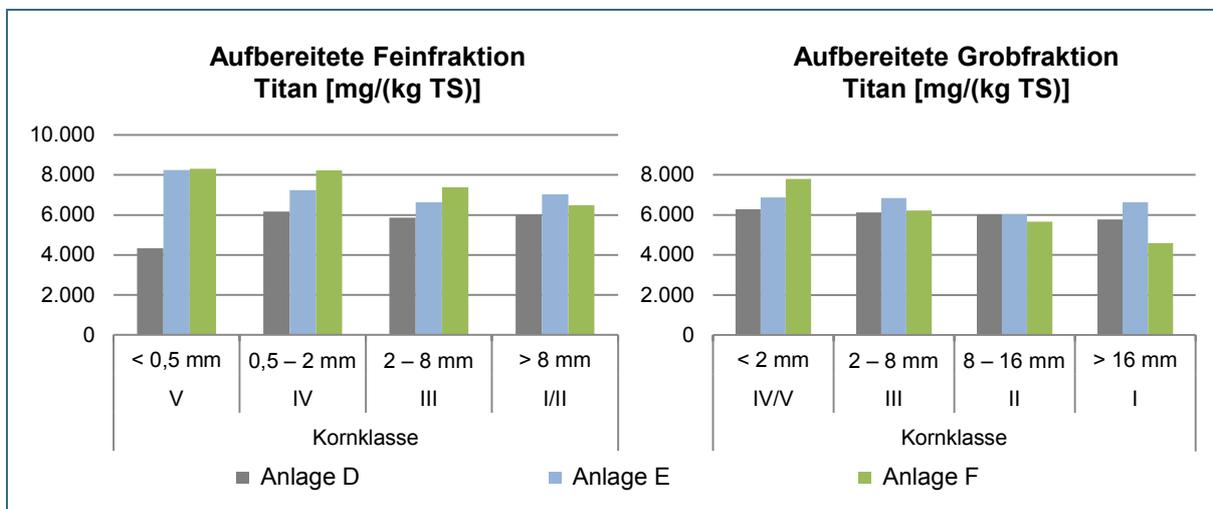


Abb. 51: Berechnete Verteilung von Titan auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

7.4.5 Gruppe 5: Niob

Niob kommt in der Natur meist als Mischoxid vergesellschaftet mit Tantal, Mangan und Seltenerdmetalloxiden vor. Sein Anteil in der Erdkruste beträgt 0,024 %. Niob-Mineralien abbauwürdiger Lagerstätten enthalten zwischen circa 0,1 und 3 % Niobpentoxid, was einem Niobanteil zwischen etwa 0,7 und 2 % (7.000 und 20.000 mg/kg) entspricht [80].

Im Jahr 2013 wurden weltweit circa 60.000 Mg des Metalls gewonnen, wobei Brasilien mit einem Anteil von fast 90 % das Hauptproduktionsland war.

Niob wird für korrosionsbeständige und hochwarmfeste Stähle (Edelstähle) sowie für verschleißfeste Speziallegierungen benötigt [3].

Die Niobgehalte in den untersuchten Ascheproben (siehe Abb. 52) liegen zwischen 0,6 und 2,4 mg/(kg TS) und damit weit unter den genannten Konzentrationen in Erzen (Faktor 10.000). Im Vergleich zu den anderen Wochenmischproben ist sowohl in den mineralischen als auch magnetischen Teilproben der aufbereiteten Feinfraktionen der Anlagen E und F ein erhöhter Niobgehalt festzustellen. In der mineralischen Teilprobe der feuchten Rohasche der Anlage A liegt der gemessene Wert unter der Bestimmungsgrenze von 0,25 mg/(kg TS).

In den untersuchten Roh- (siehe Abb. 53) und den aufbereiteten Aschen (siehe Abb. 54) ist die Anreicherung von Niob in den kleinen Korngrößen gut zu erkennen. Während die Kornklassen II und I (> 8 mm) der Rohaschen etwa 0,5 mg/(kg TS) Niob enthalten, wird in der Kornklasse V (< 0,5 mm) fast die vierfache Konzentration erreicht. Die aufbereiteten Aschen der Anlage D enthalten weniger Niob als die Proben der Anlagen E und F. Bei den fehlenden Säulen in der größten Kornklasse (I/II bzw. I) lagen die gemessenen Werte unter der Bestimmungsgrenze von 0,25 mg/(kg TS).

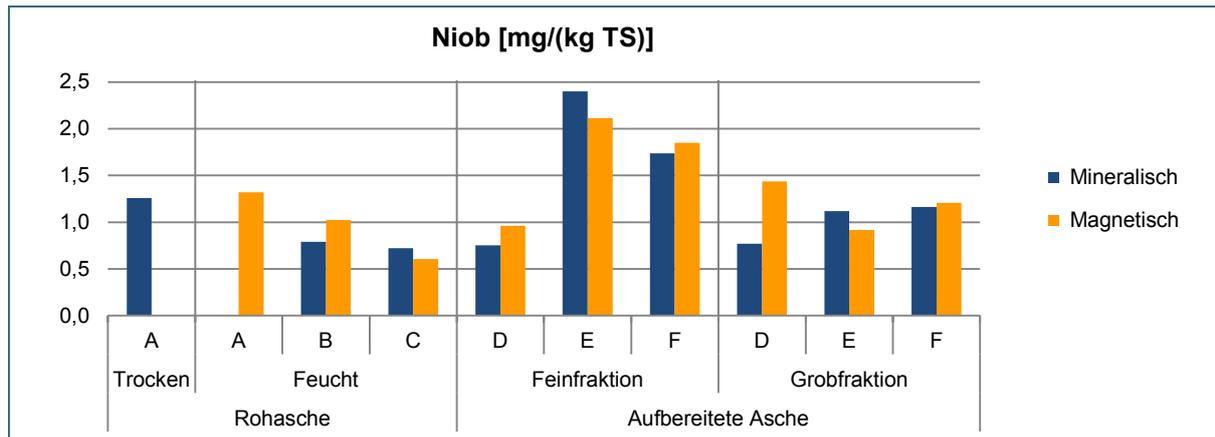


Abb. 52: Niobgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

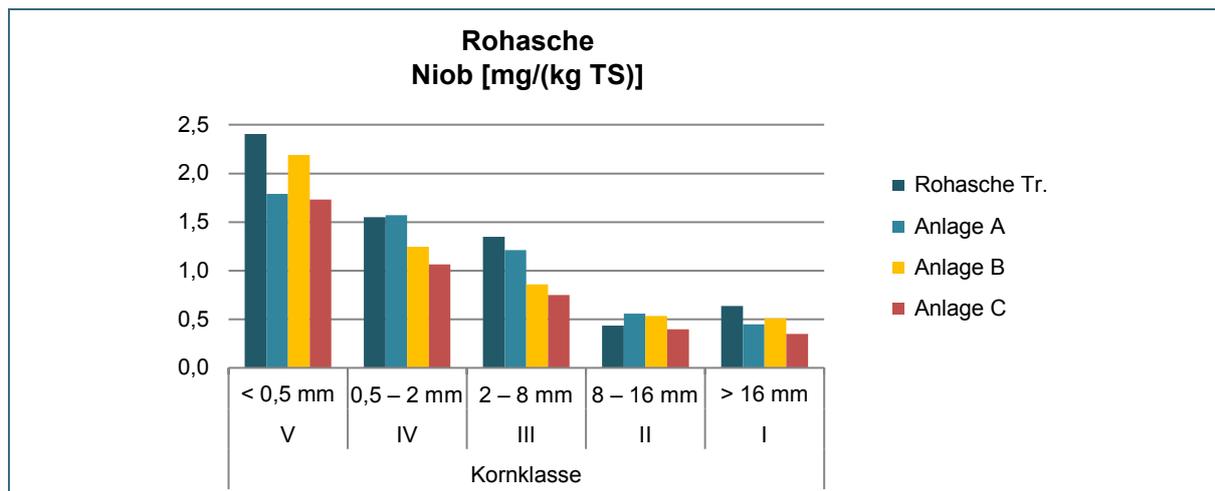


Abb. 53: Berechnete Verteilung von Niob auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

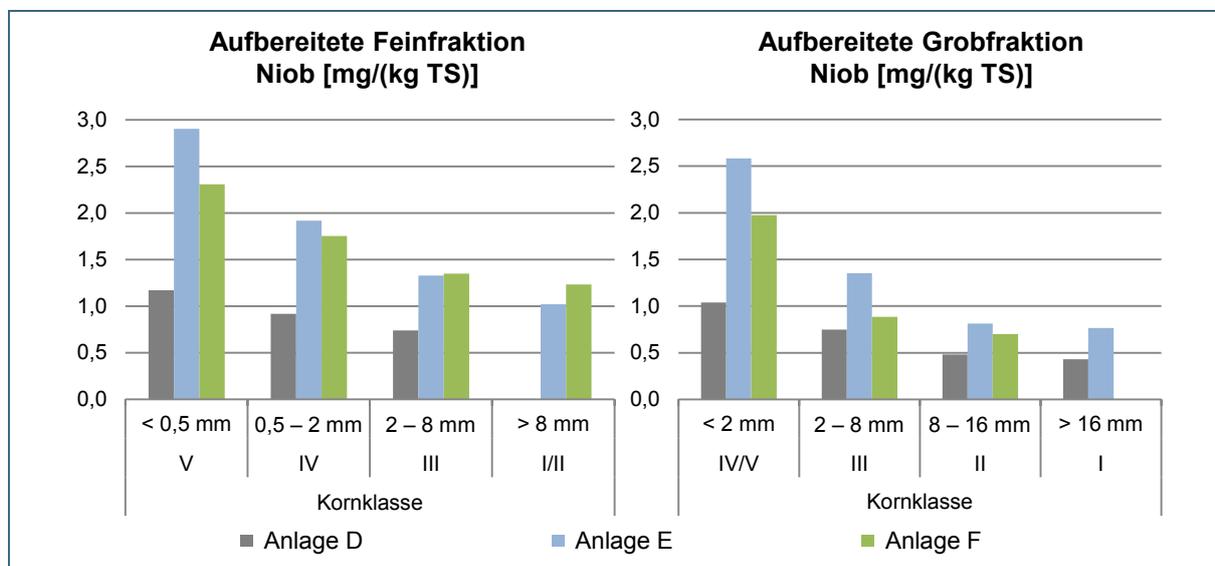


Abb. 54: Berechnete Verteilung von Niob auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

7.4.6 Gruppe 6: Chrom, Molybdän

Chrom

Chrom kommt in der Natur überwiegend in Verbindungen vor. Das wichtigste Chromerz ist Chromit (FeCr_2O_4). In der Erdkruste liegt der Chromanteil bei circa 0,2 ‰. Abbauwürdige Lagerstätten enthalten circa 25 – 30 % Chrom (250.000 – 300.000 mg/kg) [77]. Die Produktion von marktfähigem Chromerz betrug 2013 rund 28,8 Mio. Mg. Die drei Hauptproduktionsländer waren 2013 Südafrika, Kasachstan und die Türkei.

Chrom wird vor allem als Legierungsbestandteil für Edelstähle, für feuerfeste Materialien sowie in der Chemieindustrie (Katalysator bei der Ammoniaksynthese) benötigt [3].

Die Chromgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben sind in Abb. 55 dargestellt. Alle magnetischen Teilproben weisen höhere Chromgehalte auf als die mineralischen. Die höchsten Chromgehalte {magnetisch: 1.830 mg/(kg TS)} wurden in den Proben der Anlage C gemessen. Der LAGA-Anhaltswert [31] von 2.000 mg/(kg TS) wird von keiner Teilprobe erreicht. Der Chromgehalt der magnetischen Feinfraktion aus Anlage E weicht um 36 % von dem gewichteten Mittelwert der Gehalte in den Kornklassen dieser Teilprobe ab.

Im Hinblick auf die Verteilung von Chrom auf die Kornklassen ist keine eindeutige Tendenz zu erkennen (siehe Abb. 56). Während in den Proben der Anlage A eine steigende Tendenz der Elementgehalte hin zu kleineren Korngrößen festzustellen ist, nehmen die Werte der Proben aus Anlage C eher mit steigender Korngröße zu.

Bei den aufbereiteten Aschen (siehe Abb. 57) ist keine signifikante Anreicherung von Chrom zu beobachten.

Generell liegen die Chromgehalte sämtlicher Proben um mindestens zwei Größenordnungen unter dem oben genannten Konzentrationsbereich für abbauwürdige Lagerstätten.

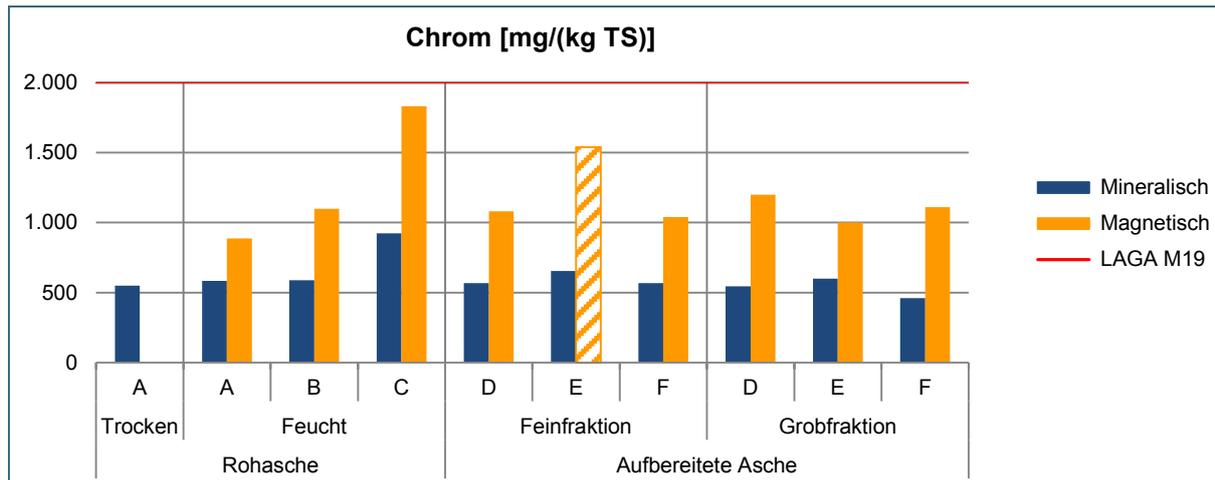


Abb. 55: Chromgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Schraffierte Säule: Ausreißer. Rote Linie: LAGA-Anhaltswert [31]

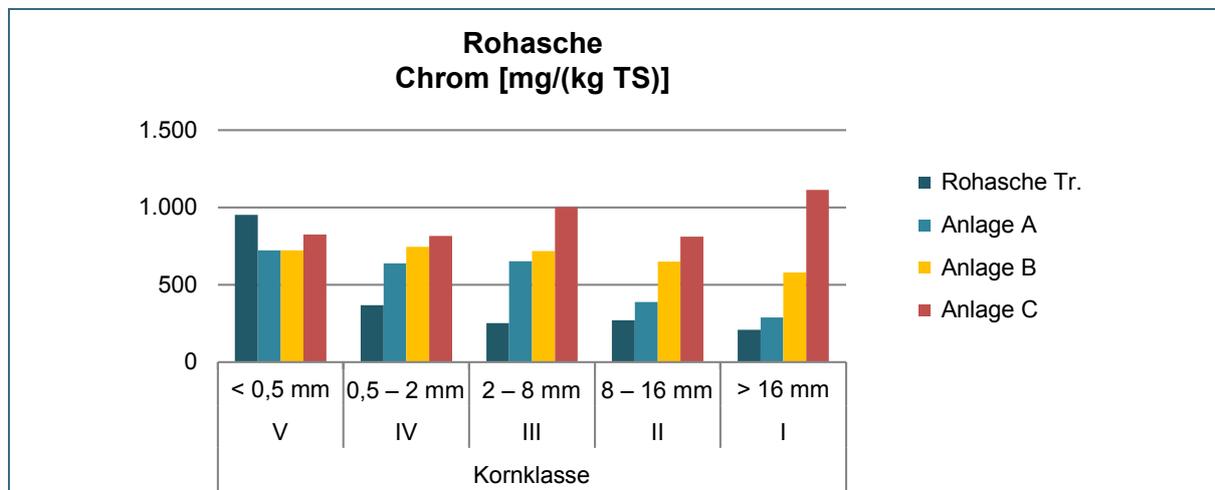


Abb. 56: Berechnete Verteilung von Chrom auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C.

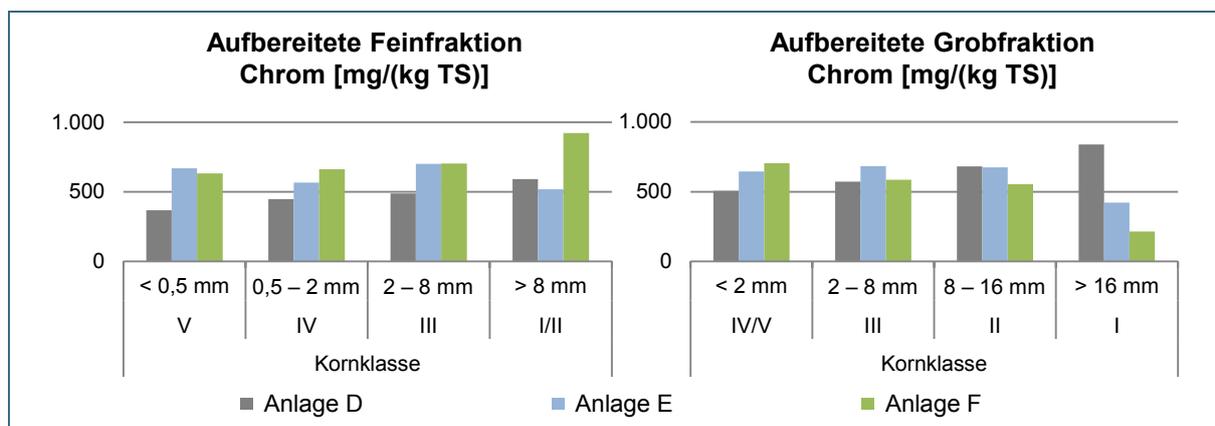


Abb. 57: Berechnete Verteilung von Chrom auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Molybdän

Molybdän kommt als Mineral (Molybdänit) vor. Sein Gehalt in der Erdkruste beträgt circa 0,0015 ‰. In Erzen ist es häufig mit Wolfram vergesellschaftet.

Im Jahr 2013 betrug die weltweite Gewinnung von Molybdän circa 258.000 Mg. Etwa 90 % der Produktion konzentriert sich auf fünf Länder: China (39 %), USA (24 %), Chile (15 %), Peru (7 %) und Mexiko (5 %). Laut der Deutschen Rohstoffagentur [77] besitzen abbauwürdige Lagerstätten einen Molybdängehalt ab etwa 0,3 %.

Als Legierungsbestandteil erhöht Molybdän die Festigkeit, Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit von Stählen. Die Stähle finden Einsatz z. B. im Anlagenbau, in der Luft- und Raumfahrttechnik. Ebenso eignet sich Molybdän zur Herstellung von Schmierstoffen und Katalysatoren [3].

Die Gehalte der ungesiebten mineralischen und magnetischen Wochenmischproben zeigt Abb. 58. Eine Anreicherung des Elements in den magnetischen Teilproben ist in allen Proben zu beobachten. Bei allen Ausreißer-Werten wurde für die Teilproben eine um 26 bis 138 % höhere Konzentration gemessen als die gewichteten Mittelwerte der Gehalte in den jeweiligen Kornklassen. Die Rohasche trocken enthält weniger Molybdän als die feucht ausgetragenen Rohaschen der Anlagen A, B und C.

Während in den Rohaschen (siehe Abb. 59) eine mehr oder weniger starke Anreicherung von Molybdän in den kleineren Korngrößen auftritt, ist dieser Effekt in den Proben der Fein- und Grobfraktionen (siehe Abb. 60) nicht zu beobachten. Die höchsten Konzentrationen weisen die Proben der Anlage C auf.

Bei den Grobfraktionen werden die höchsten Werte für die Proben der Anlage D gemessen (vergleiche Abb. 60).

Alle Messwerte liegen weit unter dem oben genannten Gehalt für abbauwürdige Lagerstätten von 3.000 mg/kg.

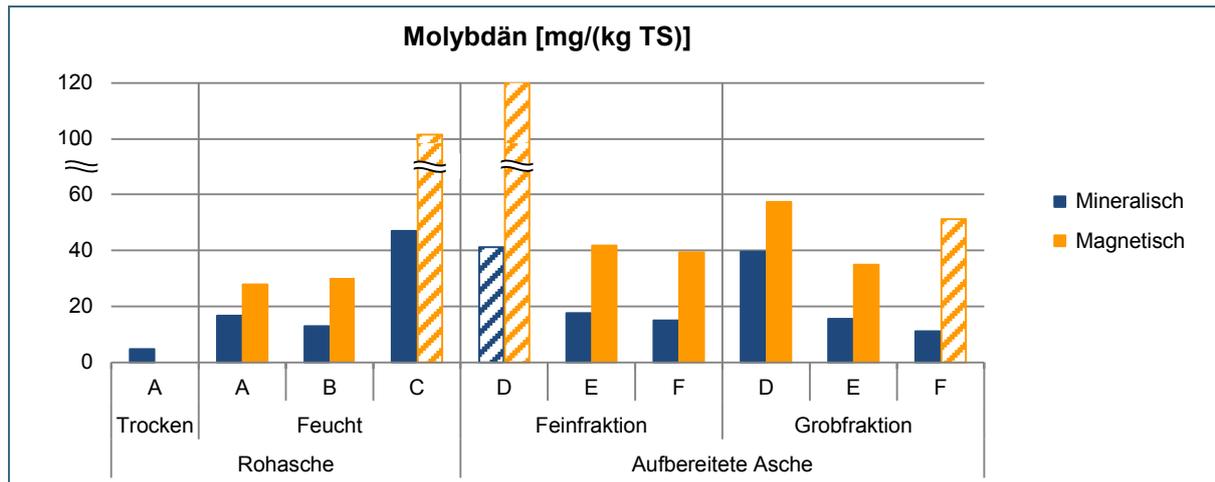


Abb. 58: Molybdängehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Schraffierte Säulen: Ausreißer

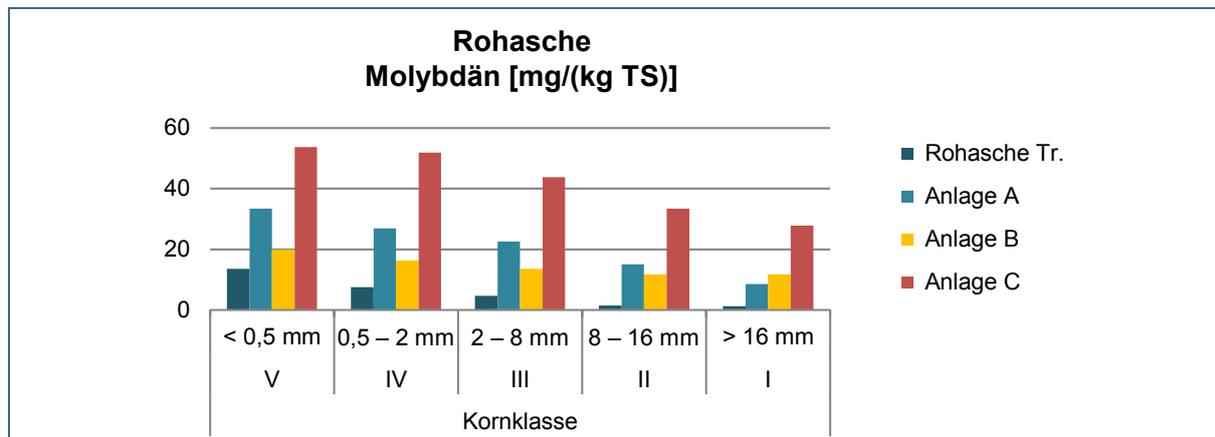


Abb. 59: Berechnete Verteilung von Molybdän auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

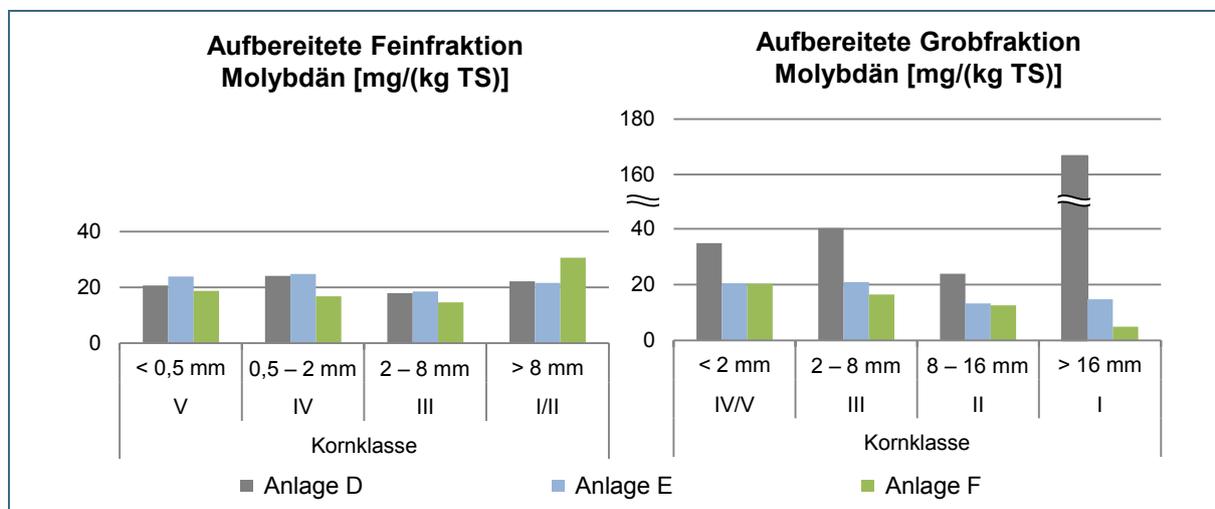


Abb. 60: Berechnete Verteilung von Molybdän auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

7.4.7 Gruppe 7: Mangan

Mangan kommt in der Natur ausschließlich gebunden, das heißt nicht gediegen vor. Sein Anteil in der Erdkruste beträgt 0,95 ‰. Damit ist es nach Eisen (Anteil in der Erdkruste: 5 %) das zweithäufigste Schwermetall.

Im Jahr 2013 wurden circa 16,9 Mio. Mg Mangan weltweit gewonnen. Die wesentlichen Abbauländer von Manganerz sind Südafrika (25 %), China (18 %) und Australien (18 %). Ab einem Erzgehalt von etwa 20 % werden Lagerstätten als wirtschaftlich abbaubar angesehen [77].

Das Übergangsmetall wird in der Eisen- und Stahlindustrie zur Entschwefelung von Eisen und Stahl sowie zur Reduktion von Eisenoxiden benötigt. Aufgrund seiner „unedlen“ Eigenschaften kann es bislang kaum bzw. nicht durch andere Stoffe ersetzt werden. Mangandioxid wird als Kathodenmaterial in Alkali-Mangan-Batterien verwendet.

Die Mangangehalte in den mineralischen Wochenmischproben – Ausreißer unberücksichtigt – betragen zwischen 638 und 1.270 mg/(kg TS). Demgegenüber sind die Konzentrationen in allen magnetischen Proben höher. In der Grobfraction der Anlage E ist mit circa 3.800 mg/(kg TS) am meisten Mangan enthalten (vergleiche Abb. 61).

In den Rohaschen (siehe Abb. 62) und den aufbereiteten Ascheproben (siehe Abb. 63) lässt sich keine besondere Anreicherung des Mangans in einer bestimmten Korngröße feststellen. Durch die Anreicherung des Mangans in der magnetischen Fraktion liegen in einzelnen magnetischen Kornklassen der Anlage E Konzentrationen bis zu 7.600 mg/(kg TS) vor (nicht dargestellt).

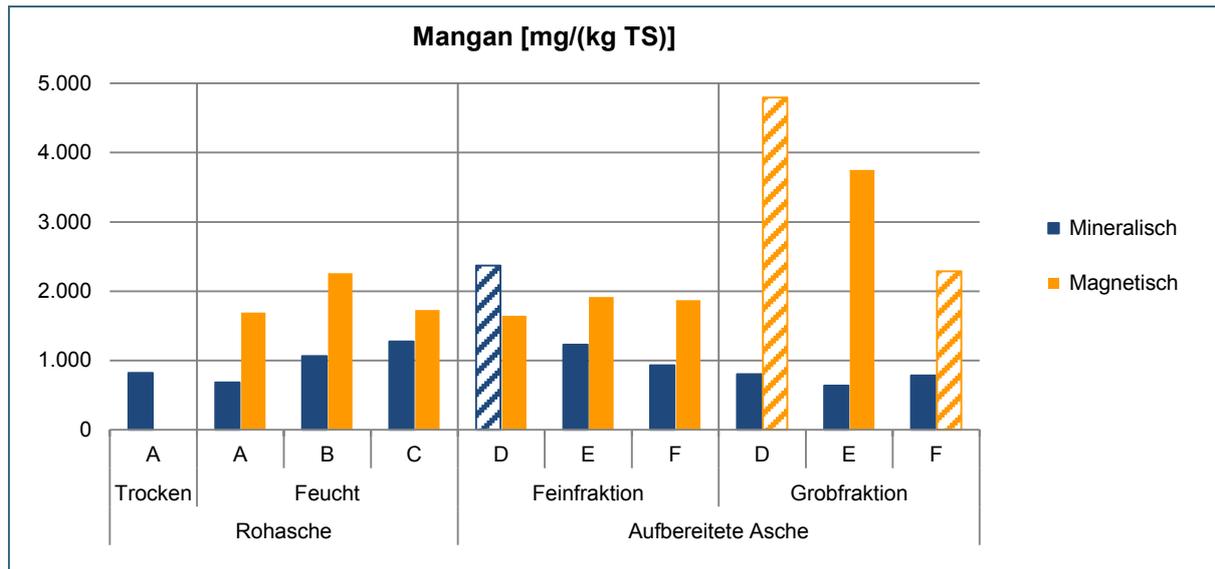


Abb. 61: Mangangehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Schraffierte Säulen: Ausreißer

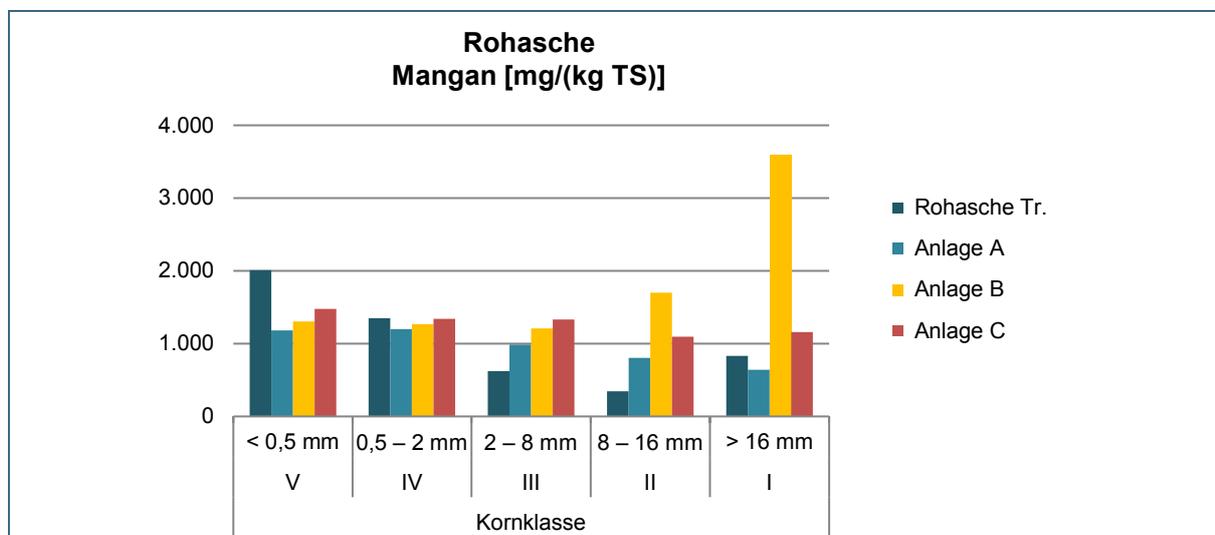


Abb. 62: Berechnete Verteilung von Mangan auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

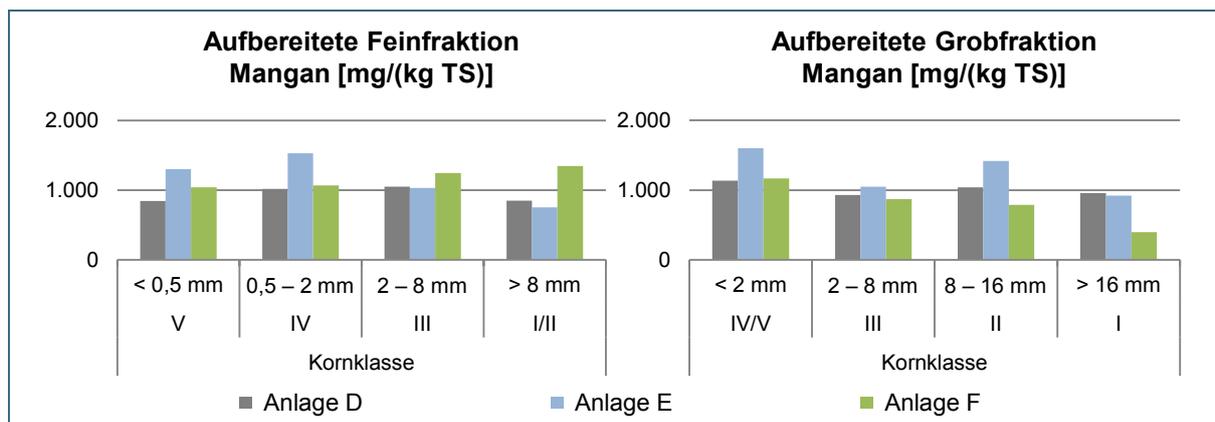


Abb. 63: Berechnete Verteilung von Mangan auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

7.4.8 Gruppe 8: Eisen

Eisen kommt in der Natur in der Regel als oxidische Verbindung vor. Die Erdkruste enthält 5 % Eisen. Damit liegt das Schwermetall unter den fünf häufigsten Elementen.

Die Produktion von Roheisen belief sich im Jahr 2013 auf weltweit 1,18 Mio. Mg; die von Rohstahl auf 1,62 Mio. Mg – Angaben jeweils auf den Eisengehalt bezogen. Die Hauptproduktionsländer liegen für Roheisen vor allem in Asien: China (60 %), Japan (7 %), Indien (4 %). Und für Stahl in führenden und aufstrebenden Wirtschaftsnationen: China (48 %), Japan (7 %), USA (5 %), Indien (5 %), Korea (5 %). Nach Angaben der Deutschen Rohstoffagentur liegt die Konzentration von Eisen in abbauwürdigen Erzen zwischen 30 und 72 % [77].

Eisen ist der Hauptbestandteil von Stahl. Aufgrund der konsequenten Fortentwicklung des Werkstoffs Eisen/Stahl ist Eisen ein Grundwerkstoff für ein weites Anwendungsgebiet (z. B. Schiffsbau, Fahrzeugbau, Anlagenbau etc.). In Abhängigkeit vom Anwendungsfall können Eisenwerkstoffe durch Legierungsbestandteile die benötigten Eigenschaften (z. B. Festigkeit, Fließverhalten, Korrosionsbeständigkeit) bekommen. In Bayern werden Eisen und Stahl vorwiegend für den Fahrzeugbau, die Bauindustrie (Stahlbetonbau, Stahlbau) und im Maschinen- und Anlagenbau benötigt [3].

Aufgrund seiner magnetischen Eigenschaften reichert sich Eisen in den magnetischen Teilproben stark an (vergleiche Abb. 64). Die Gehalte reichen von 180 bis 316 g/(kg TS). In den mineralischen Teilproben liegen die Werte zwischen rund 12 (Rohasche trocken) und 60 g/(kg TS). Die Anreicherungsfaktoren im Vergleich magnetisch/mineralisch betragen zwischen 4 und 7,7 (Grobfraktion Anlage F). In einigen magnetischen Kornklassen erreichen die Eisenkonzentrationen die von abbauwürdigen Lagerstätten (nicht dargestellt).

Die für die Abb. 65 berechneten Elementgehalte entsprechen im Fall der Rohasche A trocken ausschließlich dem mineralischen Teil – der magnetische Anteil wurde nicht analysiert, siehe Abschnitt 7.1. Gegenüber den anderen Rohaschen sind diese Werte aufgrund der Eisenanreicherung in der magnetischen Fraktion viel geringer. In den Aschen der Anlagen B und C steigen die Eisengehalte in der Regel mit zunehmender Partikelgröße an, während in der Rohasche der Anlage A die höchsten Gehalte in den Kornklassen IV und III (0,5 bis 8 mm) vorliegen.

In den aufbereiteten Aschen (vergleiche Abb. 66) ist keine eindeutige Abhängigkeit der Eisenkonzentration von der Partikelgröße erkennbar.

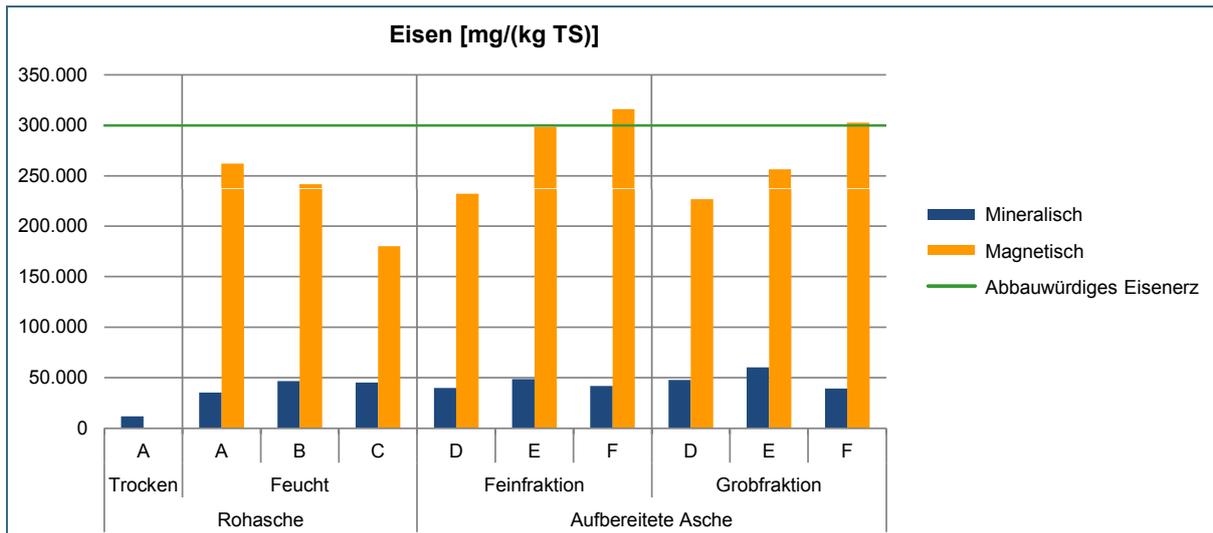


Abb. 64: Eisengehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Eingezeichneter Eisenerzgehalt nach [77]

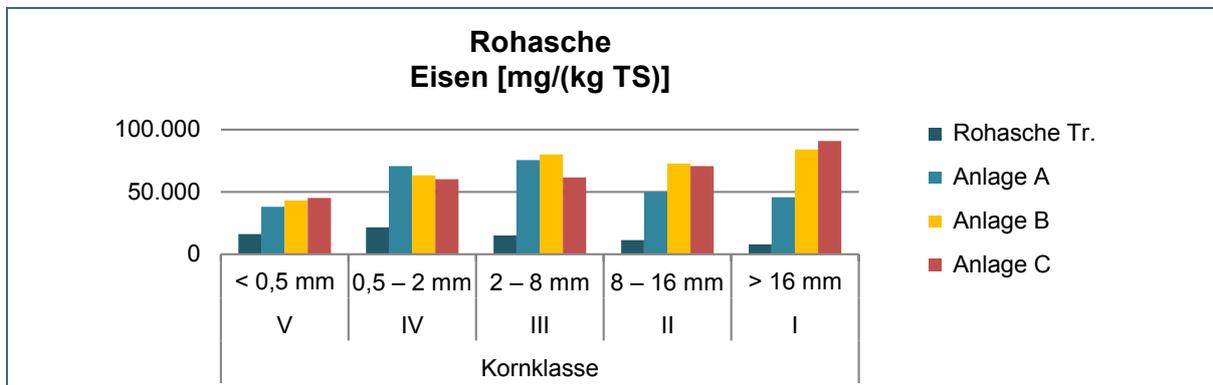


Abb. 65: Berechnete Verteilung von Eisen auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

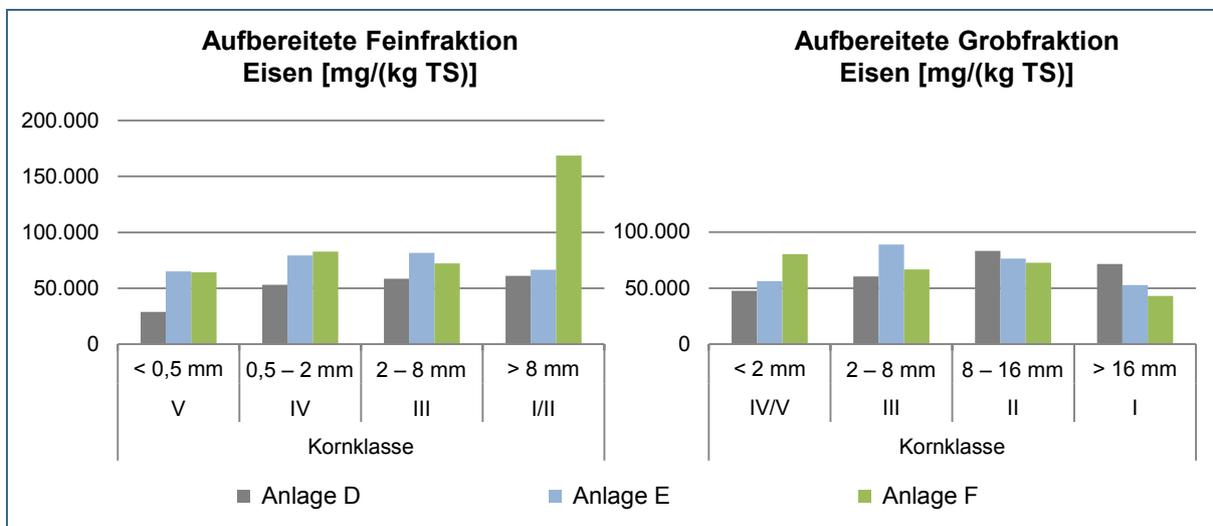


Abb. 66: Berechnete Verteilung von Eisen auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

7.4.9 Gruppe 9: Kobalt

Kobalt kommt als Mineral sehr häufig vergesellschaftet mit Nickel vor und wird als Beiprodukt gewonnen. Der Kobaltgehalt beträgt circa 0,1 – 0,4 %. In der Erdkruste liegt der Anteil bei 0,02 %.

Die weltweite Produktion von Kobalt betrug im Jahr 2013 circa 110.000 Mg. Mit einem Anteil von knapp 50 % ist die DR Kongo das Land mit den höchsten Kobaltreserven.

Das Metall findet Anwendung in Hochtemperaturlegierungen, Dauermagneten, Katalysatoren, Farben und Batterien und stellt daher auch für Bayern einen wichtigen Rohstoff dar [3]. Kobalt wird in [3] als sehr bedeutend für die Zukunft eingeschätzt und kann derzeit ohne Qualitätseinbußen bei den Produkten nicht durch einen anderen Stoff ersetzt werden.

Bei den Gesamtgehalten der Wochenmischproben (vergleiche Abb. 67) ist die Anreicherung von Kobalt in den magnetischen Teilproben deutlich zu erkennen. Der Ausreißer in der magnetischen Feinfraktion E liegt oberhalb des Wertebereichs in den entsprechenden Kornklassen, der Wert in der magnetischen Grobfraktion der Anlage F darunter. Am meisten Kobalt enthalten die magnetischen Teilproben der Anlagen A (Rohasche: 114 mg/(kg TS)) und F (Feinfraktion: 105 mg/(kg TS)). Die Konzentrationen in den mineralischen Teilproben liegen zwischen 17 (Rohasche trocken) und 39 mg/(kg TS) (Anlage B).

Insbesondere bei der feucht ausgetragenen Rohasche der Anlagen A und B fällt eine Anreicherung in den Kornklassen V und IV (< 2 mm) auf, siehe Abb. 68.

In den aufbereiteten Fraktionen ist eine eindeutige Abhängigkeit des Kobaltgehalts von der Korngröße nicht auszumachen (Abb. 69).

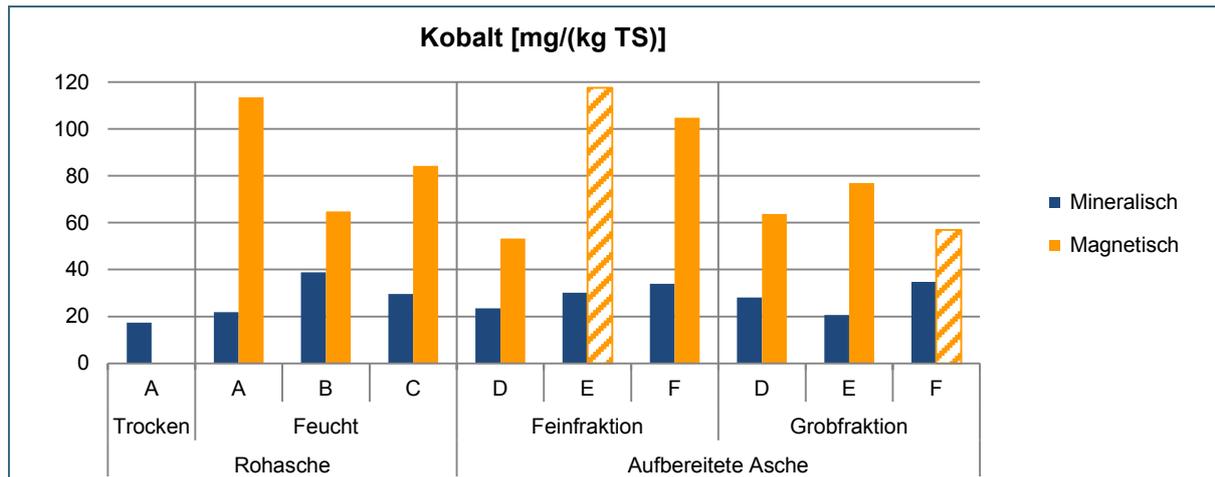


Abb. 67: Kobaltgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Schraffierte Säulen: Ausreißer

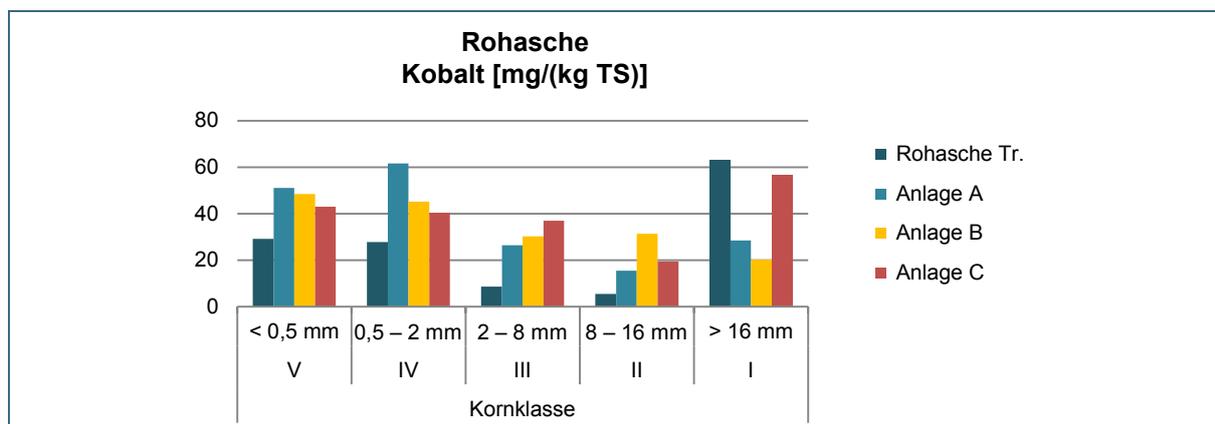


Abb. 68: Berechnete Verteilung von Kobalt auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

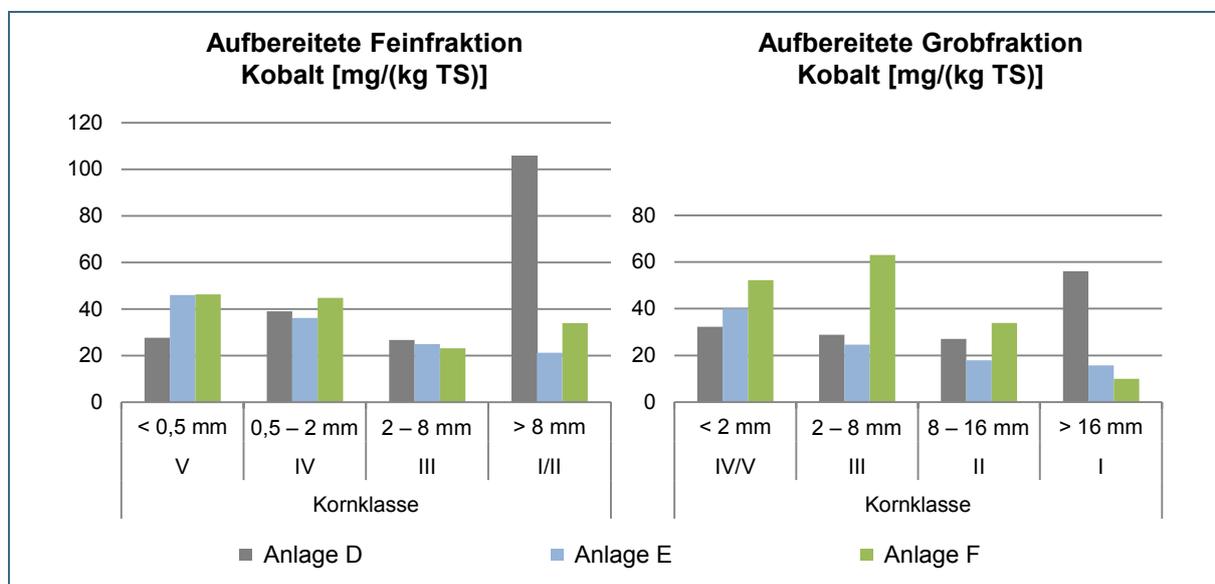


Abb. 69: Berechnete Verteilung von Kobalt auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

7.4.10 Gruppe 10: Nickel

Nickel liegt mit einem durchschnittlichen Gehalt von 0,07 ‰ in der Erdkruste in Form verschiedenster Minerale (z. B. Garnierit, Pentlandit, Laterit) vor.

Die weltweite Nickelproduktion betrug im Jahr 2013 etwa 2,6 Mio. Mg, wobei die drei Hauptförderländer die Philippinen (17 %), Indonesien (17 %) und Russland (10 %) sind. Ab einem Erzgehalt von etwa 1 % Nickel ist eine Lagerstätte abbauwürdig [77].

Nickel spielt als Legierungsbestandteil eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von korrosions-, temperaturbeständigen (Hochleistungs-)Stählen. Das Anwendungsspektrum dieser Werkstoffe ist äußerst vielfältig, da diese Werkstoffeigenschaften bei vielen Produkten (z. B. Haushaltsgeräte, Anlagen-, Maschinenbau, zur Oberflächenveredelung) benötigt werden.

Die Abb. 70 zeigt die Nickelgehalte der untersuchten Wochenmischproben. Bei allen Anlagen ist eine Anreicherung des Elements in der magnetischen Teilfraktion zu beobachten. Die Gehalte der mineralischen Teilproben liegen zwischen 44 und 274 mg/(kg TS); die der magnetischen Teilproben zwischen 330 und 629 mg/(kg TS) und damit zum Teil über dem LAGA-Anhaltswert von 500 mg/(kg TS) [31].

Bei den untersuchten Rohaschen fällt der allgemein hohe Nickelwert in den Proben der Anlage C auf (siehe Abb. 71). Dahingegen enthält die Rohasche trocken der Anlage A in jeder Kornklasse die geringsten Konzentrationen. Tendenziell nehmen die Nickelgehalte zu kleineren Korngrößen zu.

Die Abb. 72 zeigt die Verteilung von Nickel auf die untersuchten Kornklassen für die aufbereiteten Aschen. Ein einheitliches Verhalten der Nickelgehalte ist nicht zu erkennen. Während bei der Anlage D die Gehalte in der Fein- und Grobfraktion relativ gleichmäßig über die Kornklassen verteilt sind, ist für die Anlage E ein Anstieg der Nickelgehalte in den kleineren Korngrößen festzustellen (Feinfraktion: Kornklassen V und IV, Grobfraktion: Kornklassen IV/V und III).

Von 33 analysierten Kornklassen der magnetischen Teilproben lag der Nickelwert in 19 Proben über dem LAGA-Anhaltswert von 500 mg/(kg TS) [31].

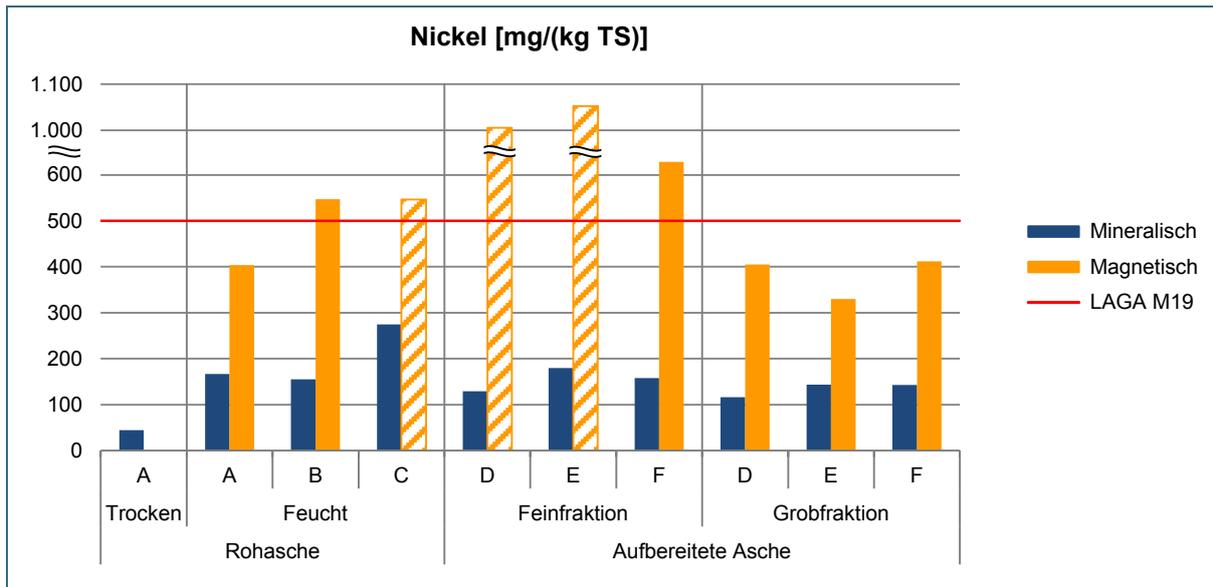


Abb. 70: Nickelgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Schraffierte Säulen: Ausreißer. Rote Linie: LAGA-Anhaltswert [31]

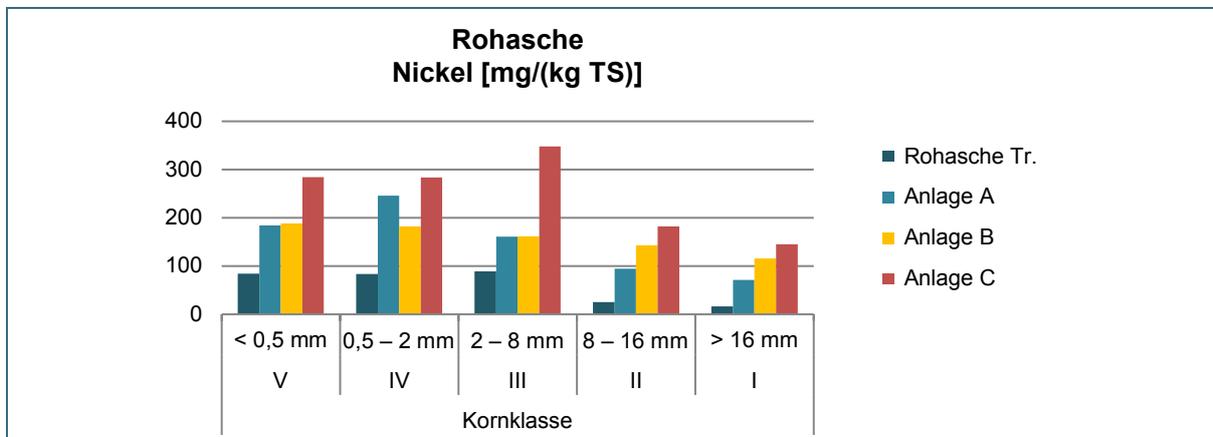


Abb. 71: Berechnete Verteilung von Nickel auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

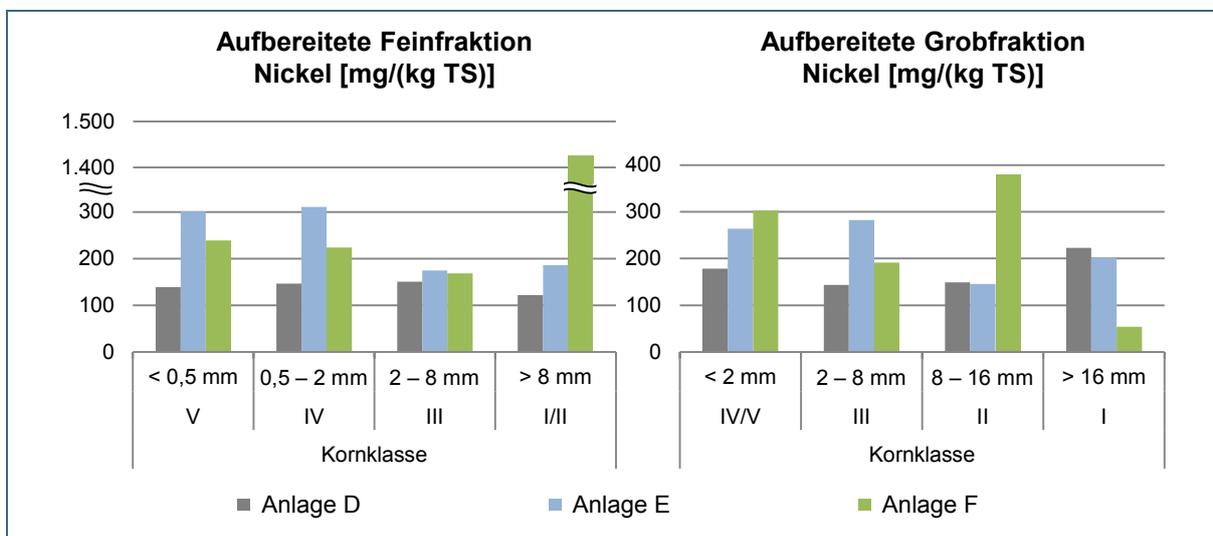


Abb. 72: Berechnete Verteilung von Nickel auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

7.4.11 Gruppe 11: Kupfer, Silber, Gold

Kupfer

Kupfer kommt in der Natur sowohl gediegen als auch vermehrt als Mineral in Form zahlreicher Oxide, Sulfide und Carbonate vor. Sein Anteil in der Erdkruste liegt bei 0,07 ‰. Als Enzymbestandteil ist es ein essenzielles Spurenelement für viele Lebewesen.

Die Weltproduktion an Kupfer belief sich im Jahr 2013 auf 18,3 Mio. Mg, wobei die größten Mengen aus den Minen in Chile (32 %), China (9 %) und Peru (8 %) gefördert werden. Nach Angaben der Deutschen Rohstoffagentur können Lagerstätten bereits ab einem Kupfer-Gehalt von 0,5 % wirtschaftlich sein [77]. In der Arbeit von Deike et al. [61] wird eine Mine in Arizona (USA) genannt, in der bereits Erze mit Kupfergehalten von 0,33 % abgebaut werden.

Kupfer hat aufgrund seiner mechanischen (Verformbarkeit), elektrischen und wärmetechnischen (Leitfähigkeit) Eigenschaften ein breites technisches Anwendungsgebiet. Es findet breite Verwendung in der Elektroindustrie, in Form von Blechen, Rohren unter anderem in der Apparate- (z. B. Wärmetauscher) und Maschinenbauindustrie sowie im Münzwesen. Kupfersalze werden wegen ihrer fungiziden Wirkung im Pflanzenschutz und in Holzschutzmitteln eingesetzt.

Die Kupfergehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben sind in Abb. 73 dargestellt. Die Konzentrationen liegen zwischen 1.440 und 4.894 mg/(kg TS). Meist überschreiten die Gehalte in den magnetischen Teilproben die Werte der mineralischen Teilproben deutlich. In der Rohasche der Anlage C und der magnetischen Teilprobe der Grobfraktion Anlage F werden die höchsten Gehalte gemessen. Die oben genannten Erzgehalte für einen wirtschaftlichen Abbau werden von etlichen Teilproben erreicht (nicht dargestellt).

In Abb. 74 ist die Verteilung von Kupfer auf die Kornklassen dargestellt. Tendenziell ist eine gewisse Zunahme des Kupfergehalts mit abnehmender Korngröße zu erkennen. Analog zu den Gehalten in den Teilproben enthalten die Kornklassen der Anlage C in der Regel am meisten Kupfer. In der Kornklasse IV ist über 5.000 mg/(kg TS) Kupfer enthalten, was dem Gehalt in abbauwürdigen Erzen entspricht.

Während Kupfer in den Feinfraktionen der aufbereiteten Aschen relativ gleichmäßig bei einem Niveau von etwa 2.500 mg/(kg TS) über die Kornklassen verteilt ist, ist in den Grobfraktionen eine leichte Zunahme in kleinen Kornklassen zu beobachten (vergleiche Abb. 75).

Der LAGA-Anhaltswert liegt für Kupfer bei 7.000 mg/(kg TS) [31]. Dieser Wert wird von der Korngrößenfraktion > 8 mm der Feinfraktion Anlage E erreicht.

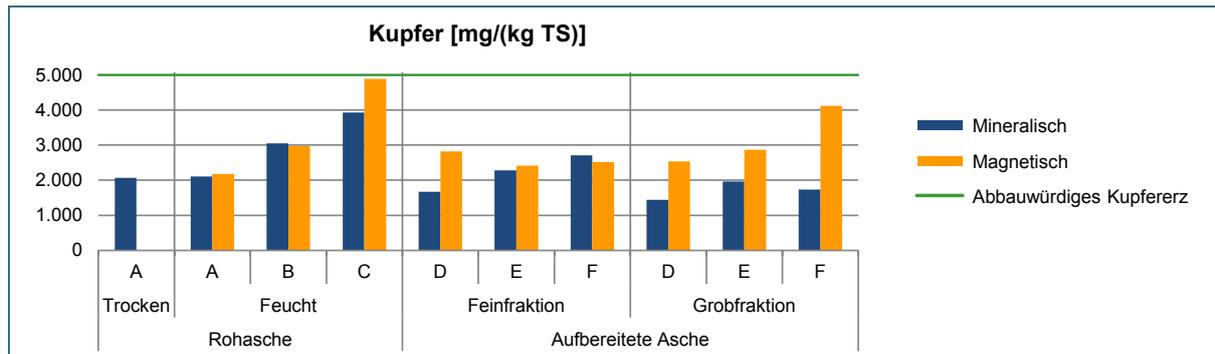


Abb. 73: Kupfergehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Eingezeichneter Kupfererzgehalt nach [77]

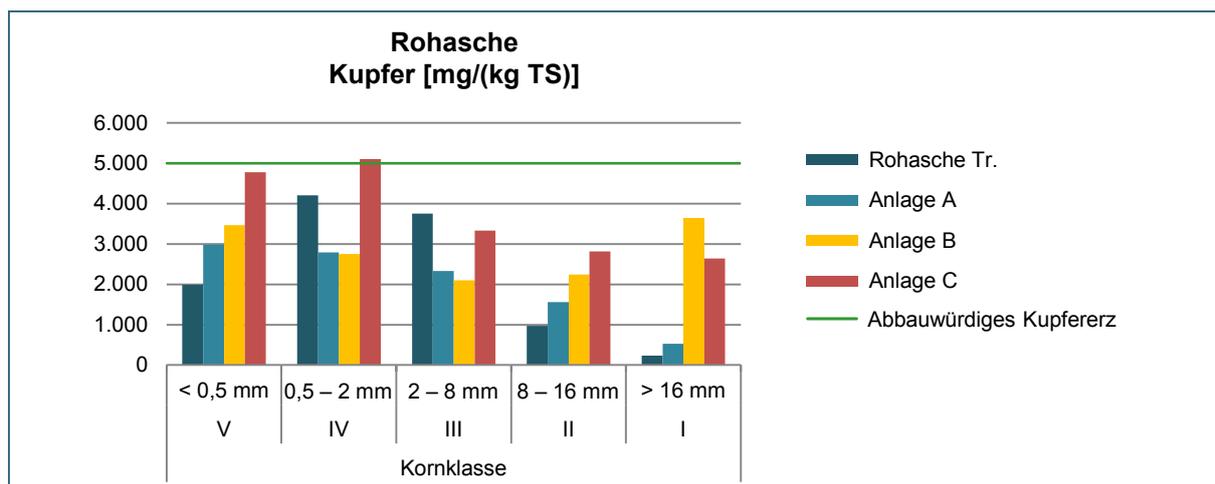


Abb. 74: Berechnete Verteilung von Kupfer auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. Eingezeichneter Kupfererzgehalt nach [77]

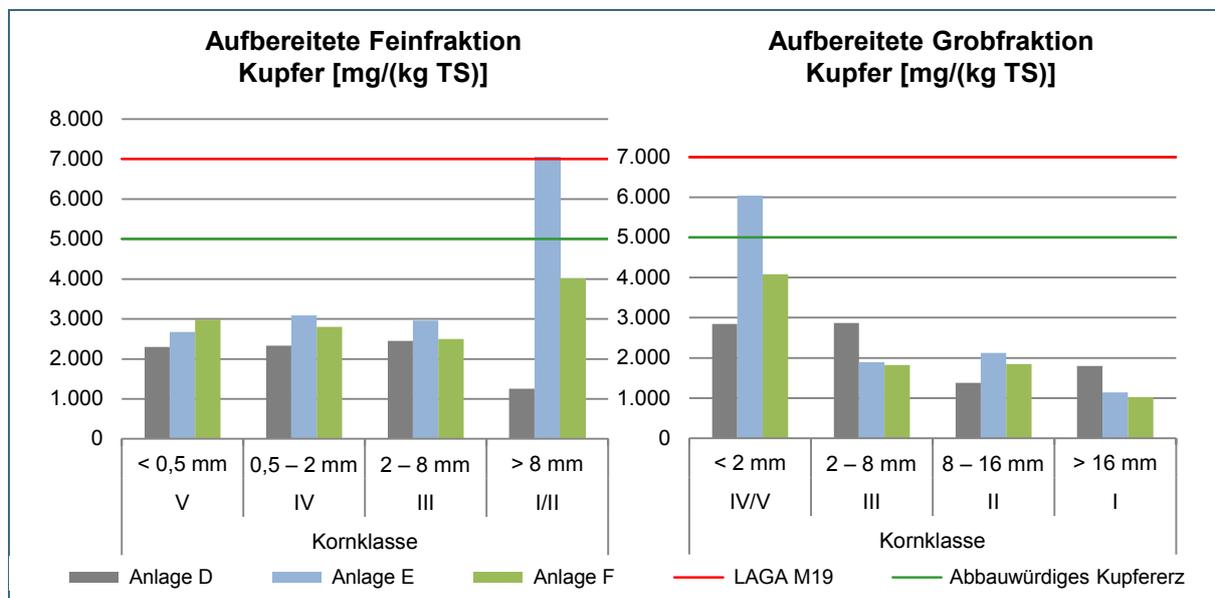


Abb. 75: Berechnete Verteilung von Kupfer auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F. Rote Linie: LAGA-Anhaltswert [31]. Eingezeichneter Kupfererzgehalt nach [77]

Silber

Silber liegt in der Natur vor allem als Silbersulfid vor, gelegentlich auch gediegen. Mit einem Anteil an der Erdkruste von 0,00007 ‰ gehört es zu den seltenen Elementen [81, S. 1433]. Da Silbererze nicht häufig sind, wird in etwa die Hälfte des benötigten Silbers als Nebenprodukt bei der Verhüttung von Galenit, das bis zu 3 ‰ Silber enthält, zur Bleigewinnung erzeugt.

Im Jahr 2013 betrug die Produktionsmenge an Silber rund 26.000 Mg. Die größten Abbauländer waren Mexiko (19 %), China (16 %) und Peru (14 %). Reine Silberlagerstätten enthalten eine Konzentration von 0,45 – 0,55 ‰. Beim Abbau von Blei- und Zinkerzen oder von Gold-Kupfer-Lagerstätten sind bereits Silbergehalte von 0,05 – 0,1 ‰ wirtschaftlich [77].

Früher spielte Silber eine große Rolle als Münzmetall. Heute wird es hauptsächlich für Schmuckwaren, Tafelsilber (als Legierung mit Kupfer) und in der Elektro-/Elektronikindustrie verwendet. Aufgrund seiner antiseptischen Wirkung findet Silber außerdem in der Medizin, z. B. in Wundauflagen Anwendung.

In den untersuchten Wochenmischproben ist kaum eine Anreicherung von Silber in den mineralischen oder magnetischen Teilproben festzustellen (vergleiche Abb. 76). Die Gehalte liegen zwischen 3 und 12 mg/(kg TS) (ohne die Ausreißer). Die Teilproben der Anlage A und die mineralische Teilprobe der Anlage C (ohne Ausreißer) enthalten mit Gehalten um 10 mg/(kg TS) am meisten Silber. Dieser Sachverhalt wird auch in der Verteilung auf die Kornklassen deutlich (vergleiche Abb. 77). Die Konzentrationen steigen insbesondere bei den Proben der Anlagen A und C sowie bei den untersuchten Grobfractionen (vergleiche Abb. 78) mit abnehmender Partikelgröße an.

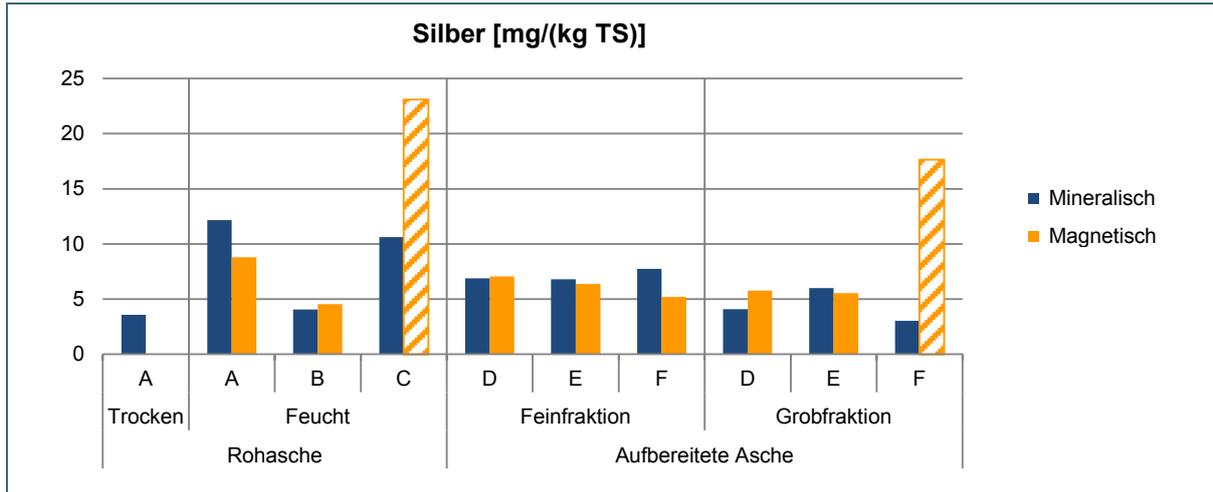


Abb. 76: Silbergehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Schraffierte Säulen: Ausreißer

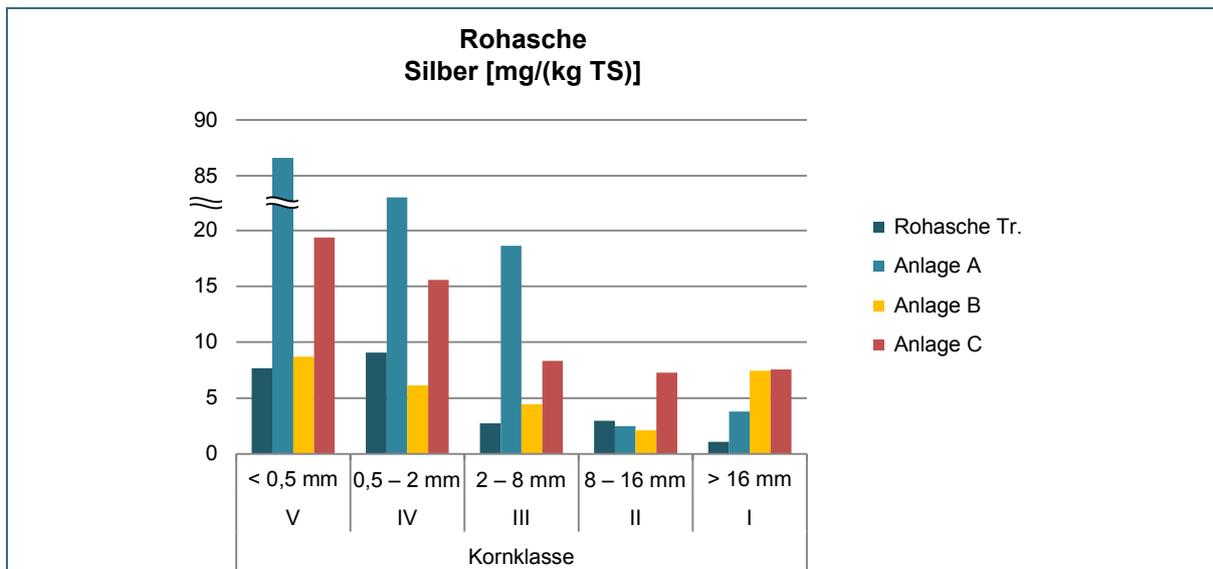


Abb. 77: Berechnete Verteilung von Silber auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

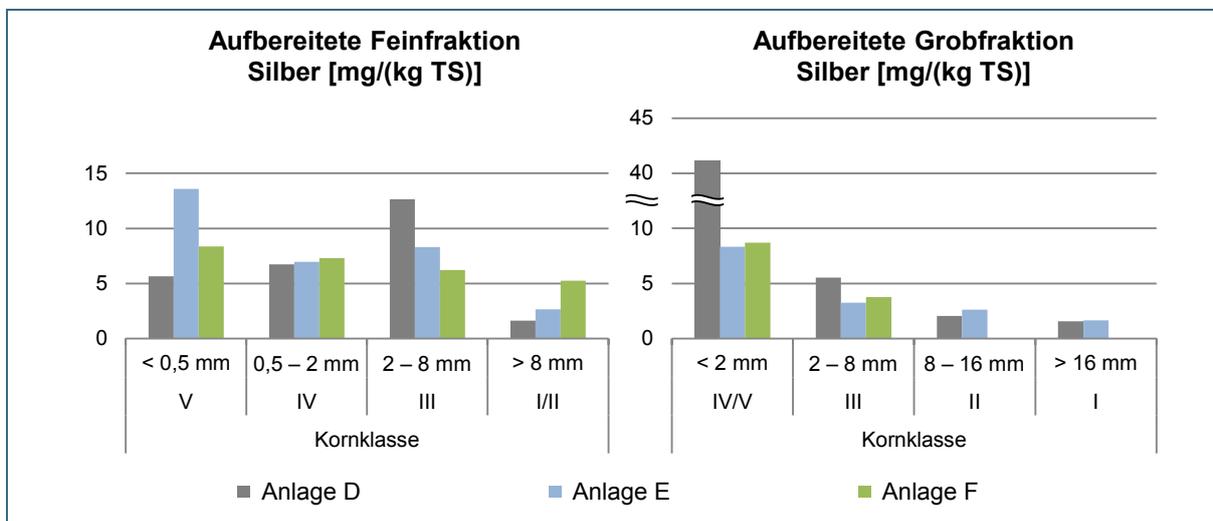


Abb. 78: Berechnete Verteilung von Silber auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Gold

Gold gehört zu den seltensten Elementen. Sein Anteil an der Erdkruste liegt bei 0,000004 ‰. Gold ist chemisch sehr reaktionsträge und kommt daher meist gediegen vor. Dabei ist es fast immer mit Silber legiert.

Die weltweit geförderte Menge betrug im Jahr 2013 rund 2.800 Mg. Die Hauptabbauländer waren China (15 %), Australien (9 %), USA und Russland (jeweils 8 %). Abbauwürdige Lagerstätten enthalten nach Aussage von [77] 0,001 – 0,01 ‰ Gold. Beim Abbau von Gold-Kupfer-Lagerstätten können bereits geringere Konzentrationen wirtschaftlich sein.

Gold wird zu circa 53 % zur Herstellung von Schmuckwaren verwendet, wo es aufgrund seiner geringen Härte meist mit Silber oder Kupfer legiert wird. An zweiter Stelle kommen Münzen und Goldbarren (circa 30 %). Der Rest geht in die Elektro-/Elektronikindustrie (z. B. elektrische Kontakte, Thermoelemente) oder wird für künstlerische Zwecke (Vergolden) benötigt.

Die Goldkonzentrationen (ohne Ausreißer) bewegen sich zwischen 0,1 und 0,8 mg/(kg TS), vergleiche Abb. 79. Die gemessenen Werte für die Wochenmischproben der Anlage A (feucht) und für die mineralische Grobfraction der Anlage E liegen über den Konzentrationen in den jeweiligen Kornklassen; sie wurden als Ausreißer markiert. Bei den magnetischen Feinfraktionen der Anlagen E und F hingegen sind die Gehalte der Wochenmischproben geringer als die der Kornklassen.

In den untersuchten Rohaschen (vergleiche Abb. 80) zeigt sich in den Aschen der Anlagen A und C eine Zunahme der Goldgehalte mit abnehmender Korngröße. In der Asche B liegt das Maximum in Kornklasse IV und in Kornklasse V wird ein sehr geringer Goldgehalt gemessen. Zunehmende Gehalte mit abnehmender Korngröße sind in den aufbereiteten Aschen lediglich in den Grobfractionen zu erkennen (vergleiche Abb. 81). In der Grobfraction der Anlage F liegen die Goldkonzentrationen in den Kornklassen > 2 mm unter der Bestimmungsgrenze von 0,1 mg/(kg TS).

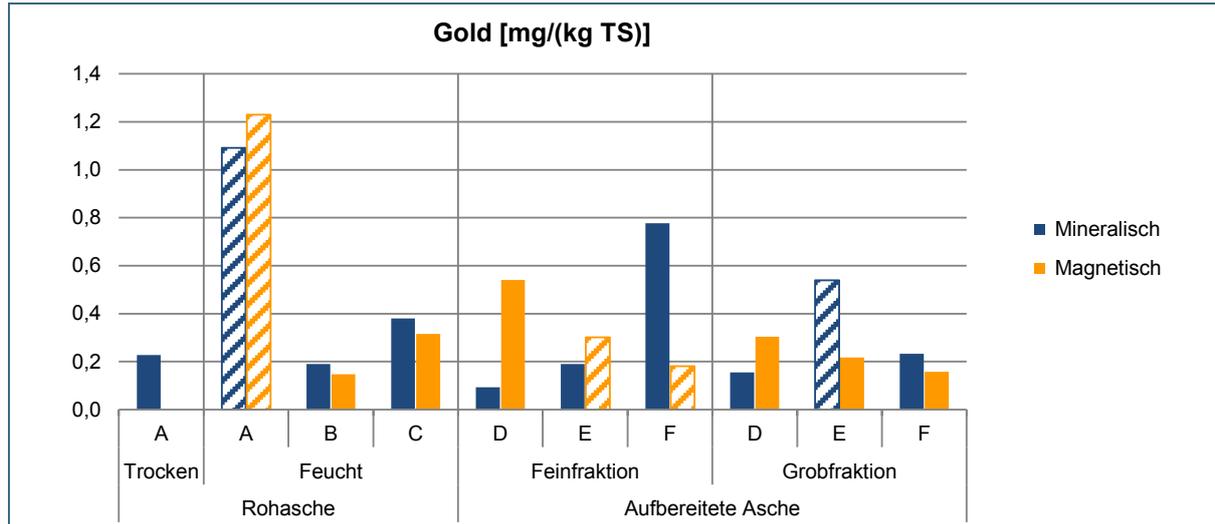


Abb. 79: Goldgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Schraffierte Säulen: Ausreißer

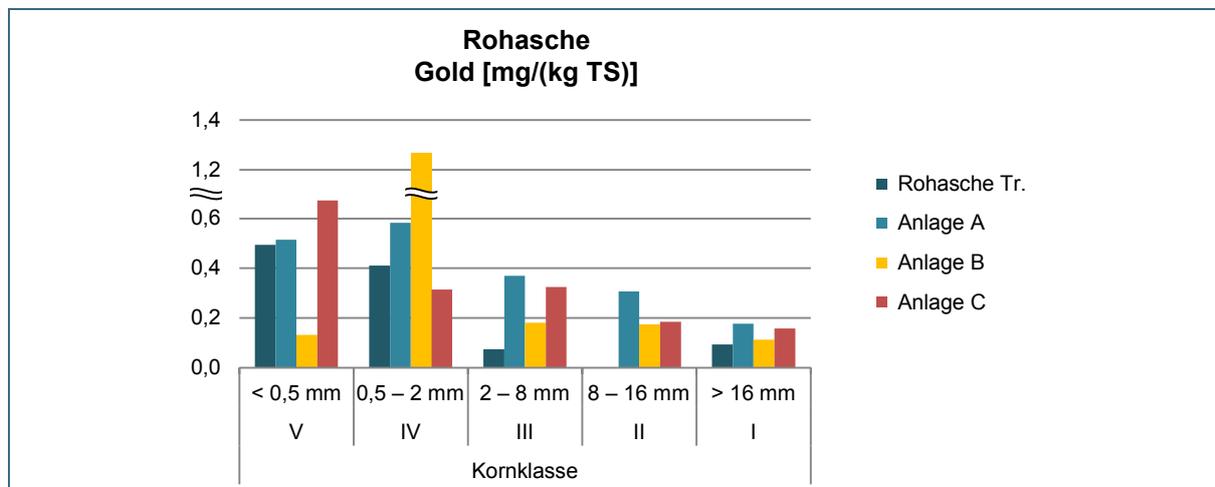


Abb. 80: Berechnete Verteilung von Gold auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

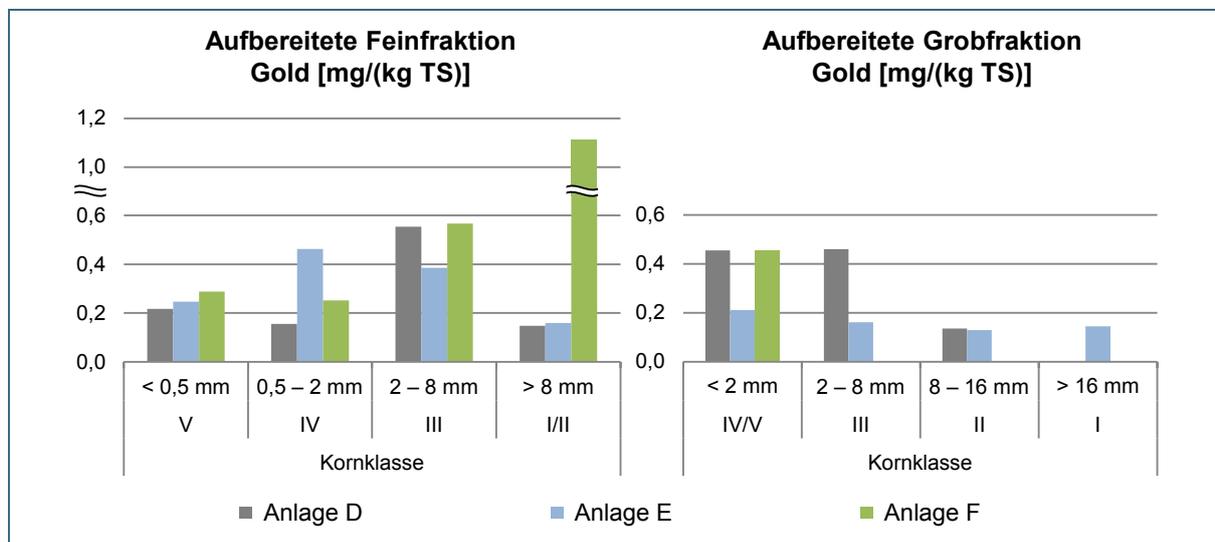


Abb. 81: Berechnete Verteilung von Gold auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

7.4.12 Gruppe 12: Zink, Cadmium

Zink

Zink kommt in der Natur nur in Form von Verbindungen vor, oftmals mit Blei und Cadmium vergesellschaftet. Sein Anteil in der Erdkruste wird auf 0,12 % geschätzt.

Im Jahr 2013 betrug die Weltproduktion an Zink rund 13,4 Mio. Mg, wobei die drei Hauptförderländer China (37 %), Australien (11 %) und Peru (10 %) sind. Abbauwürdige Erze enthalten etwa 2 – 4 % Zink [77]. Zink dient vor allem als Schutz gegen Korrosion (Feuerverzinken, galvanisch Verzinken von nicht korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen). Verzinkte Bleche und Bauteile haben ein breites Einsatzfeld im Fahrzeugbau sowie in der Bauindustrie. Daneben ist Zink ein wichtiger Bestandteil zur Herstellung von Legierungen, Pigmenten, galvanischen Elementen.

Die Abb. 82 zeigt die Gesamtgehalte von Zink in den untersuchten Wochenmischproben. In den Ascheproben wurde die niedrigste Konzentration in der Probe der Rohasche trocken der Anlage A gemessen. Die Proben der Anlage C enthalten mit etwa 10.000 mg/(kg TS) die höchsten Zinkgehalte und erreichen den LAGA-Anhaltswert [31]. In den aufbereiteten Feinfraktionen weisen die mineralischen gegenüber den magnetischen Teilproben höhere Gehalte auf, wohingegen in den Proben der Grobfraktionen die magnetischen Teilproben mehr Zink enthalten.

Sowohl in den Rohaschen (Abb. 83) als auch in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen (Abb. 84) ist die Anreicherung von Zink in den kleinen Kornklassen deutlich zu erkennen. Diese Anreicherung ist in der Literatur bekannt [33, 61] und konnte hiermit bestätigt werden. Die höchsten Zinkgehalte weisen die Proben der Anlage C auf.

Die oben genannten Zinkgehalte von abbauwürdigen Lagerstätten werden von den Ascheproben nicht erreicht.

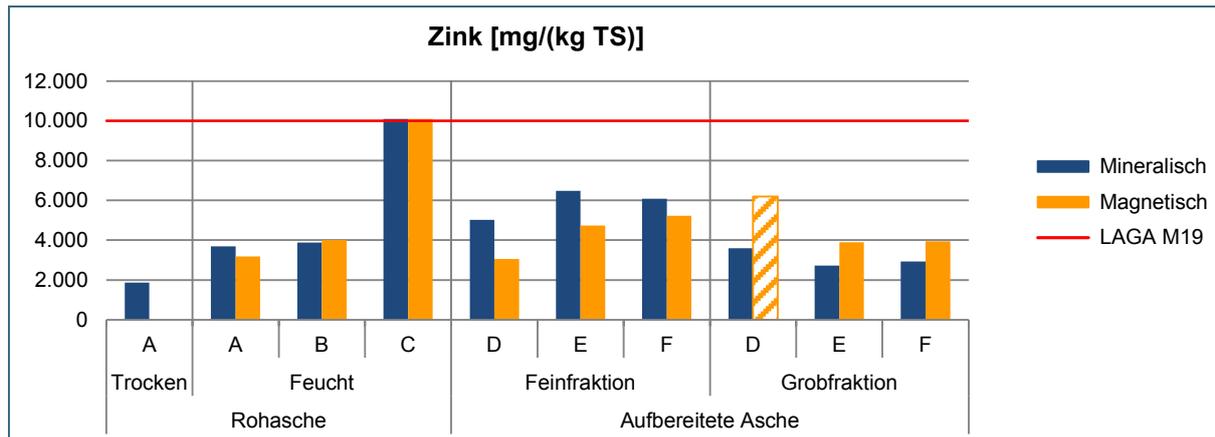


Abb. 82: Zinkgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Schraffierte Säule: Ausreißer. Rote Linie: LAGA-Anhaltswert [31]

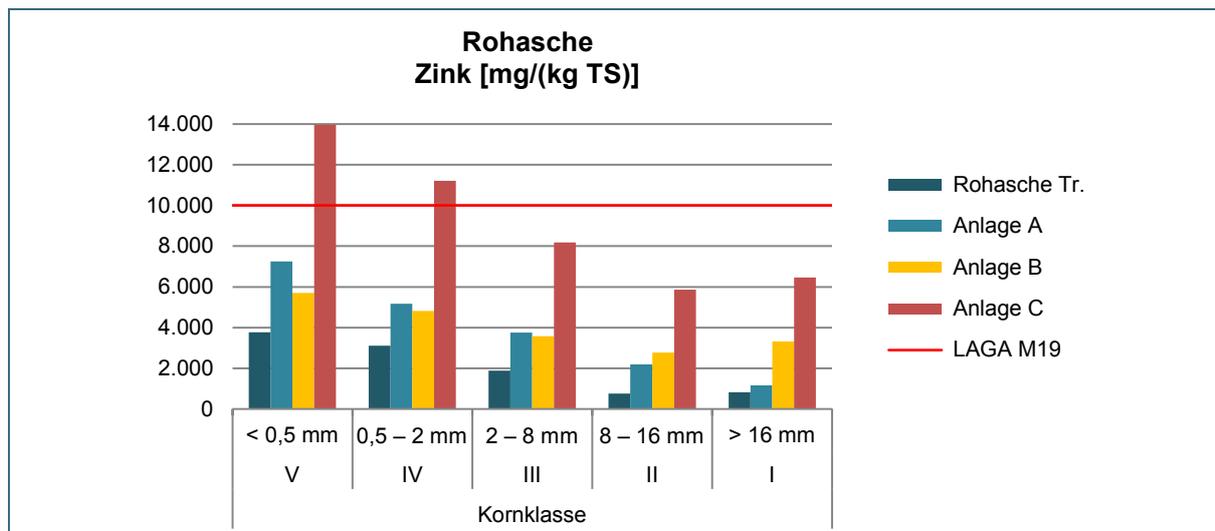


Abb. 83: Berechnete Verteilung von Zink auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. Rote Linie: LAGA-Anhaltswert [31]

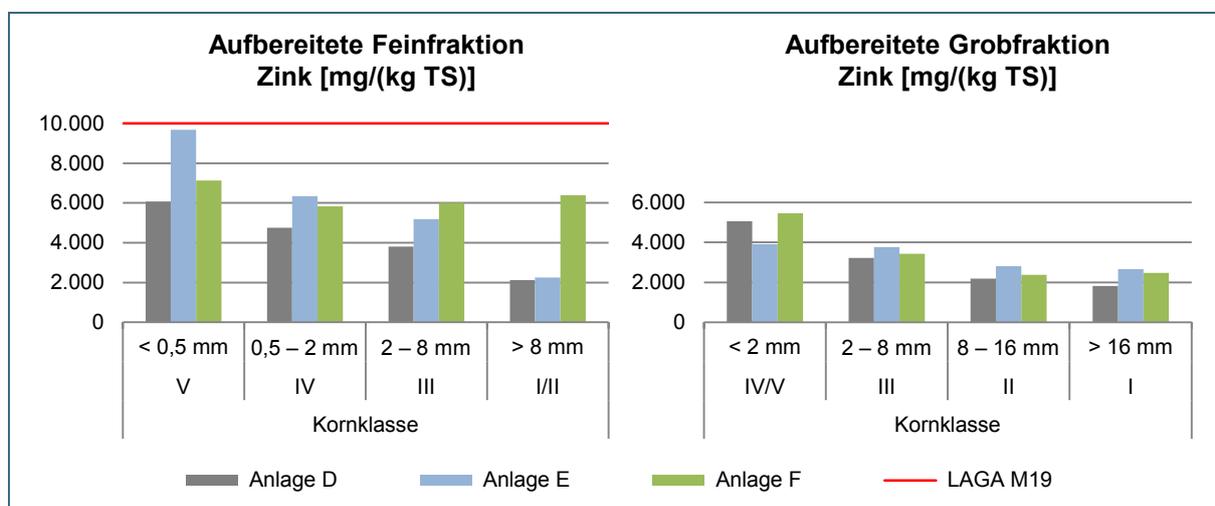


Abb. 84: Berechnete Verteilung von Zink auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F. Rote Linie: LAGA-Anhaltswert [31]

Cadmium

Cadmium kommt in der Natur sehr häufig zusammen mit Zink als Cadmiumsulfid oder -carbonat vor. Sein Anteil an der Erdkruste liegt bei 0,0005 ‰.

Im Jahr 2013 wurden weltweit (ohne USA und Italien) etwa 22.000 Mg Cadmium vor allem als Nebenprodukt der Zinkgewinnung produziert. Das toxische Metall wird als äußerst beständiger Korrosionsschutz von Stahl und Aluminium (z. B. Flugzeugbau), zur Herstellung von Batterien, Leuchtstoffen, Halbleitern etc. verwendet. Aufgrund seiner Toxizität wird es vermehrt durch umweltverträglichere Stoffe substituiert [3].

Die Abb. 85 zeigt die Cadmiumgehalte in den mineralischen und magnetischen Wochenmischproben. Sie liegen bei den mineralischen Teilproben zwischen 3 und 16 mg/(kg TS), bei den magnetischen zwischen 2 und 14 mg/(kg TS) (ohne Ausreißer: Werte der Teilproben über den Werten der zugehörigen Kornklassen). In den Feinfraktionen der Anlagen E und F werden relativ hohe Cadmiumwerte gemessen. Eine klare Tendenz, ob sich Cadmium in der mineralischen oder der magnetischen Teilprobe anreichert, ist nicht erkennbar.

In den untersuchten Rohaschen (vergleiche Abb. 86) und den aufbereiteten Fein- und Grobfraktionen (vergleiche Abb. 87) ist die Anreicherung von Cadmium in den Kornklassen mit kleinen Partikelgrößen deutlich zu beobachten. Die Kornklassen V und IV der Feinfraktion der Anlage E sowie die Kornklasse II der Grobfraktion der Anlage D besitzen einen hohen Cadmiumgehalt und überschreiten den LAGA-Anhaltswert von 20 mg/(kg TS) [31].

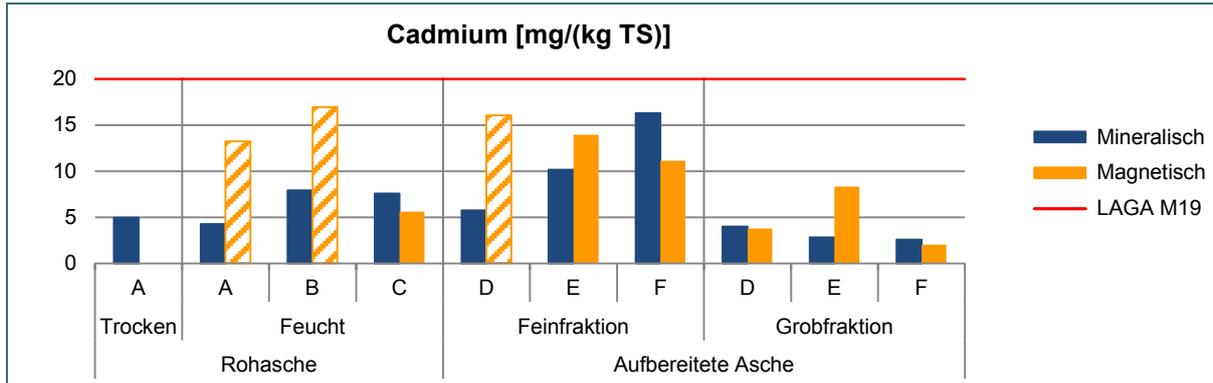


Abb. 85: Cadmiumgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Schraffierte Säulen: Ausreißer. Rote Linie: LAGA-Anhaltswert [31]

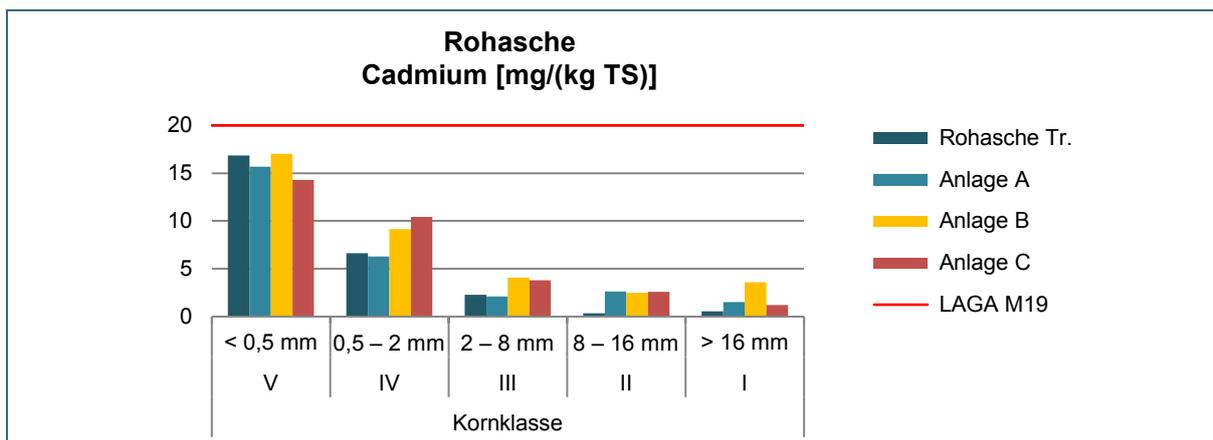


Abb. 86: Berechnete Verteilung von Cadmium auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. Rote Linie: LAGA-Anhaltswert [31]

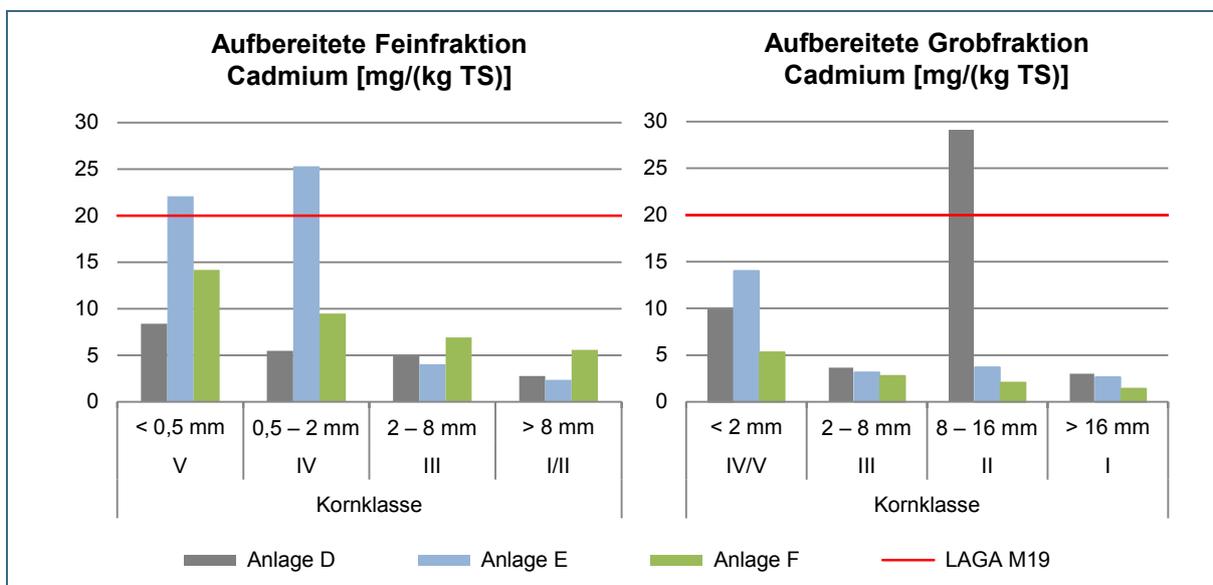


Abb. 87: Berechnete Verteilung von Cadmium auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F. Rote Linie: LAGA-Anhaltswert [31]

7.4.13 Gruppe 13: Aluminium

Aluminium ist mit einem Anteil von 8,13 % nach Sauerstoff und Silizium das dritthäufigste Element und das häufigste Metall der Erdrinde. Rund 70 % der gesteinsbildenden Minerale sind Aluminiumsilikate.

Das Metall wird hauptsächlich aus Bauxit gewonnen. Bauxit kann bis zu 65 % an Aluminiumoxid enthalten. Im Jahr 2013 wurden 283 Mio. Mg Bauxit abgebaut und rund 48 Mio. Mg Aluminium hergestellt. Die drei größten Abbauländer von Bauxit sind Australien (29 %), Indonesien (20 %) und China (16 %).

Aluminium besitzt neben seinem geringen spezifischen Gewicht diverse positive Eigenschaften in Bezug auf seine Verarbeitung und Beständigkeit, die ein breites Einsatzspektrum zulassen. Es reicht vom Flugzeug- und Fahrzeugbau, der Elektrotechnik (hohe elektrische Leitfähigkeit) über das Bauwesen (z. B. Fassaden) bis hin zu Aluminiumfolien (z. B. Verpackungen) und -pulvern.

Die Abb. 88 zeigt die Anreicherung von Aluminium in den mineralischen Teilproben. In der mineralischen Grobfraktion der Anlage F wurde ein höherer Wert gemessen als in den zugehörigen Kornklassen; daher wurde die Teilprobe als Ausreißer markiert. Innerhalb der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben gibt es nur leichte Schwankungen der Aluminiumkonzentration. Die Werte liegen in den mineralischen Teilproben zwischen 35.000 und 49.100 mg/(kg TS) und in den magnetischen Teilproben zwischen 29.800 und 40.600 mg/(kg TS).

Die Verteilung von Aluminium auf die Kornklassen zeigt ein mehr oder weniger indifferentes Bild. Sowohl in den Rohaschen (Abb. 89) als auch den Grobfraktionen (Abb. 90) ist keine eindeutige Abhängigkeit der Aluminiumkonzentrationen von der Korngröße erkennbar.

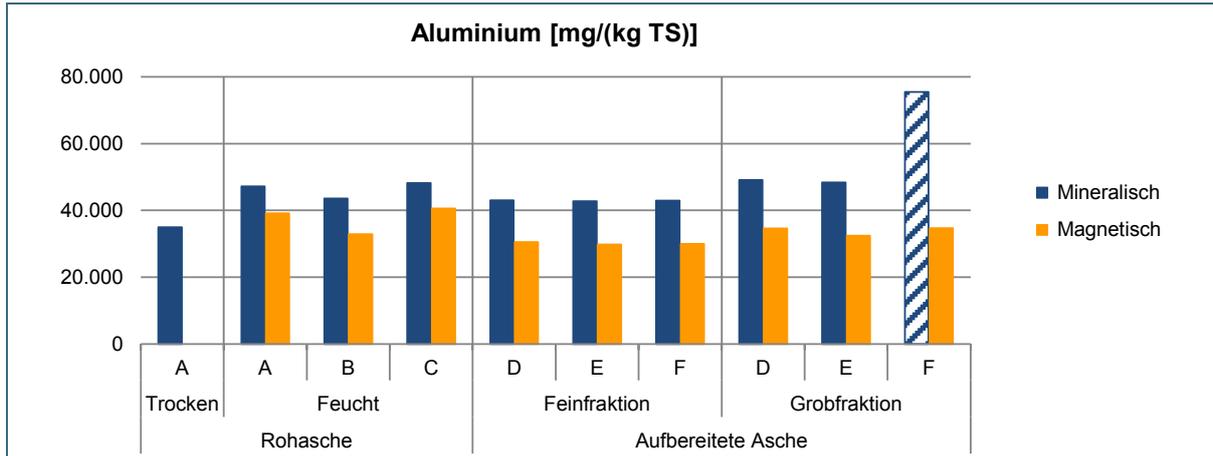


Abb. 88: Aluminiumgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Schraffierte Säule: Ausreißer

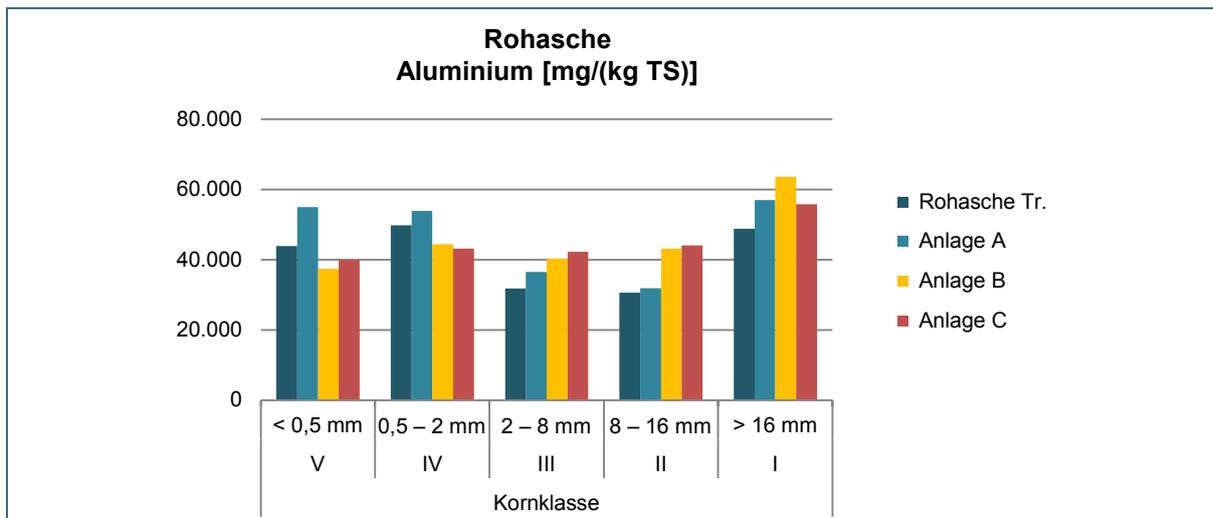


Abb. 89: Berechnete Verteilung von Aluminium auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

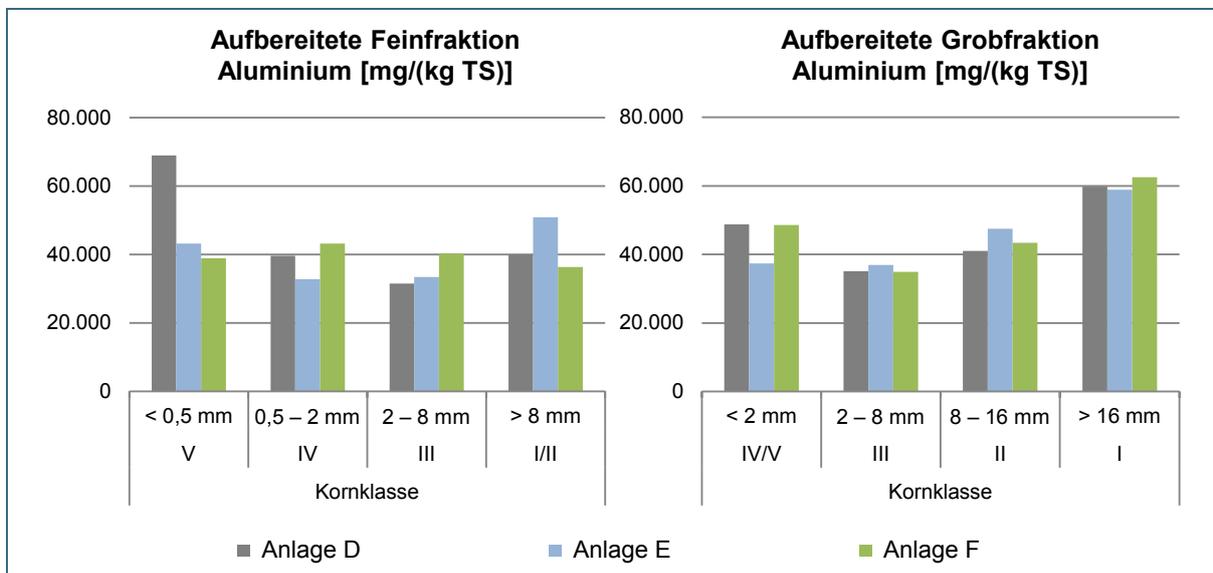


Abb. 90: Berechnete Verteilung von Aluminium auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

7.4.14 Gruppe 14: Silizium, Blei

Silizium

Silizium kommt in der Natur als Siliziumdioxid (Sand, Quarz) oder in Form von Silikaten vor. Es ist mit einem Anteil von 26,3 % das zweithäufigste Element der Erdrinde.

Die weltweite Produktionsmenge 2013 von Silizium wird auf circa 7,9 Mio. Mg geschätzt. China hat einen Anteil von 66 %, an zweiter Stelle liegt Russland mit 9 %. Hochreines Silizium (Einkristalle) ist ein zentraler Werkstoff in der Halbleitertechnik und Mikroelektronik. Außerdem wird es wegen seiner Fähigkeit, Strahlungs- in elektrische Energie umzuwandeln, zur Herstellung von Solarmodulen verwendet. Großtechnisch findet Silizium breiten Einsatz als Legierungsbestandteil sowie als siliziumorganische Verbindung als Dichtungsmasse (Silicon).

In Abb. 91 fällt die Anreicherung von Silizium in den mineralischen Wochenmischproben auf. Die Gehalte liegen zwischen 152.000 und 264.000 mg/(kg TS) in den mineralischen und zwischen 98.400 und 174.000 mg/(kg TS) in den magnetischen Teilproben.

Die Konzentration des Siliziums steigt mit zunehmender Partikelgröße. Dies ist sowohl in den Rohaschen (vergleiche Abb. 92) als auch in den aufbereiteten Fein- und Grobfraktionen (vergleiche Abb. 93) zu erkennen und stimmt mit den Beobachtungen von Deike et al. [61] überein.

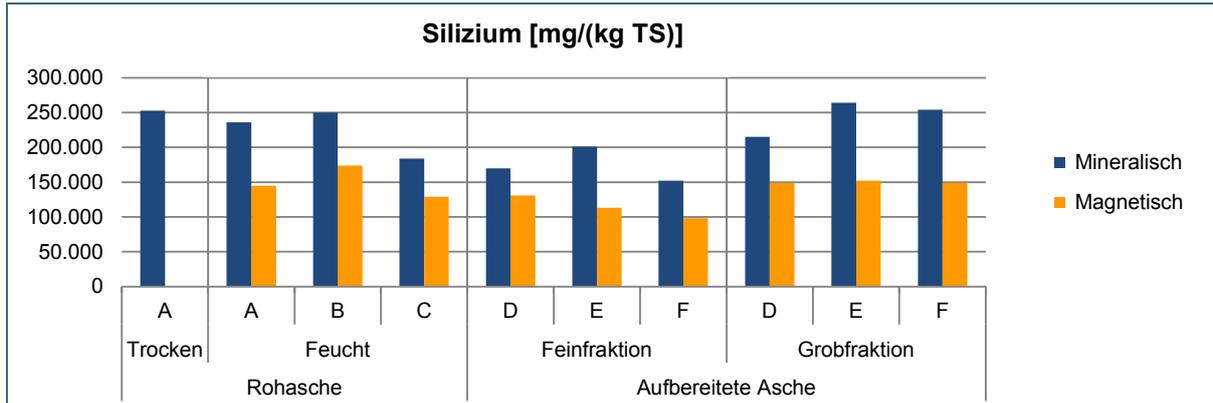


Abb. 91: Siliziumgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

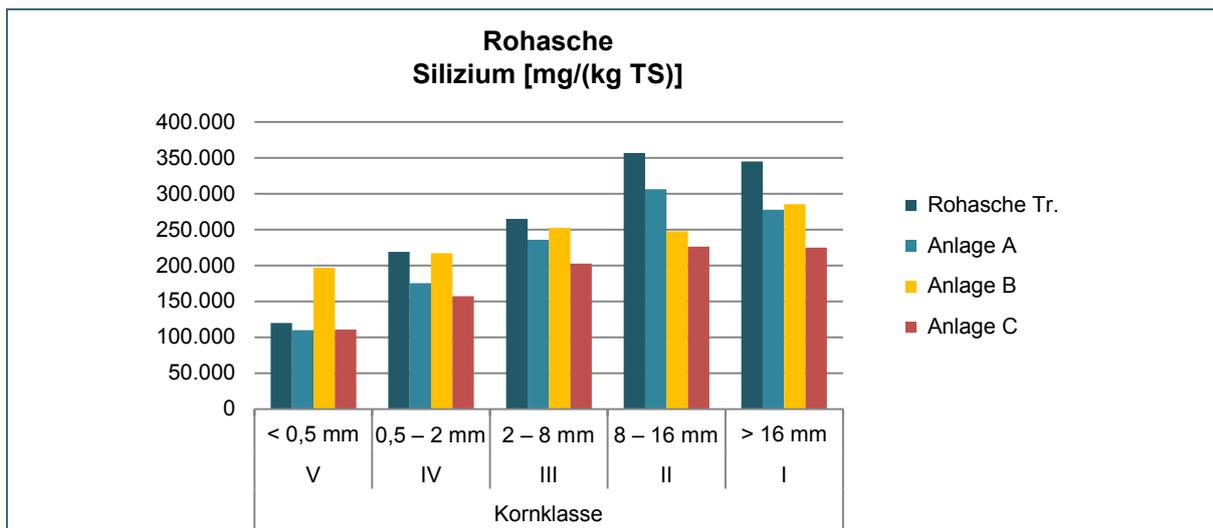


Abb. 92: Berechnete Verteilung von Silizium auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

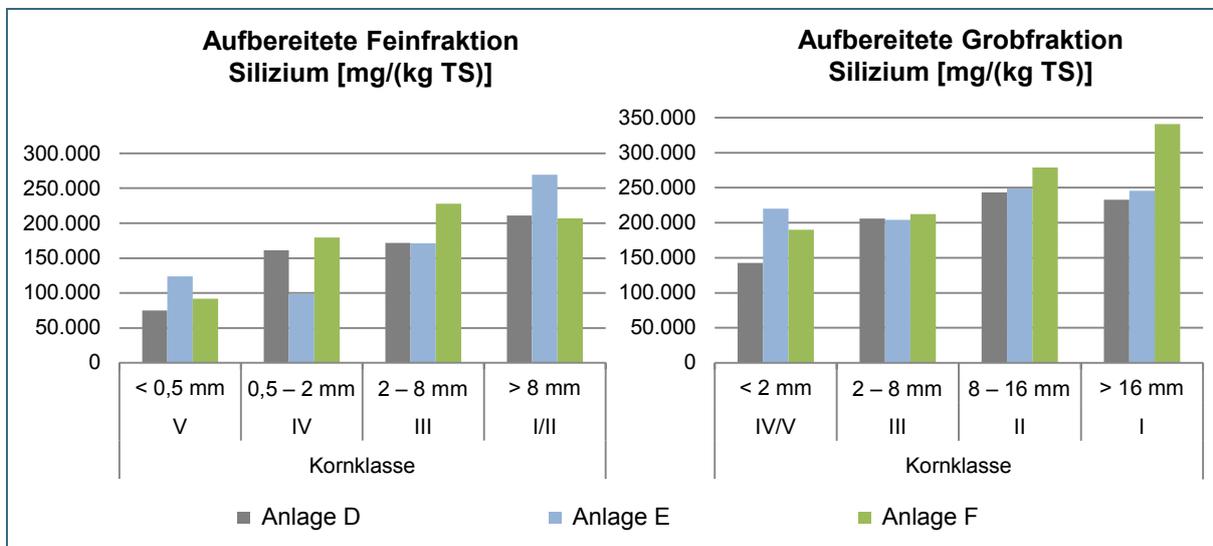


Abb. 93: Berechnete Verteilung von Silizium auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Blei

Blei kommt überwiegend als Verbindung im Mineral Galenit (Bleisulfid) vor. In der Erdkruste liegt sein Gehalt bei 0,018 ‰.

Im Jahr 2013 belief sich die weltweite Herstellung von Blei auf circa 5,5 Mio. Mg. Wichtigste Produktionsländer sind China mit einem Anteil von circa 53 % und Australien mit 13 %.

Blei wird zur Herstellung von Akkumulatoren und Legierungen, zur Herstellung von Behältern für aggressive Flüssigkeiten und in Munition verwendet. Im Strahlenschutz wird es zur Abschirmung von Gamma- und Röntgenstrahlen eingesetzt. Bleiverbindungen dienen z. B. als Farbpigmente. Aufgrund seiner Toxizität ist der Einsatz von Blei in bestimmten Bereichen verboten (z. B. als Wuchtgewicht, Antiklopfmittel), daher wird es vermehrt durch andere Stoffe ersetzt.

In Abb. 94 sind die Bleigehalte in den mineralischen und magnetischen Wochenmischproben dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Konzentrationen in den mineralischen Teilproben höher sind als in den magnetischen. Am größten ist der Unterschied in den Teilproben der Anlage D. Während die Bleigehalte in den anderen Teilproben zwischen 400 und 1.200 mg/(kg TS) liegen, wurden in den mineralischen Teilproben (Fein-, Grobfraction) der Anlage D Werte von über 2.300 mg/(kg TS) gemessen.

In den Rohaschen der Anlagen A, B und C (vergleiche Abb. 94) ist Blei relativ gleichmäßig mit circa 1.000 mg/(kg TS) über die Kornklassen verteilt.

In den aufbereiteten Fein- und Grobfractionen ist die hohe Bleikonzentration der Proben der Anlage D deutlich zu erkennen. In der Kornklasse I/II (> 8 mm) liegt der höchste Wert bei über 5.000 mg/(kg TS).

Der LAGA-Anhaltswert für Blei von 6.000 mg/(kg TS) [31] wird von keiner Ascheprobe erreicht.

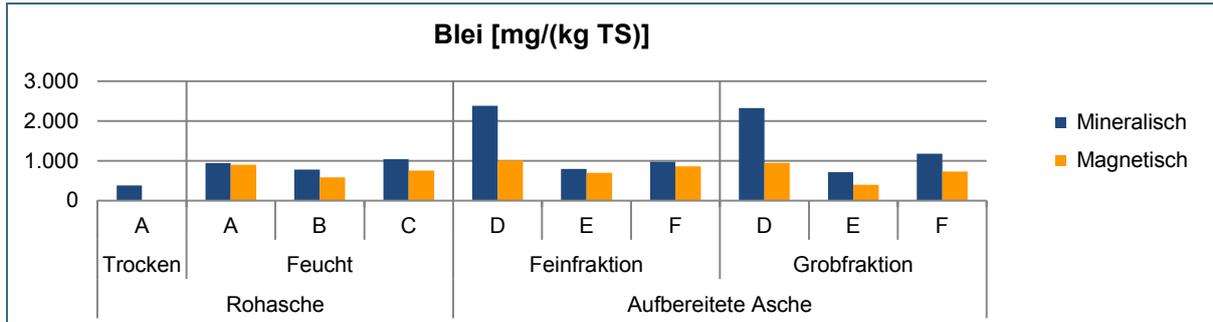


Abb. 94: Bleigehalten der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

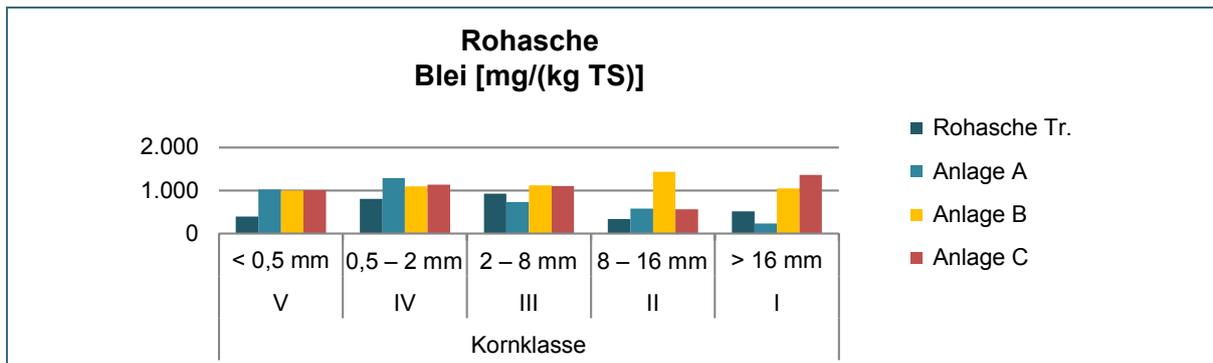


Abb. 95: Berechnete Verteilung von Blei auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

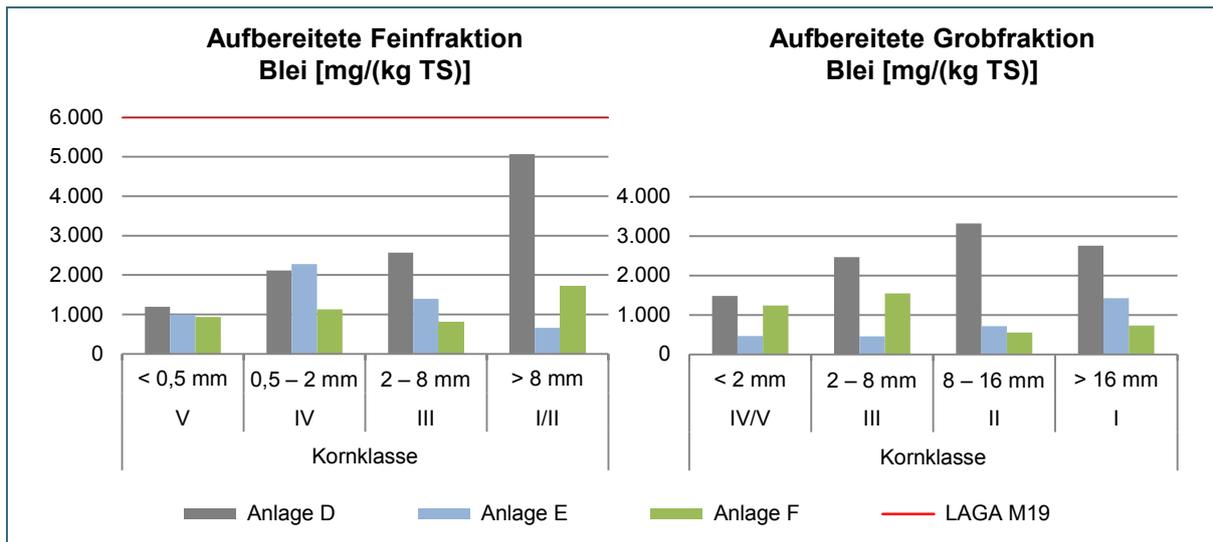


Abb. 96: Berechnete Verteilung von Blei auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F. Rote Linie: LAGA-Anhaltswert [31]

7.4.15 Gruppe 15: Phosphor, Arsen, Antimon, Bismut

Phosphor

Phosphor ist in der Erdkruste – überwiegend als Apatit und Phosphorit – mit 0,1 % enthalten.

Die jährliche Phosphatgewinnung betrug im Jahr 2013 225 Mio. Mg, wobei China (mindestens 48 %), USA (14 %) und Marokko (12 %) die Hauptförderländer sind.

Phosphor wird vor allem zur Herstellung von Phosphorsäure und verschiedenen Phosphaten verwendet, um daraus Düngemitteln zu gewinnen. Ferner wird (roter) Phosphor zur Herstellung von Zündhölzern bzw. Reibflächen für Zündhölzer benötigt.

In den untersuchten Wochenmischproben (vergleiche Abb. 97) ist in den Rohaschen sowie den Feinfraktionen eine Anreicherung von Phosphor in den mineralischen Teilproben zu erkennen. In den Grobfraktionen sind die Gehalte sehr ähnlich. Die Phosphorkonzentrationen liegen in den mineralischen Teilproben zwischen 3.200 und 7.000 mg/(kg TS) und in den magnetischen Teilproben zwischen 3.100 und 6.300 mg/(kg TS).

Die Phosphorkonzentration nimmt sowohl in den untersuchten Rohaschen (vergleiche Abb. 98) als auch in den Fein- und Grobfraktionen (vergleiche Abb. 99) mit abnehmender Partikelgröße zu. In fast allen Kornklassen enthält die aufbereitete Asche (Fein-, Grobfraktion) der Anlage E weniger Phosphor als die Aschen der Anlagen D und F.

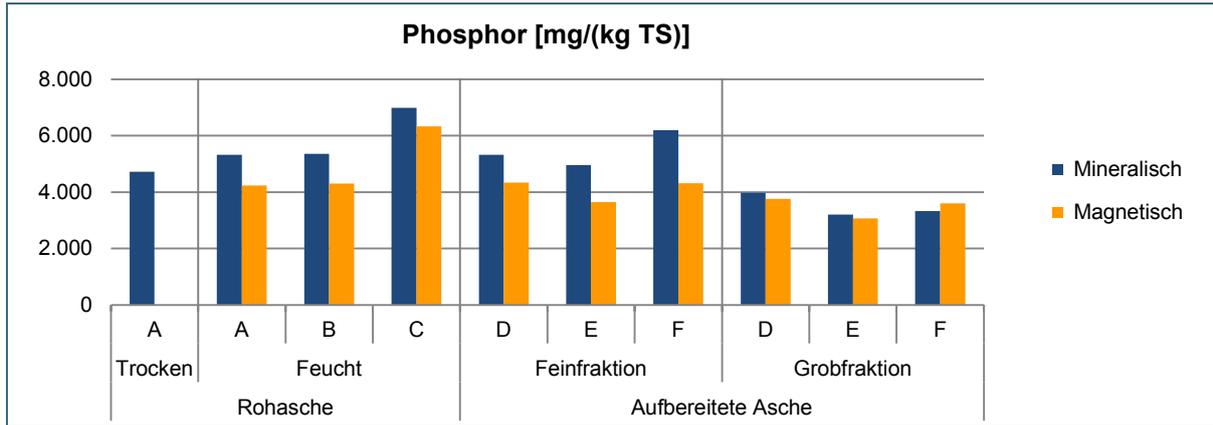


Abb. 97: Phosphorgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

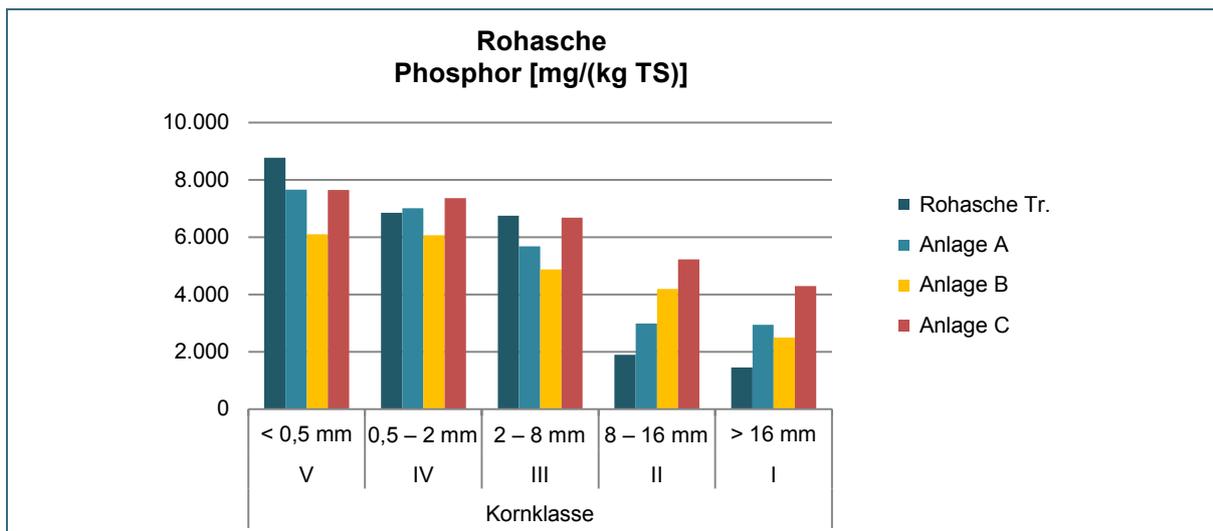


Abb. 98: Berechnete Verteilung von Phosphor auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

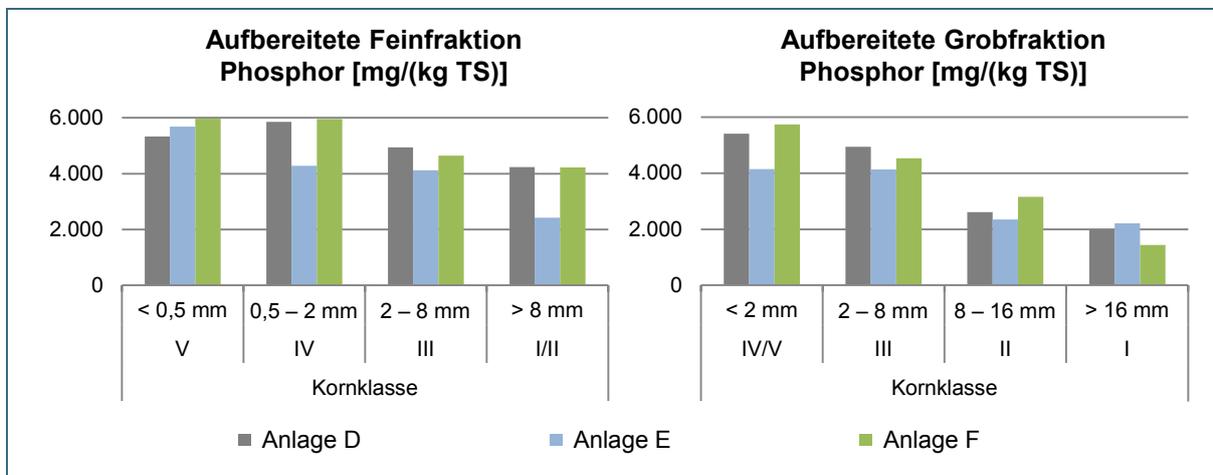


Abb. 99: Berechnete Verteilung von Phosphor auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Arsen

Arsen kommt in der Erdkruste vor allem sulfidisch gebunden vor. Der Gehalt liegt in einem Bereich von 0,001 bis 0,002 ‰.

Die wichtigsten Förderländer für Arsentrioxid waren im Jahr 2013 China (55 %), Chile (22 %) und Marokko (17 %). Arsen findet Anwendung als härtesteigernder Legierungszusatz, bei der Herstellung von Halbleitern in der Elektronikindustrie. Dreiwertige Arsenverbindungen werden aufgrund ihrer toxischen Wirkung teilweise als Schädlingsbekämpfungsmittel verwendet.

In Abb. 100 ist die Anreicherung von Arsen in den magnetischen Teilproben deutlich zu erkennen. Die Konzentrationen liegen in den mineralischen Teilproben zwischen 5 (ohne Rohasche trocken) und 11 mg/(kg TS) und in den magnetischen zwischen 12 und 22 mg/(kg TS).

In der Asche der Anlage C steigen die Arsengehalte mit abnehmender Partikelgröße (vergleiche Abb. 101) auf bis zu 19 mg/(kg TS). In den anderen Rohaschen ist der Trend deutlich schwächer ausgeprägt. In den Fein- und Grobfraktionen der Anlagen E und F besitzen die kleinsten Kornklassen die höchsten Arsengehalte, während bei der Anlage D Arsen relativ gleichmäßig auf die einzelnen Kornklassen verteilt ist (vergleiche Abb. 102).

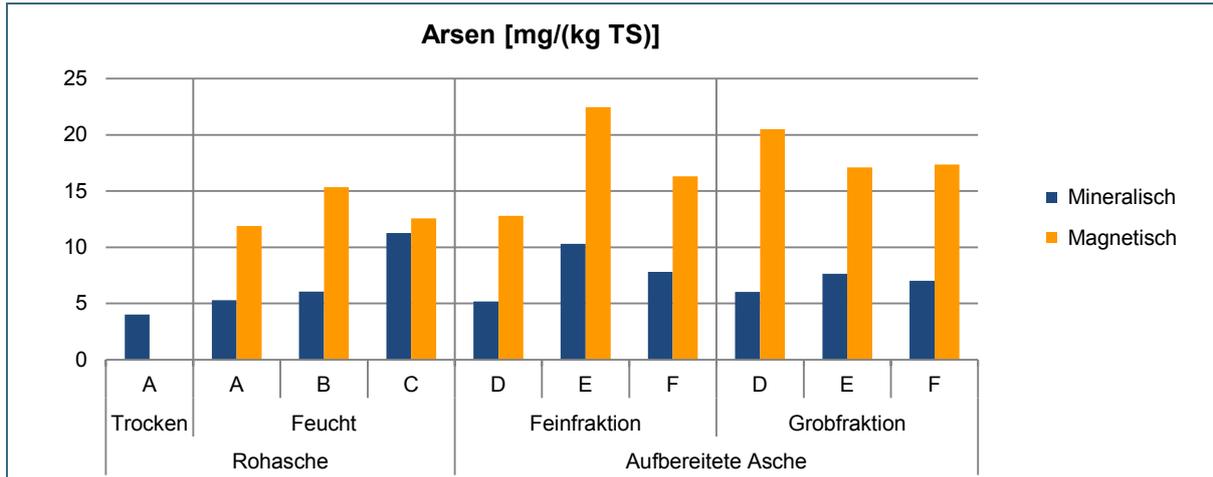


Abb. 100: Arsengehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

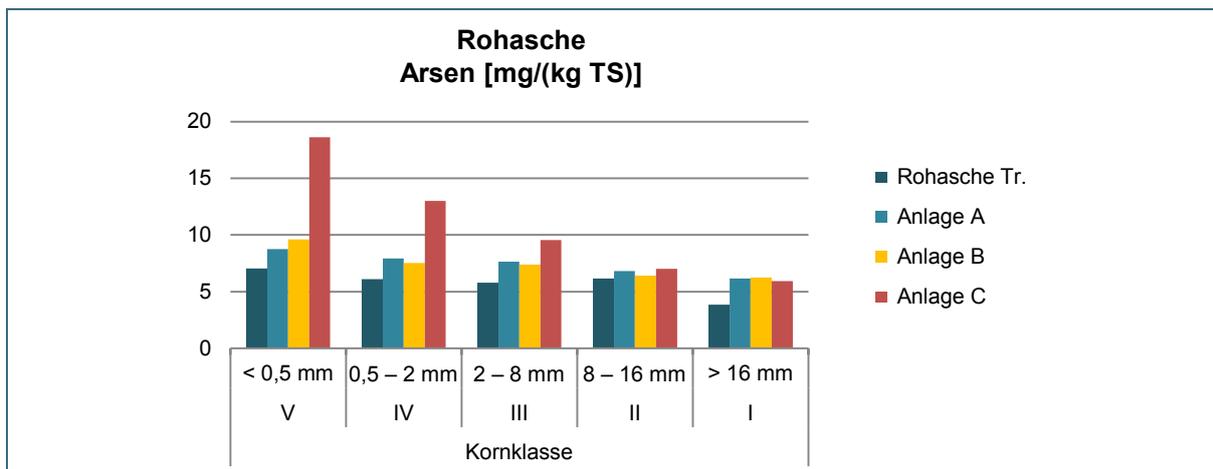


Abb. 101: Berechnete Verteilung von Arsen auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

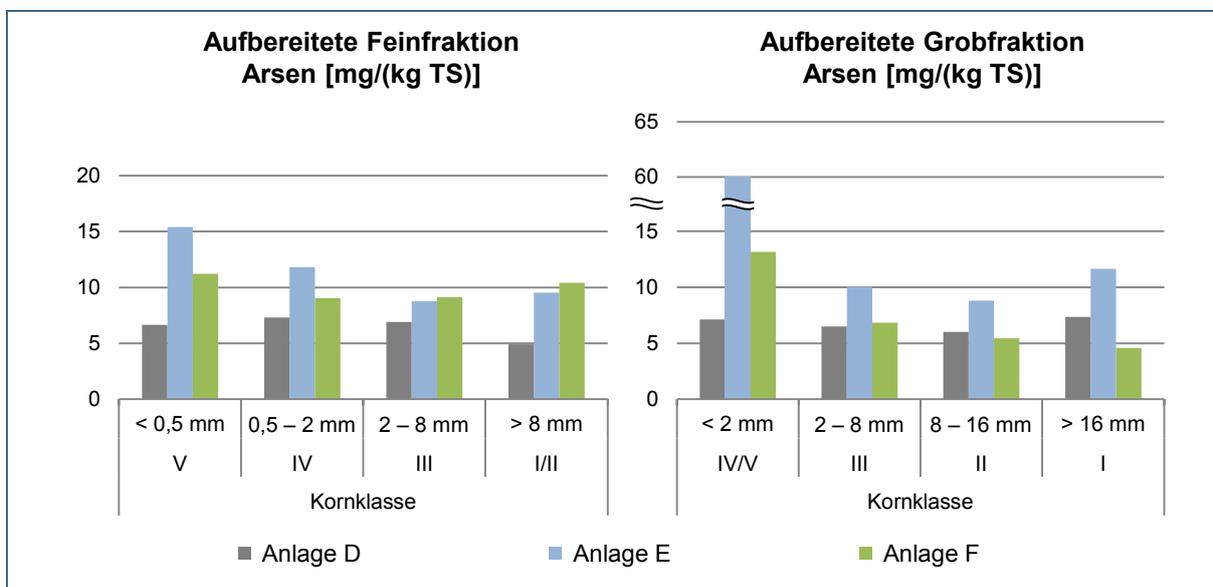


Abb. 102: Berechnete Verteilung von Arsen auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Antimon

Antimon ist in der Erdkruste mit einem Wert von 0,001 ‰ enthalten. Es kommt gelegentlich gediegen, meist als sulfidisches Erz vor.

Weltweit wurden im Jahr 2013 etwa 154.000 Mg Antimon produziert. Hauptförderland ist China mit einem Anteil von 78 %. Das spröde Halbmetall wird zur Steigerung der Härte von weichen Metallen wie Zinn- und Bleilegierungen eingesetzt.

Die Abb. 103 zeigt die Konzentrationen von Antimon in den mineralischen und magnetischen Wochenmischproben. Die Proben der Anlage C enthalten eine vergleichsweise hohe Antimonmenge mit Werten von 181 und 192 mg/(kg TS). Bei den Grobfractionen ist der Antimongehalt in den magnetischen Teilproben jeweils (Anlage D: deutlich) höher als in den mineralischen Teilproben.

Die berechneten Antimongehalte steigen mit abnehmender Korngröße sowohl in den Rohaschen (vergleiche Abb. 104) als auch in den Fein- und Grobfractionen der aufbereiteten Aschen (vergleiche Abb. 105). Diese Tendenz des Antimons wurde auch von Deike et al. beobachtet [61]. Mit Ausnahme der Anlage B ist bei allen Rohaschen in der Kornklasse II am wenigsten Antimon enthalten. Die hohen Gehalte in der Asche der Anlage C sind in allen Kornklassen zu erkennen.

Bei den aufbereiteten Fein- und Grobfractionen werden die Unterschiede zwischen den einzelnen Anlagen zu kleineren Korngrößen hin größer.

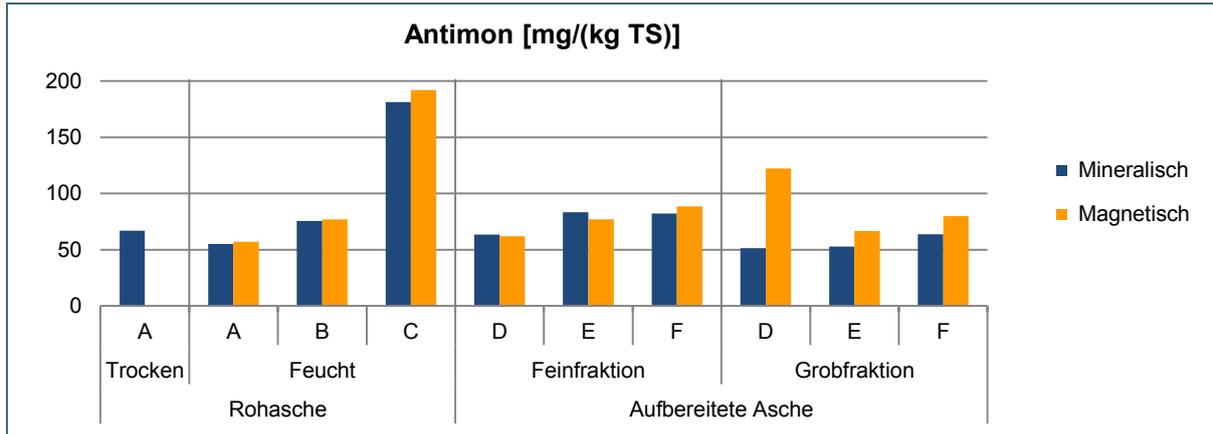


Abb. 103: Antimongehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

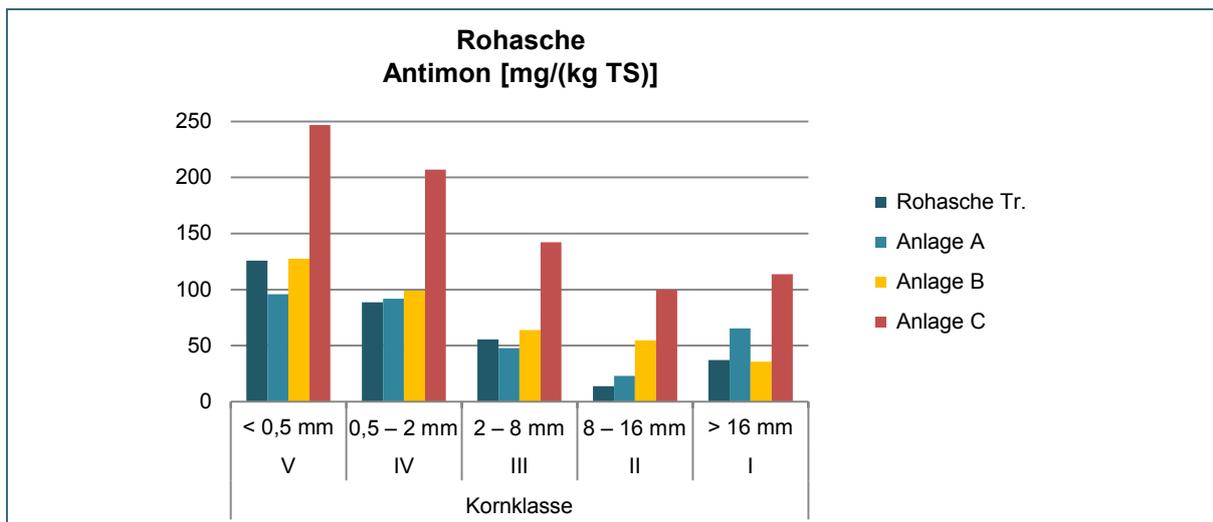


Abb. 104: Berechnete Verteilung von Antimon auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

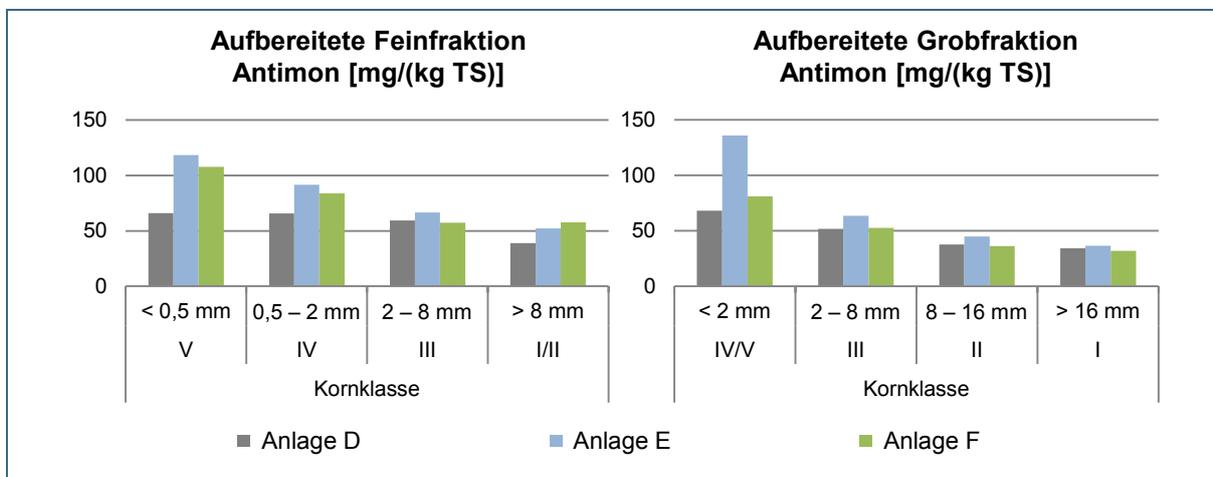


Abb. 105: Berechnete Verteilung von Antimon auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Bismut

Der Anteil von Bismut an der Erdkruste beträgt 0,0002 ‰. Es kommt in der Natur sowohl gediegen (elementar) als auch in Form von Sulfiden, Seleniden und Oxiden vor.

Im Jahr 2013 wurden weltweit circa 8.400 Mg Bismut abgebaut, wobei China (im Jahr 2013 mit 89 %) das Hauptproduktionsland ist.

Das Metall wird hauptsächlich zur Herstellung von leichtschmelzenden Legierungen (z. B. in Schmelzsicherungen), in der Photo- und Thermoelektrizität (z. B. als Peltier-Element) und Bismutverbindungen für pharmazeutische Zwecke verwendet.

In Abb. 106 ist zu erkennen, dass in den mineralischen und magnetischen Teilproben der Anlage C mit 14 bzw. 11 mg/(kg TS) vergleichsweise hohe Bismutgehalte enthalten sind. Demgegenüber liegen bei den anderen Anlagen die Konzentrationen zwischen 2 und 6 mg/(kg TS).

Die Roh- (vergleiche Abb. 107) und aufbereiteten Aschen (vergleiche Abb. 108) zeigen tendenziell eine Abhängigkeit der Bismutkonzentration von der Partikelgröße. Je kleiner die Partikel sind, desto höher der Bismutgehalt (im Folgenden unberücksichtigt: Probe Rohasche trocken). Wie bereits in den Gehalten der ungesiebten Teilproben zu erkennen, stechen die Werte der Probe der Anlage C in allen Kornklassen hervor: In der Kornklasse V wurde ein Bismutgehalt von 29 mg/(kg TS) gemessen. Die Werte in den anderen Roh- und aufbereiteten Aschen liegen unterhalb von 10 mg/(kg TS).

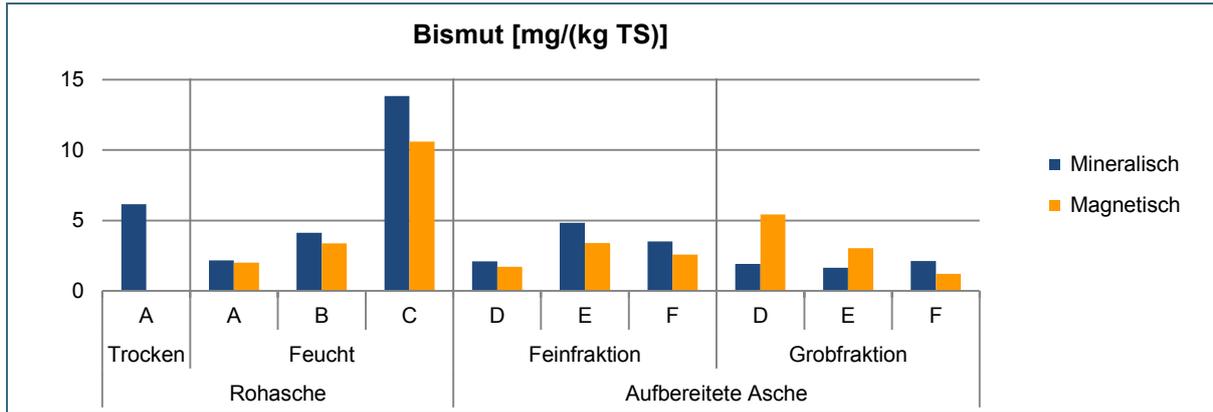


Abb. 106: Bismutgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

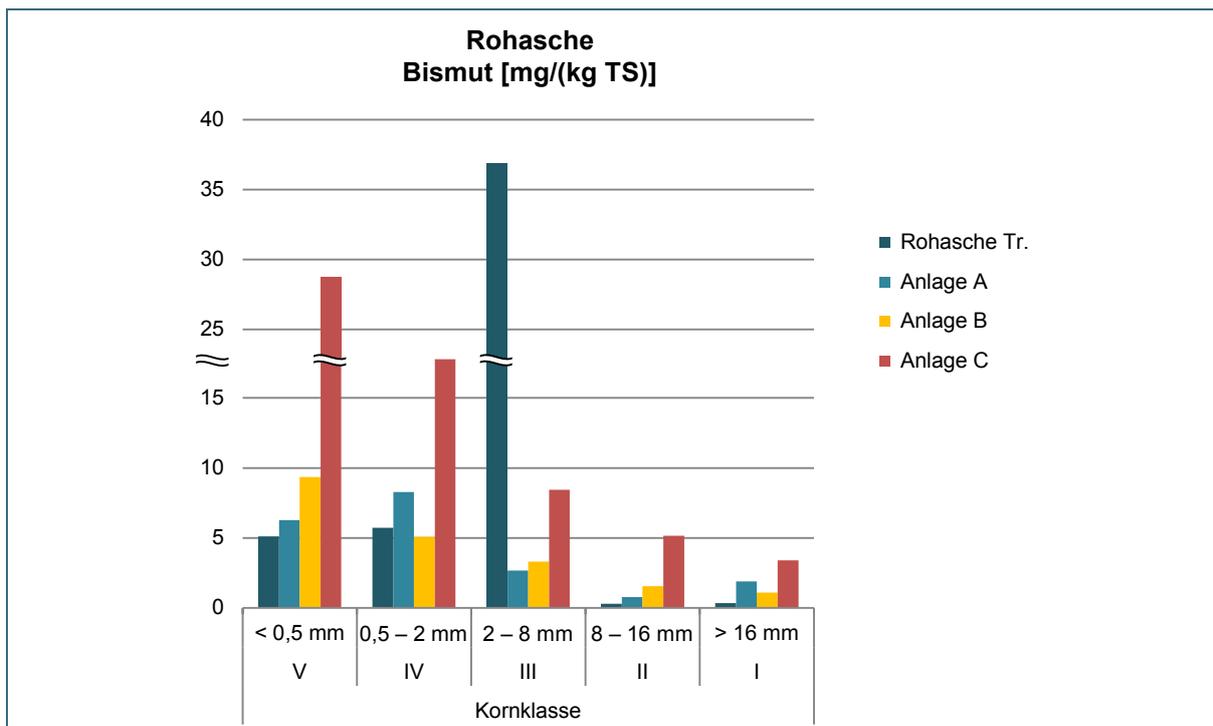


Abb. 107: Berechnete Verteilung von Bismut auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

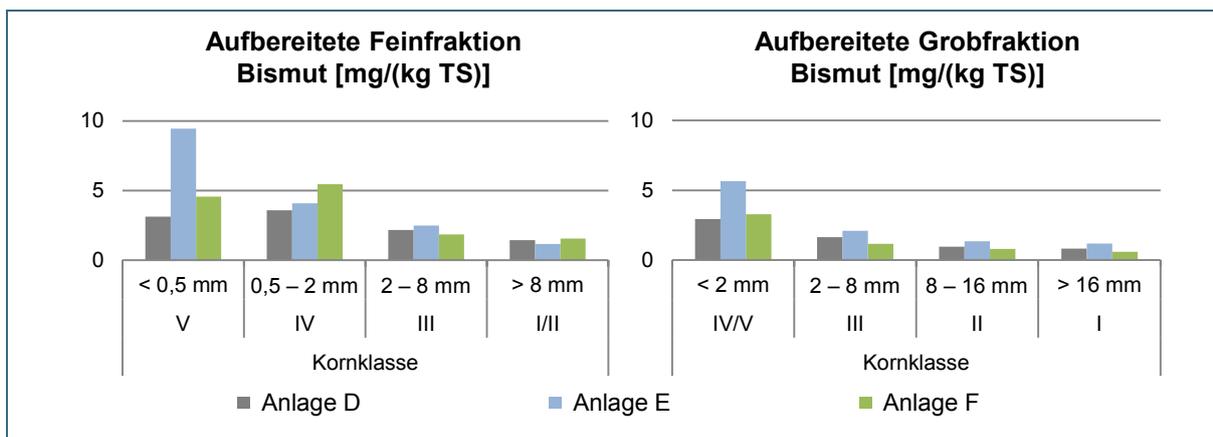


Abb. 108: Berechnete Verteilung von Bismut auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

7.4.16 Gruppe 16: Schwefel

Schwefel kommt in der Natur elementar oder gebunden in Form von Sulfiden oder Sulfaten vor und macht einen Anteil von 0,48 ‰ der Erdkruste aus.

Die jährliche Produktion betrug im Jahr 2013 rund 70,4 Mio. Mg. Ein Großteil des Schwefels wird zur Herstellung von Schwefelsäure – vor allem für die Düngemittelherstellung – verwendet. Daneben wird Schwefel in der Cellulose-, Kautschuk- (Vulkanisation), chemischen Industrie (z. B. Pflanzenschutz-, Arzneimittel) benötigt.

Die Schwefelgehalte in den untersuchten Wochenmischproben sind in Abb. 109 dargestellt. Bis auf eine Ausnahme zeigt sich bei fast allen Anlagen in den mineralischen Teilproben ein höherer Schwefelgehalt als in den magnetischen. Die Gehalte der Feinfraktionen sind generell höher (maximal 105 %) als die der Grobfraktionen. Am meisten Schwefel ist mit bis zu 30.000 mg/(kg TS) in den Teilproben der Anlage C enthalten.

Die Anreicherung von Schwefel in den Kornklassen kleiner Partikelgrößen ist in den Rohaschen (vergleiche Abb. 110) und in den aufbereiteten Aschen (vergleiche Abb. 111) zu erkennen und wurde auch bei den Untersuchungen von Deike et al. [61] an aufbereiteter Asche beobachtet. In der Asche der Anlage C wurde in der Größenfraktion < 0,5 mm ein Schwefelgehalt von 52.500 mg/(kg TS) (5,3 %) gemessen.

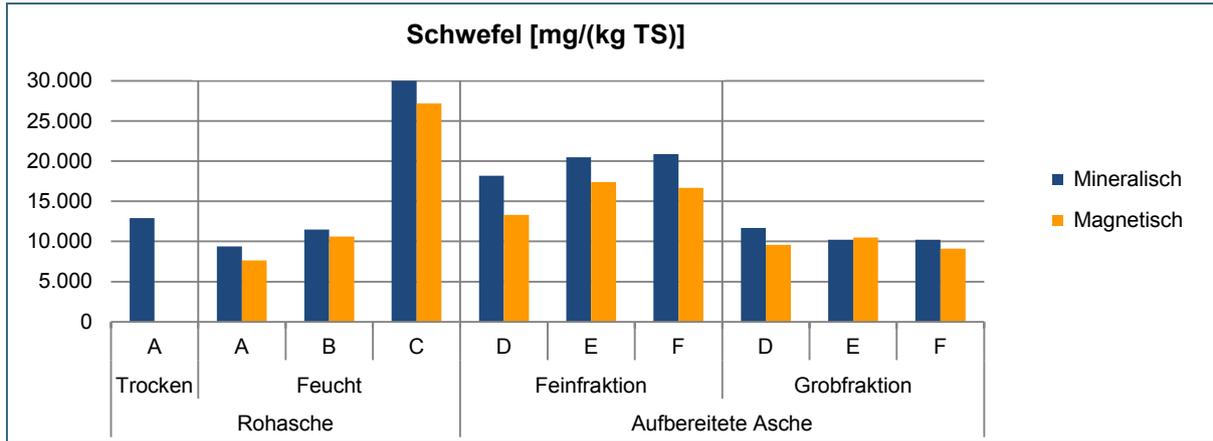


Abb. 109: Schwefelgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

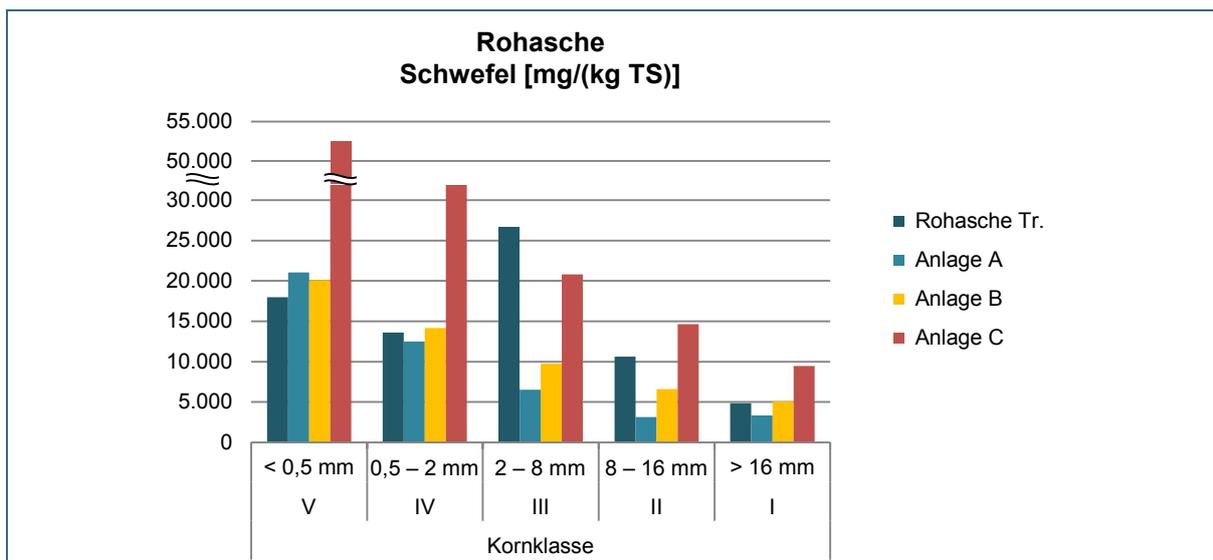


Abb. 110: Berechnete Verteilung von Schwefel auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

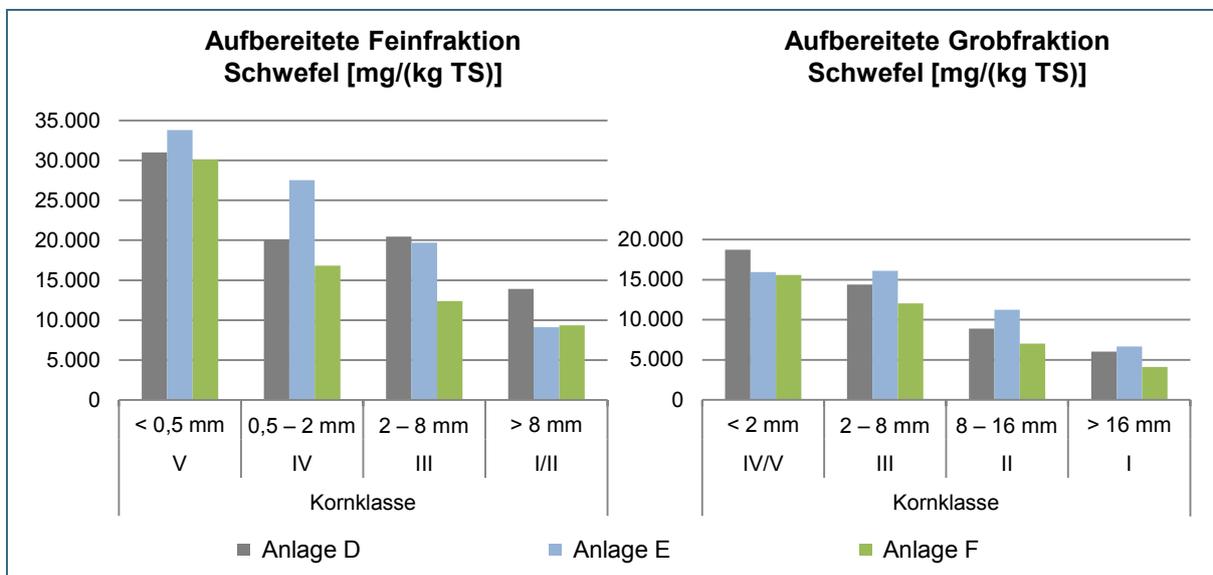


Abb. 111: Berechnete Verteilung von Schwefel auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

7.4.17 Gruppe 17: Chlor, Brom

Chlor

Chlor kommt in der Erdkruste als Bestandteil vieler Minerale vor. Der Gehalt beträgt 0,314 ‰.

Chlor wird in der chemischen Industrie zur Herstellung von chlorierten Verbindungen wie etwa Salzsäure und (Poly)vinylchlorid sowie als Bleich- und Desinfektionsmittel (Chlorierung von Wasser) verwendet. Bei der Abfallverbrennung geht ein Teil des Chlors in den Gaspfad, während der Rest in Form von Salzen in der Müllverbrennungssasche verbleibt.

Die Abb. 112 zeigt die Chlorgehalte in den untersuchten Ascheproben der Anlagen A bis F. In den mineralischen und magnetischen Teilproben der Fein- und Grobfraktion der Anlage D ist vergleichsweise viel Chlor enthalten: In der mineralischen Feinfraktion wird ein Gehalt von 62.200 mg/(kg TS) erreicht. Dies ist knapp sechsmal so viel wie in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C.

Bei allen untersuchten Aschen lässt sich eine Anreicherung von Chlor in den kleinen Kornklassen feststellen (vergleiche Abb. 113 und Abb. 114). Die Gehalte der aufbereiteten Fein- und Grobfraktionen der Anlage D sind in allen Kornklassen stark erhöht. In der Kornklasse V der Feinfraktion wird ein Chlorgehalt von 121.200 mg/(kg TS) erreicht.

Ursache für die hohen Chlorgehalte an der Anlage D ist folgender Sachverhalt:

In den Entschlacker strömen eine eingedickte, neutralisierte Calciumchlorid-Lösung (19.700 mg Cl/l; HCl-Stufe) und eine Lösung (275.500 mg Cl/l) aus der SO₂-Stufe des zweistufigen Abgaswäschers. Während der Verweilzeit der Rohasche im Nassentschlacker versucht sich das Konzentrationsgefälle zwischen Entschlackerwasser und Rohasche anzugleichen, was zu den erhöhten Gehalten führt.

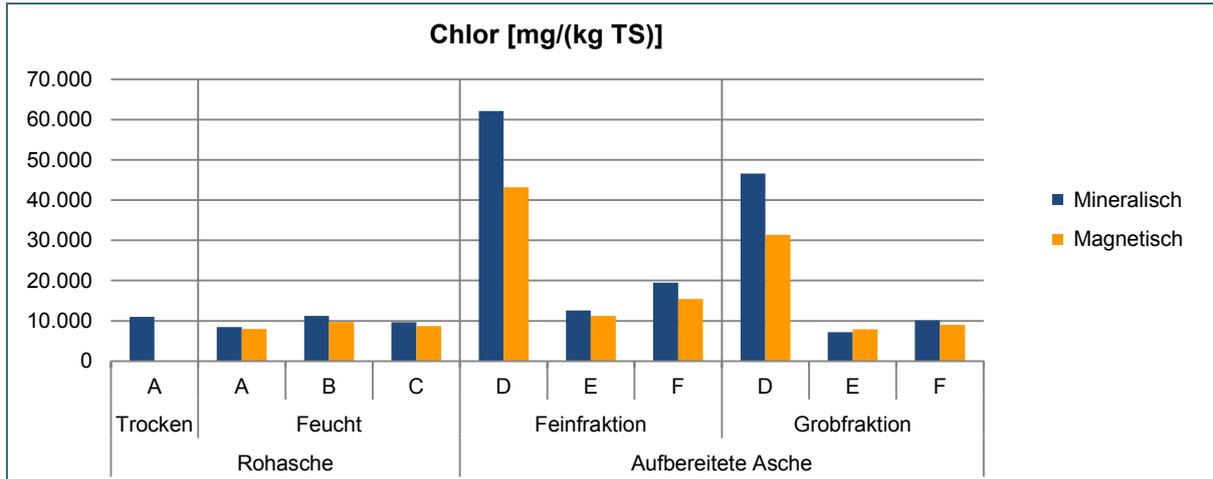


Abb. 112: Chlorgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

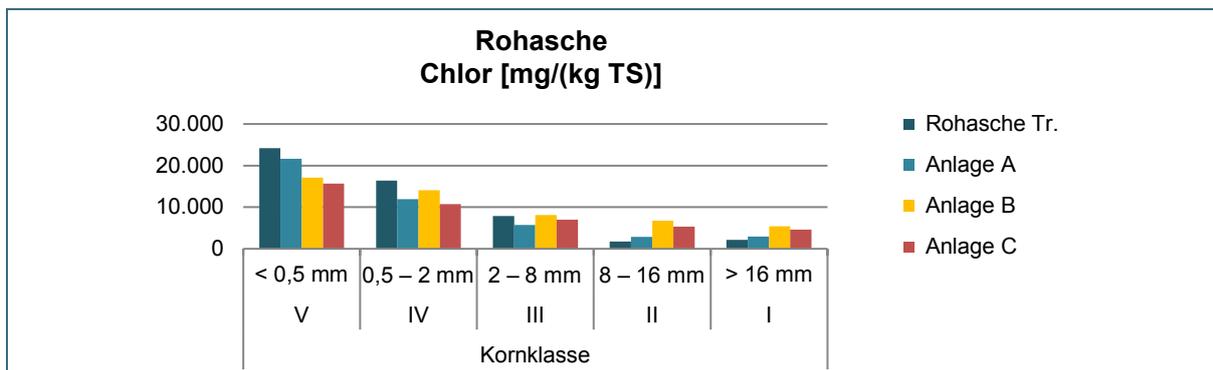


Abb. 113: Berechnete Verteilung von Chlor auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

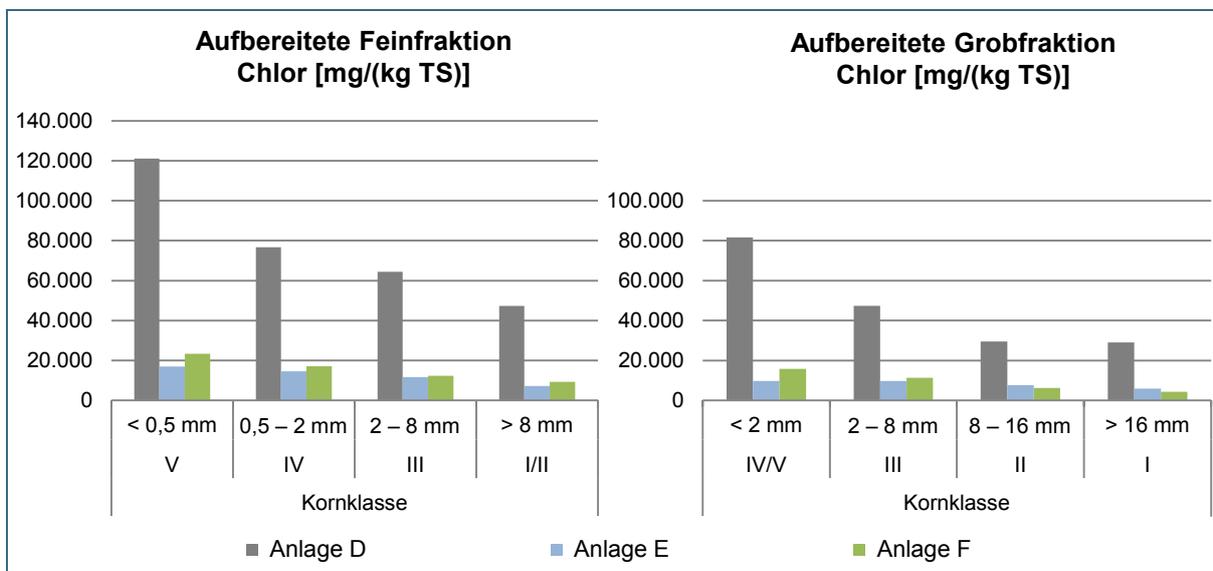


Abb. 114: Berechnete Verteilung von Chlor auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Brom

Brom kommt überwiegend (circa 99 % der Bromvorräte) in den Ozeanen vor. Meerwasser enthält durchschnittlich 0,065 ‰ Brom. Weitere Bromvorkommen sind Salzseen, Solequellen und Abraumsalze.

Brom und seine Verbindungen finden Anwendung als Desinfektionsmittel, Bleichmittel, Schädlingsbekämpfungsmittel und in der photographischen Industrie.

Die Abb. 115 zeigt sehr deutlich, dass der Bromgehalt in den Ascheproben der Anlage D stark erhöht ist. In der mineralischen Feinfraktion ist die Konzentration neunmal so hoch wie in den entsprechenden Proben der Anlagen E und F; in der mineralischen Grobfraktion etwa vierzehnmal so hoch. Generell ist in den mineralischen Teilproben mehr Brom enthalten als in den magnetischen.

Brom reichert sich wie Chlor in den kleinen Kornklassen an. Dies ist in den Rohaschen (vergleiche Abb. 116) und den aufbereiteten Fein- und Grobfraktionen (vergleiche Abb. 117) erkennbar. Der höchste berechnete Bromgehalt liegt in der Kornklasse V der Feinfraktion bei 955 mg/(kg TS).

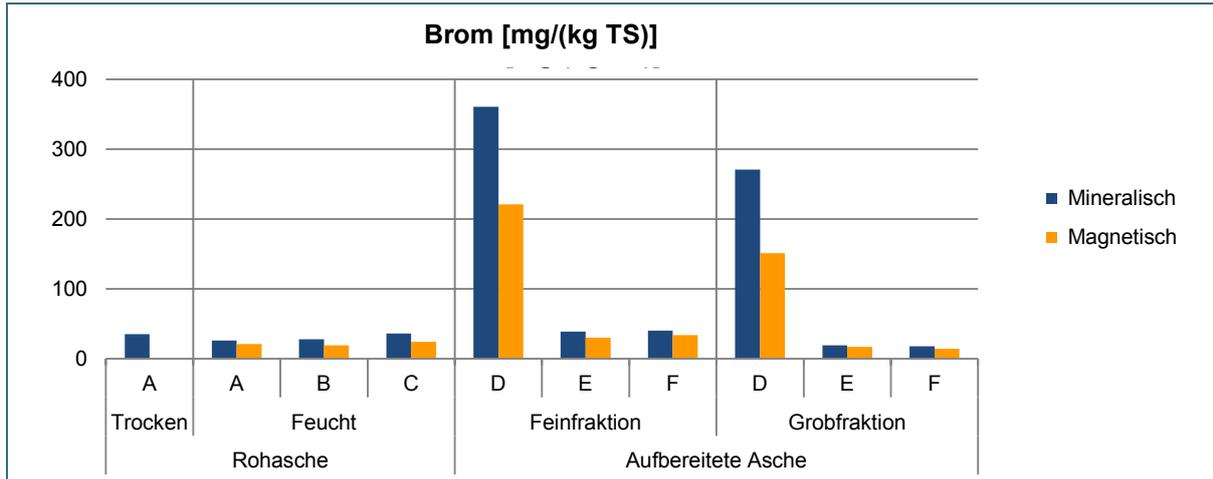


Abb. 115: Bromgehalte der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F

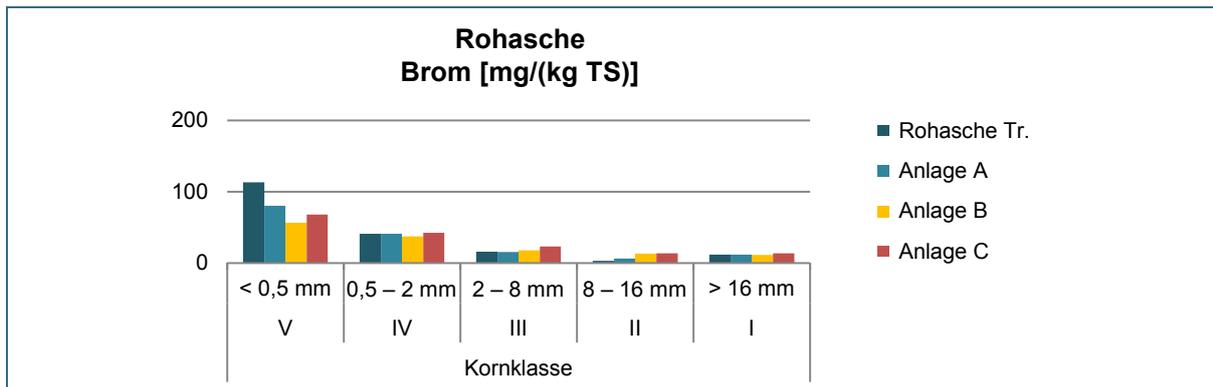


Abb. 116: Berechnete Verteilung von Brom auf die Kornklassen in den untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C

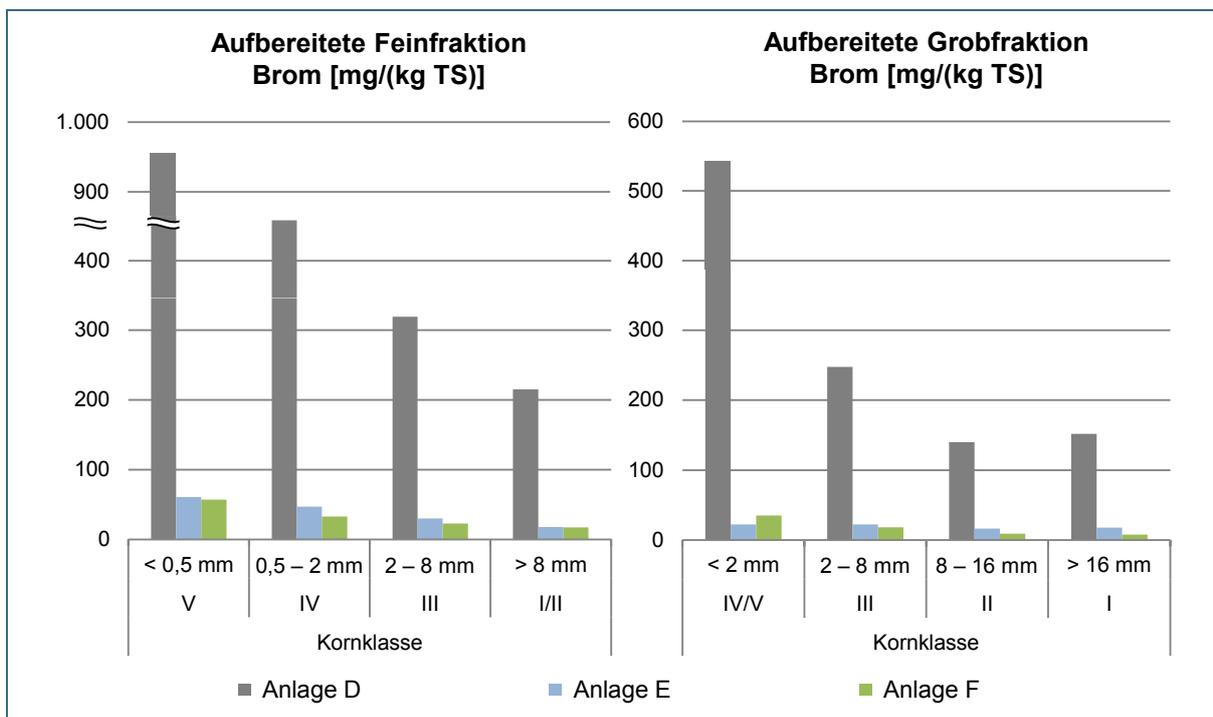


Abb. 117: Berechnete Verteilung von Brom auf die Kornklassen in den untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

7.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der chemischen Analytik

Zur Beurteilung der Elementanreicherung in den mineralischen und magnetischen Teilproben wurde der Quotient (An-, Abreicherungsfaktor f) aus den Elementkonzentrationen in den beiden Teilproben der Wochenmischproben berechnet:

$$f_{\text{mineral}} = \frac{c_{\text{mineral}}}{c_{\text{magnet}}} \quad \text{bzw.} \quad f_{\text{magnet}} = \frac{c_{\text{magnet}}}{c_{\text{mineral}}}$$

Für die Rohasche trocken der Anlage A können diese Quotienten aufgrund der nicht analysierten magnetischen Teilprobe nicht berechnet werden. Die folgenden Aussagen beziehen sich daher auf die neun nass ausgetragenen Aschefraktionen (drei Rohaschen der Anlagen A, B und C, jeweils drei Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F). Aufgeführt sind die Elemente, für die eine eindeutige An-/Abreicherung festgestellt wurde (das heißt bei mindestens sechs von neun Fraktionen zutreffend).

Kalium zeigt eine deutliche Anreicherung in der mineralischen Fraktion. Hier ist der Quotient $f_{\text{mineral}} \geq 1,5$. Bei Aluminium, Bismut, Blei, Brom, Cäsium, Europium, Magnesium, Natrium, Rubidium und Silizium liegt der Faktor zwischen 1,2 und 1,5. Das heißt, für diese Elemente sind die Gehalte in den mineralischen Teilproben bei der Mehrzahl der Anlagen mindestens 20 % höher als in den magnetischen.

Bei Arsen, Chrom, Eisen, Kobalt, Mangan, Molybdän, Neodym und Nickel beträgt der Faktor f_{magnet} in den meisten Wochenmischproben mindestens 1,5. Diese Elemente reichern sich somit in der magnetischen Teilprobe an. Mit einem Quotienten zwischen 1,2 und 1,5 bei mindestens sechs Anlagen weisen außerdem die Elemente Praseodym, Gadolinium, Gallium, Germanium und Indium eine Tendenz zur Anreicherung in der magnetischen Fraktion auf.

Ein Anstieg der Elementgehalte mit abnehmender Partikelgröße wurde bei Antimon, Bismut, Brom, Cadmium, Calcium, Chlor, Niob, Phosphor, Schwefel, Silber und Zink festgestellt. Bei Silizium hingegen wurde ein deutlicher Anstieg der Gehalte mit zunehmender Korngröße beobachtet.

Im Vergleich der untersuchten Anlagen wurden relativ hohe Werte an der Anlage A für Silber; an der Anlage C für Antimon, Bismut, Chrom, Kupfer, Molybdän, Schwefel, Silber und Zink sowie an der Anlage D für Blei, Brom, Chlor und Europium gemessen.

In Tab. 8 sind die Konzentrationsbereiche einiger Metalle in den Gesamtproben der Anlagen A bis F im Vergleich zu Literaturdaten gezeigt. Diese Gehalte der Gesamtproben wurden für jede Anlage unter Einbeziehung der Verteilung auf die mineralische und magnetische Teilprobe sowie gegebenenfalls auf die Fein- und Grobfraktion berechnet. Bei den Werten von Deike et al. [61] handelt es sich ausschließlich um RFA-Ergebnisse. Bei Knorr et al. [14] konnte auf die Originaldaten des Vorhabens „Organische und anorganische Schadstoffbelastung von Reststoffen/Rückständen aus der thermischen Behandlung von Restmüll – Konsequenzen für die Aufbereitung und Verwertung“ zurückgegriffen werden, wo die Fein- (0 – 8 mm) und Grobfraktionen (8 – 32 mm) der Müllverbrennungsaschen von fünf bayerischen Anlagen analysiert worden sind. Dargestellt sind in Tab. 8 die Wertebereiche der Wochenmischproben für beide Aschefraktionen. Mit Ausnahme von Chrom (RFA) handelt es sich um ICP-OES-Analysen. Die angegebenen Schwankungsbreiten von Reimann werden in der Literatur häufig zitiert und stammen von Messergebnissen nach dem Jahr 1990. Sie sind einer Veröffentlichung [82] des Forschungszentrums Karlsruhe entnommen. In einem Forschungsvorhaben von Pfrang-Stotz und Reichelt [18] aus dem Jahr 2005 wurden die Aschen von 10 Müllverbrennungsanlagen untersucht. In die letzte Spalte der Tabelle sind die von der International Ash Working Group (IAWG) [33,

S. 378] veröffentlichten Wertebereiche der Elementkonzentrationen von Ascheproben eingetragen, die von Müllverbrennungsanlagen aus der ganzen Welt stammen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit stimmen mit den Literaturdaten bzw. Wertebereichen gut überein. Die aktuellen Zinkwerte überschreiten den in [33] angegebenen Maximalwert um bis zu 30 %, liegen aber innerhalb des in [82] angegebenen Bereichs.

Tab. 8: Metallgehalte der vorliegenden Untersuchung im Vergleich zu Literaturdaten. Angaben in g/kg

Element	Anlagen A – F	Deike et al. [61]	Knorr et al. [14]	Reimann (in [82])	Pfrang-Stotz [18]	IAWG [33, S. 378]
Aluminium	42,1 – 46,3 ¹⁾	42,6 ¹⁾	25,6 – 41,2 ³⁾	5 – 95	–	21,9 – 72,8
Blei	0,7 – 2,2 ¹⁾	0,9 ¹⁾	0,6 – 2,5 ³⁾	0,6 – 5,2	0,7 – 2,5	0,1 – 13,7
Cadmium	0,005 – 0,009 ²⁾	–	0,002 – 0,02 ³⁾	0,0001 – 0,082	–	0,0003 – 0,07
Chrom	0,6 – 1,0 ¹⁾	–	0,2 – 0,3 ¹⁾	0,1 – 9,6	0,3 – 1,4	0,02 – 3,2
Eisen	58,4 – 75,2 ²⁾	72,7 ¹⁾	70,4 – 110,2 ³⁾	20 – 110	–	4,1 – 150
Kupfer	1,7 – 4,0 ²⁾	2,2 ¹⁾	1,1 – 4,4 ³⁾	0,2 – 2,0	–	0,2 – 8,2
Mangan	0,8 – 2,0 ²⁾	1,4 ¹⁾	0,9 – 1,8 ³⁾	–	–	0,08 – 2,4
Nickel	0,2 – 0,3 ²⁾	0,2 ¹⁾	0,1 – 0,3 ³⁾	0,04 – 0,76	0,1 – 0,5	0,01 – 4,3
Zink	3,6 – 10,1 ¹⁾	–	1,9 – 4,9 ³⁾	0,5 – 21	1,8 – 8,3	0,6 – 7,8

¹⁾ Chemische Analyse mittels RFA

²⁾ mittels ICP-MS

³⁾ mittels ICP-OES

8 Stoffstrom Müllverbrennungsasche⁴

8.1 Situation Bayern 2012/2013

Über die in Bayern betriebenen 14 Müllverbrennungsanlagen liegen dem BayLfU detaillierte Informationen aus den Fragebögen für die jährlich nach Art. 12 des BayAbfG [83] zu erstellende Abfallbilanz – z. B. [66] – vor. Die Emissionsjahresberichte der Anlagenbetreiber für die Überwachungsbehörde – in Bayern: Bayerisches Landesamt für Umwelt [84] – enthalten Angaben über die In- und Output-Ströme der Anlagen. Damit alle Daten die gleiche Informationsdichte aufweisen, wurden die für die Stoffströme relevanten Daten im Einzelnen zusammengestellt und mit den Anlagenbetreibern diskutiert.

Die Auswertung basiert auf den Daten von 13 bayerischen Müllverbrennungsanlagen, da an der 14. Anlage (Durchsatz maximal 5 % des in Bayern thermisch behandelten Abfalls) in einer Ofenlinie neben Siedlungsabfällen auch Althölzer verbrannt und die bei der Ascheaufbereitung anfallenden Metalle nicht nach ihrer Abfallherkunft differenziert werden.

8.1.1 Behandelte Abfälle, erzeugte Rohasche

Die an den betrachteten 13 Anlagen angelieferten Abfallarten mit den zugehörigen Massenangaben sind für die Jahre 2012 und 2013 in Tab. 9 zusammengestellt. Die Daten der beiden Jahre unterscheiden sich nur geringfügig. Rest- und Gewerbemüll bilden mit insgesamt 91 Mass.-% den Hauptanteil des zu verbrennenden Abfalls, der 2,93 (2012) bzw. 2,96 Mio. Mg (2013) beträgt.

Bei der Annahme des Abfalls erfolgt die Erfassung der Abfallart anhand der Abfallschlüsselnummern der Abfallverzeichnis-Verordnung [85]. Eine Aufteilung der Abfälle der jeweiligen Schlüsselnummern in die gängigen Kategorien Hausmüll und Gewerbemüll ist mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, da das Abfallverzeichnis diesbezüglich keine Unterscheidung trifft. Gemischte Siedlungsabfälle, die zur Beseitigung angeliefert wurden, wurden als Hausmüll bewertet, Abfälle zur Verwertung als Gewerbemüll.

Tab. 9: Zusammensetzung des in den Jahren 2012 und 2013 an 13 der 14 bayerischen Müllverbrennungsanlagen angenommenen Siedlungsabfalls inklusive interner Stoffströme

Abfallart	2012		2013	
	Mg	Mass.-%	Mg	Mass.-%
Hausmüll (Restmüll)	2.093.400	71,5	2.109.800	71,3
Gewerbemüll	567.500	19,4	582.800	19,7
Sperrmüll	168.300	5,7	174.400	5,9
Klärschlamm	39.100	1,3	34.200	1,2
Rückstand MBA	14.600	0,5	9.600	0,3
Sonstige Abfälle	46.000	1,6	47.000	1,6
Summe	2.928.900	100,0	2.957.800	100,0

Angaben zur Herkunft des thermisch behandelten Abfalls konnten nicht von allen Anlagenbetreibern gemacht werden. Teilweise wird von den Betreibern lediglich die Anlieferung aus dem jeweiligen Zweckverbandsgebiet erfasst. Gerade bei Abfall zur Verwertung, der frei akquiriert wird, ist die Herkunft häufig unbekannt.

⁴ Sämtliche Zahlenangaben sind jeweils für sich gerundet, so dass sich bei der Rechnung von gerundeten Zahlenwerten (Addition, Multiplikation) geringfügige Abweichungen zu den Textangaben ergeben können.

Sieben Müllverbrennungsanlagen nehmen Klärschlamm – Trockenrückstand zwischen 20 und 80 % – an. Rückstände aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) werden in einer Anlage mitverbrannt.

Gegenüber den Anlieferdaten liegt der Durchsatz der 13 Anlagen bei 2,91 (2012) bzw. 2,94 Mio. Mg (2013). Diese Massenangabe beinhaltet den an der Kranwaage des Müllbunkers verwogenen Abfall inklusive intern rückgeführter Stoffströme (z. B. Rostdurchfall). Das Delta zwischen den Angaben (angenommene Abfälle versus Durchsatz) ist vor allem in angelieferten, aber noch nicht verbrannten Abfallmengen zum Stichtag (Zwischenlager) sowie in Feuchtigkeitsverlusten des Abfalls während der mehrtägigen/-wöchigen Lagerung im Müllbunker begründet.

Insgesamt fielen an den 13 Anlagen im Jahr 2013 circa 708.500 Mg Rohasche (inklusive Metalle) an; im Jahr 2012 waren es circa 697.200 Mg. Diese Angaben beziehen sich auf die Originalsubstanz, das heißt inklusive dem anhaftenden Wasser aus der Nassentschlackung. Der Wassergehalt frischer Rohaschen beträgt circa 20 Mass.-% [1]. Vom verbrannten Abfall bleiben an Rohaschen (feucht) in den betrachteten Jahren durchschnittlich 24,1 Mass.-% (2013) bzw. 23,9 Mass.-% (2012) übrig. In Abhängigkeit vom Abfallinput liegt dieser Wert an den 13 Anlagen zwischen 22,0 und 27,8 Mass.-% (2013) bzw. 21,7 bis 28,2 Mass.-% (2012).

8.1.2 Ascheaufbereitung und Metallrückgewinnung

An den 13 betrachteten Müllverbrennungsanlagen findet die Aufbereitung der Rohasche bei sieben Anlagen entweder ganz oder teilweise vor Ort und bei sechs Anlagen ausschließlich bei externen Aufbereitern statt, vergleiche Tab. 10. Die 12 Anlagen mit einer (teilweisen) externen Aufbereitung nehmen hierzu die Dienstleistung von sieben Unternehmen in Anspruch. Vier davon befinden sich in Bayern, jeweils eines in Baden-Württemberg, Thüringen und Sachsen-Anhalt. Zur Metallabtrennung werden Überband- und Trommelmagnete sowie NE-Abscheider eingesetzt.

Die Verfahrensschemata der beprobten Anlagen (Aufbereitungsanlagen an MVAs – vor Ort – und extern) sind in Abschnitt 4.1 dargestellt und beschrieben.

Tab. 10: Übersicht über die an den 13 betrachteten bayerischen Müllverbrennungsanlagen durchgeführte Ascheaufbereitung

Aufbereitung – Vor Ort (MVA)	Behandlung Rohasche (nach Nassentschlacker)				
	Fe + NE	Fe + NE ¹⁾	Fe	„Fe“ ²⁾	–
– Extern	–	NE ³⁾	NE	Fe + NE	Fe + NE
MVA [Anzahl]	1	1	2	3	6
Beprobte Aufbereitungsanlagen					
– Vor Ort (MVA)	1	1	1	1	–
– Extern	–	–	–	1	1 ⁴⁾

¹⁾ Ausschließlich Feinfraktion

²⁾ Mechanische Abtrennung (Klassierung) des Grobmaterials, das einen hohen Anteil an Fe-Metallen enthält

³⁾ Ausschließlich Grobfraktion

⁴⁾ Dienstleister bereitet Rohaschen aus fünf bayerischen MVAs auf

Die Abtrennung von großen Schrottteilen erfolgt nach dem Austritt des Verbrennungsrückstands aus dem Nassentschlacker. Bei einer Aufbereitung an der MVA lagert die grob entschrottete Rohasche maximal drei Tage bzw. eine Woche überdacht bzw. im Freien, bis eine weitergehende Metallabtrennung erfolgt. Danach werden die aufbereiteten Aschen maximal eine weitere Woche in einer Halle bzw. im Freien gelagert.

Bei einer externen Behandlung lagert die Rohasche an der MVA wenige Tage bis maximal eine Woche im Schlackebunker, in einer Halle oder im Freien, bis sie zum Aufbereiter geht. Dort lagert die Asche solange (ein bis zwei Wochen unter Dach, sechs bis acht Wochen im Freien), bis dieser mineralische Kornverbund die ideale Restfeuchtigkeit für die mechanische Aufbereitung erreicht hat. Durch die erneute Lagerung der Asche nach der Abtrennung der Metalle wird sichergestellt, dass der mineralische Abfall die Vorgaben der LAGA-Merkblätter [31, 32] und der DepV [6] sicher einhält.

Angaben zur Aufbereitung und den verwendeten Techniken liegen von fünf externen Aufbereitern vor. In der Regel erfolgt die Aufbereitung in drei Größenfraktionen. Zunächst wird das so genannte Überkorn abgetrennt (Siebschnitt 45 oder 50 mm). Aus dieser Fraktion wird Eisenschrott (Magnetabscheider) und in einer Handsortierung die Stoffströme Unverbranntes, NE-Metalle und Edelstahl entfernt. Die mittlere Größenfraktion umfasst die Partikel ab einer Größe von 10 oder 12 mm. An einer Anlage erfolgt die Trennung bei 4 mm. Aus diesem Material erfolgt die Abtrennung von Fe-Metallen über Trommel- oder Überbandmagnete sowie die NE-Gewinnung durch Wirbelstromabscheider. Bei den meisten Anlagen erfolgt in dieser mittleren Fraktion die Abtrennung von Leichtstoffen durch Windsichter. Aus der Feinfraktion (< 4, 10 oder 12 mm) wird das enthaltene Fe-Metall entfernt, eine zusätzliche Abtrennung der NE-Metalle erfolgt an drei Anlagen.

In Abb. 118 sind die relevanten Stoffströme, bilanziert über die 13 betrachteten bayerischen Müllverbrennungsanlagen, für das Jahr 2013 dargestellt.

Aus der thermischen Behandlung von 2,9 Mio. Mg Abfällen (vergleiche Tab. 9) gehen 206,8 Tsd. Mg Rohasche direkt an externe Aufbereiter, während 496,4 Tsd. Mg (zunächst) vor Ort aufbereitet werden und 5,3 Tsd. Mg ohne Aufbereitung in den Deponiebau (Verwertungsmaßnahme) gehen. Insgesamt werden bei externen Aufbereitern 568,6 Tsd. Mg Roh- und teilweise aufbereitete Aschen behandelt. Im Jahr 2013 wurden 99,3 % der anfallenden Rohaschen der 13 Müllverbrennungsanlagen aufbereitet.

Aus der Aufbereitung von 703,3 Tsd. Mg Rohasche wurden 63,9 Tsd. Mg Fe-Metalle und 7,8 Tsd. Mg NE-Metalle für das stoffliche Recycling gewonnen; dies entspricht Anteilen von 9,0 % Fe-Metallen bzw. 1,1 % NE-Metallen (bezogen auf die Rohasche). Der verbleibende mineralische Rest in Höhe von 621,5 Tsd. Mg wurde zu 90,3 % überwiegend im Deponiebau verwertet und zu 9,7 % auf Deponien beseitigt. Die Differenz von circa 10 Tsd. Mg (1,4 % bezogen auf die Rohasche) zwischen der Rohasche und den Stoffströmen nach der Aufbereitung ist durch Trocknungsverluste begründet.

Die Daten für die Rückgewinnung von Metallen aus der Rohasche für das Jahr 2012 sind in Abb. A-1 im Anhang dargestellt.

Müllverbrennungsanlagen Bayern 2013: Abfallinput und Müllverbrennungsaschenoutput

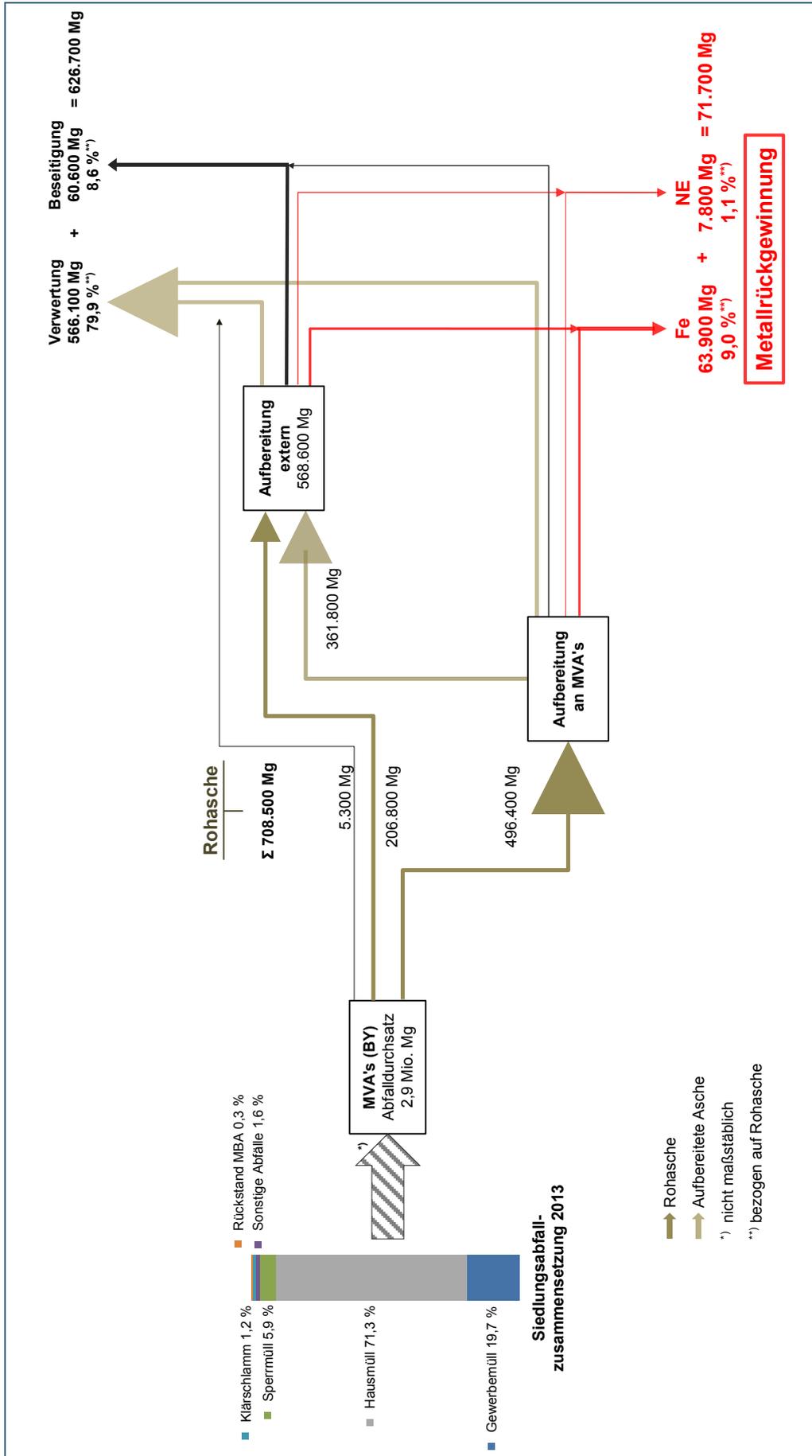


Abb. 118: Abfallinput (Zusammensetzung) und Stoffströme der aufbereiteten Müllverbrennungsaschen der bayerischen Müllverbrennungsanlagen für das Jahr 2013. Daten beziehen sich auf 13 der 14 Anlagen.

8.1.3 Entsorgungswege der Eisen- und NE-Metalle sowie der aufbereiteten Asche

Der weitere Entsorgungsweg der Fe- (und NE-)Metalle wird von den Qualitätskriterien, die in den Stahlschrottsortenlisten [86, 87] definiert sind, festgelegt. So müssen die Fe-Schrotte z. B. Anforderungen hinsichtlich „Korn“größe und Schüttdichte erfüllen, einen Eisengehalt > 92 % aufweisen, chargierfähig und frei von zu hohen Mengen an sichtbarem Kupfer, Zinn und Blei sowie von Bestandteilen bzw. Anhaftungen sein, die unzulässige Emissionen bei der Verhüttung hervorrufen können.

Durch die mineralischen Verunreinigungen, die an den Metallen haften, sind die abgetrennten Metalle ohne weitere Vorbehandlung nicht in Stahlwerken oder Hütten einsetzbar. Daher ist vor allem eine Abtrennung der Mineralik notwendig. Durch das Shreddern der Eisenmetalle auf die gewünschte Stückigkeit (Chargierfähigkeit) wird der mineralische Kornverbund so weit aufgebrochen, dass die Metallteile weitgehend von Anhaftungen befreit sind.

Bei den NE-Metallen ist die Trennung in eine Aluminium und eine Schwermetall angereicherte Fraktion Stand der Technik. Die Trennung nach der Dichte erfolgt im Sink-Schwimm-Verfahren z. B. in einer Sandflotationsanlage. Das NE-Konzentrat aus dem Wirbelstromabscheider wird in einem Sandbett fluidisiert. Die Partikel mit einer geringeren Dichte schwimmen auf und lassen sich somit von Partikeln mit höherer Dichte abtrennen.

Informationen über die weiteren Entsorgungswege der mineralischen Fraktionen zu bekommen, war teilweise schwierig. Sobald sich Externe (zertifizierte Entsorgungsfachbetriebe) um die Ascheaufbereitung oder weitere -entsorgung kümmern, liegen den MVA-Betreiber in der Regel keine detaillierten Angaben zur Entsorgung bzw. Verwertung der Aschen vor.

Das Verwertungsspektrum reicht vom Bergversatz, Deponiebau bis zum Ersatzbaustoff im Straßen- und Wegebau, wobei letzterer Entsorgungsweg in Bayern von untergeordneter Bedeutung ist [24]. Den Großteil macht der Einsatz als Deponiebaustoff aus. Bezogen auf die Rohasche lag der Anteil der verwerteten Müllverbrennungsaschen (mineralischer Anteil) im Jahr 2013 bei 79,9 % (vergleiche Abb. 118); auf Deponien wurden im gleichen Jahr 8,6 % beseitigt.

Kosten – Erlöse

Zu den Kosten, die für die Ascheaufbereitung anfallen, machten vier Betreiber nähere Angaben. Die Preise liegen zwischen 17 und 40 € pro Mg Roh- bzw. teilaufbereitete Asche. Dabei handelt es sich meist um einen Komplettpreis, in dem mitunter die Transportkosten der Asche zum Aufbereiter sowie der wertgebende Metallanteil enthalten bzw. eingepreist sind. Die Verträge mit den zertifizierten Entsorgern tragen der individuellen Entsorgungssituation Rechnung. Größtenteils handelt es sich während der gesamten Vertragslaufzeit um Festpreise; die Laufzeit beträgt zwischen einem und bis zu zehn Jahren.

In der Regel sehen die Betreiber von Müllverbrennungsanlagen in der Ascheaufbereitung nicht das Hauptbetätigungsfeld ihres Geschäftsmodells. Das bedeutet, dass vor allem die Betreiber von externen Aufbereitungsanlagen die Metallrückgewinnung aus den zu behandelnden Aschen vorantreiben und dementsprechend die Aufbereitungsverfahren laufend verbessern und in neue Aggregate investieren. Nach aktuellen Informationen haben zwei in Bayern ansässige Aufbereitungsunternehmen vor, ihre Anlagen in naher Zukunft zu optimieren. In beiden Fällen ist eine weitergehende Siebung des Materials in mehrere Kornfraktionen zur Erhöhung des Metallabtrenngrads geplant.

8.2 Stoffströme ausgewählter Metalle

In diesem Abschnitt werden die bislang ungenutzten Potenziale von Fe- und NE-Metallen, Eisen, Aluminium und Kupfer in den unaufbereiteten sowie den bereits entschlotteten Müllverbrennungsaschen (mineralische Fraktion) dargestellt. Dazu werden im Folgenden zwei unterschiedliche Potenziale berechnet:

- a) Metall-Potenzial_{metallisch}: Potenzial an elementar, das heißt metallisch vorliegenden Metallen (Betrachtung für Fe- und NE-Metalle),
- b) Metall-Potenzial_{chemisch gebunden}: Potenzial an chemisch gebunden vorliegenden Metallen (Betrachtung für Eisen, Aluminium und Kupfer).

Alle Hochrechnungsergebnisse beziehen sich auf 13 von 14 Müllverbrennungsanlagen (vergleiche Abschnitt 8.1), das heißt circa 95 % der entsprechenden Stoffströme Bayerns. Die 5.300 Mg nicht aufbereitete Asche und die nach der Entschrottung (Eisen-, Nichteisenmetalle) anfallende aufbereitete Müllverbrennungsasche (621.500 Mg) bilden den Ausgangspunkt für die Hochrechnung der an sechs Anlagen experimentell ermittelten Werte.

Die Datenbasis für die Berechnung des

- a) Metall-Potenzials_{metallisch} bilden die Sortierergebnisse vor Ort und die Metallteile, die im Labor im Zuge der Probenvorbereitung abgetrennt wurden – vergleiche Abschnitt 7.1,
- b) Metall-Potenzials_{chemisch gebunden} sind die Ergebnisse der chemischen Analysen – vergleiche Abschnitte 7.4, 7.4.8 (Eisen), 7.4.11 (Kupfer) und 7.4.13 (Aluminium).

Zur Bestimmung des Metall-Potenzials_{metallisch} (ungenutztes Potenzial der Fe- und NE-Metalle) wurden ausschließlich die aufbereiteten Aschen der Anlagen C, D, E und F – bei den Proben der Anlagen A und B handelt es sich um Rohaschen – betrachtet. Für die vier Anlagen wurde der Anteil an „stückigem“⁵ Fe-Metall in der beprobten Asche mit den experimentellen Ergebnissen aus a) aus dem Anteil der Fraktion *Magnetisch* an der Ascheprobe und den in dieser Fraktion enthaltenen Metallstücken/-partikeln berechnet. Der Anteil an „stückigem“⁵ NE-Metallen in den aufbereiteten Aschen entspricht der aussortierten Fraktion *Metallisch* bei den Probenahmen. Für die Berechnungen wurden die auf Trockensubstanz bezogenen Anteile verwendet.

Zur Beurteilung des chemisch gebundenen Potenzials (Metall-Potenzial_{chemisch gebunden}) wurden die Elementgehalte der chemischen Analyse verwendet. Für die Berechnung der Größe Metall-Potenzial_{chemisch gebunden} wird angenommen, dass durch die Sortierung und Probenvorbereitung alle optisch erkennbaren elementar vorliegenden Metalle entfernt wurden und im Metall-Potenzial_{metallisch} enthalten sind.

Aus den Analysewerten der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben sowie den mineralischen und magnetischen Anteilen an der Gesamtprobe wurden die mittleren Gehalte für folgende Ascheproben ermittelt: drei Rohaschen der Anlagen A bis C, jeweils drei Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D bis F. Unter Berücksichtigung der Aufteilung der aufbereiteten Aschen der Anlagen D bis F in Fein- und Grobfraktion wurden die Aschengehalte für diese Anlagen berechnet. Der Mittelwert der sechs Elementgehalte wurde als Durchschnittsgehalt entschlotteter bayerischer Müllverbrennungsaschen angesehen.

⁵ Unter „stückigem“ Metall werden auch kleine, optisch erkennbare Metallpartikel, die aus der Asche manuell entfernt wurden, verstanden.

Bei dem chemisch gebundenen Potenzial handelt es sich um Metalle, die sich bei dem heute in der Praxis üblichen Stand der Aufbereitungsverfahren nicht zurückgewinnen lassen. Die Metalle liegen in Form von chemischen Verbindungen – z. B. als Oxide, Sulfide oder Chloride – vor, das heißt, es bedarf einer weitergehenden, energieaufwändigen Behandlung (Verhüttung) für eine stoffliche Verwertung der Metalle.

8.2.1 Metall-Potenziale_{metallisch}

Unter Berücksichtigung der jeweiligen Aufteilung der Aschen nach der Aufbereitung in die Fein- und Grobfraktion wurde für beide Metallfraktionen („stückige“⁵ Metalle) der Restgehalt an Metallen in den Aschen der vier beprobten Aufbereitungsanlagen bestimmt (siehe Tab. 11).

Tab. 11: Verbleibende Fe- und NE-Metallgehalte in den aufbereiteten Aschen der Anlagen C, D, E und F nach der Metallabtrennung in Mass.-% (TS)

Restgehalte	Anlage				Mittelwert Anlagen C – E
	C	D	E	F	
Fe-Metalle	1,1	1,8	1,3	0,7	1,4
NE-Metalle	0,25	0,40	0,31	0,20	0,32

Die auf die aufbereitete Asche bezogenen Restgehalte an Fe-Metallen liegen in einem Bereich von 0,7 bis 1,8 Mass.-%; für die NE-Metalle ergibt sich ein Bereich von 0,20 bis 0,40 Mass.-%. In erster Näherung betragen die Fe-Restgehalte etwa das Vierfache der NE-Metalle. Bei diesen Werten ist zu beachten, dass sie den momentanen Stand der Aufbereitungstechnik während der Probenahmekampagnen widerspiegeln.

Bei beiden Metallarten weisen die aufbereiteten Aschen der Anlage F die geringsten Restgehalte auf. Diese Gehalte werden für die Hochrechnung auf Bayern als die besten mit heute üblicher Aufbereitungstechnik erreichbaren Ergebnisse angesehen. Gleichzeitig werden die ermittelten Restmetallgehalte in den Aschen der Anlagen C, D und E als repräsentativ für alle aufbereiteten bayerischen Müllverbrennungsaschen betrachtet und daraus der durchschnittliche Restgehalt an Fe- (1,4 %) und NE-Metallen (0,32 %) berechnet (gewichtetes Mittel).

Eisenmetalle

Nach den von der Überwachungsbehörde erhobenen Daten, vergleiche Abschnitt 8.1, wurden im Jahr 2013 63.900 Mg an Eisenmetallen (vergleiche Abb. 118) aus den Rohaschen der bayerischen Müllverbrennungsanlagen abgetrennt und in den Stoffkreislauf zurückgeführt. Durch die konventionelle Aufbereitung der bisher nicht behandelten Asche (5.300 Mg) können zusätzlich 480 Mg Fe-Metalle zurückgewonnen werden.

Der mittlere Restgehalt an stückigen Fe-Metallen in aufbereiteten bayerischen Müllverbrennungsaschen beträgt 1,4 %, siehe Tab. 11. Nach Abzug des Metallgehalts der aufbereiteten Asche aus Anlage F verbleibt ein bislang ungenutztes, noch abschöpfbares Metall-Potenzial_{Fe, metallisch} von 0,7 %. Bei einer optimierten Aufbereitung der Asche (580.200 Mg aufbereitete MV-Asche, einschließlich des mineralischen Rests der vormals nicht aufbereiteten Rohasche) ergibt sich ein Wert von 3.870 Mg Fe-Metallen. Insgesamt resultiert daraus ein noch ungenutztes Potenzial an Fe-Metallen von 4.350 Mg, das heißt zusätzliche 6,8 %.

Nichteisenmetalle

Im Jahr 2013 wurden 7.800 Mg an NE-Metallen (vergleiche Abb. 118) aus den Rohaschen der bayerischen Müllverbrennungsanlagen abgetrennt und stofflich wiederverwertet. Durch die konventionelle Aufbereitung der bisher nicht behandelten Rohasche (5.300 Mg) lassen sich 60 Mg an NE-Metallen zusätzlich in den Stoffkreislauf zurückführen.

Der durchschnittliche Restgehalt an elementaren Nichteisenmetallen in den aufbereiteten Aschen beträgt 0,32 %, siehe Tab. 11. Mit einer optimierten Aufbereitung wie an der Anlage F lässt sich ein Restgehalt von 0,20 % erzielen. Daraus resultiert ein bislang ungenutztes, noch abschöpfbares Potenzial von 0,12 % (von 580.200 Mg aufbereiteter MV-Asche) oder 700 Mg an NE-Metallen. In Summe ergibt sich ein Metall-Potenzial_{NE, metallisch} von 760 Mg an Nichteisenmetallen, das einer bereits abgetrennten Menge von 7.800 Mg NE-Metallen gegenübersteht. Dies entspricht einer Erhöhung der zurückgewonnenen NE-Metalle um 9,7 %.

8.2.2 Metall-Potenziale_{chemisch gebunden}

Zur Bestimmung der chemisch gebundenen Metall-Potenziale wurden die Ergebnisse der ICP-MS- bzw. RFA-Analysen verwendet. Da sich diese Konzentrationen auf die Trockensubstanz der Proben beziehen, wurde für die Berechnung des Potenzials ein durchschnittlicher Wassergehalt der aufbereiteten Aschen von 9,7 % berücksichtigt. Von den 13 bayerischen Müllverbrennungsanlagen liegen für das Jahr 2013 621.500 Mg (Originalsubstanz) an aufbereiteten Aschen vor. Hinzu kommen 5.300 Mg nicht aufbereitete Rohasche abzüglich 540 Mg an Fe- und NE-Metallen, die davon durch eine konventionelle Aufbereitung abgetrennt werden können. Dies ergibt für Bayern einen (hypothetischen) Stoffstrom von 626.200 Mg (OS) bzw. 565.500 Mg (TS) an aufbereiteten Aschen (alle Rohaschen aufbereitet). Die mittleren Konzentrationen und die chemisch gebundenen Metall-Potenziale zeigt Tab. 12. Zum Vergleich ist der Verbrauch Deutschlands des Jahres 2005 gezeigt [88]. Die Angaben beziehen sich auf den jeweiligen Metallinhalt.

Tab. 12: Durchschnittlicher Metallgehalt der untersuchten Aschen, daraus berechnetes Potenzial_{chemisch gebunden} für Bayern und Metallverbrauch Deutschlands im Jahr 2005 [88]; k. A.: keine Angabe

Element	Metallgehalt [mg/(kg TS)]	Hochrechnung auf Bayern [Mg]	Verbrauch Deutschland 2005 [88] [Mg]
Aluminium	46.700	26.400	1,8 Mio.
Chrom	695	393	k. A.
Eisen	66.500	37.600	36,0 Mio. ¹⁾
Kupfer	2.560	1.450	1,1 Mio.
Mangan	1.240	698	k. A.
Nickel	215	122	97.400
Zink	5.210	2.950	501.000

¹⁾ Stahlerzeugnisse

Eisen

Der mittlere Eisengehalt in den untersuchten, entschrotteten (ohne Fe- und NE-Metalle) Müllverbrennungsaschen errechnet sich als Mittelwert aus den in Abb. 64 dargestellten Analysenergebnissen zu 66.500 mg/(kg TS) (6,7 %). Bei rund 565.500 Mg an aufbereiteter Asche im Jahr 2013 ergibt sich eine Gesamtmenge an chemisch gebundenem Eisen von circa 37.600 Mg (Metall-Potenzial_{chemisch gebunden}).

Die magnetischen Teilproben der untersuchten, entschlackten Aschen enthalten durchschnittlich 250.200 mg/(kg TS) Eisen (25,0 %), vergleiche Abb. 64. Überträgt man diesen Wert unter Berücksichtigung des Anteils an magnetischer Asche (im Mittel circa 8 %) auf die in Bayern anfallende Menge an aufbereiteter Müllverbrennungsasche, ergibt sich für den magnetischen Anteil (46.700 Mg), der mit seinem Eisengehalt an den Mindestgehalt für einen wirtschaftlichen Erzabbau herankommt, ein Wert von rund 11.700 Mg Eisen.

Beide chemisch gebundenen Metall-Potenziale liegen um drei Größenordnungen unter dem Verbrauch Deutschlands im Jahr 2005 [88].

Aluminium

Für Aluminium beträgt in den untersuchten, entschlackten Aschen die durchschnittliche Konzentration (Mittelwert) der in Abb. 88 dargestellten Werte circa 46.700 mg/(kg TS). Mit dem oben genannten Ascheaufkommen (aufbereitet) errechnet sich das Metall-Potenzial_{chemisch gebunden} von Aluminium für Bayern zu etwa 26.400 Mg. Da die Anreicherung von Aluminium in der mineralischen Fraktion nicht stark ausgeprägt ist, ist in Bezug auf dieses Element eine Auftrennung der Asche in die Teilströme mineralisch / magnetisch nicht die Methode der Wahl.

Das Potenzial_{chemisch gebunden} für Aluminium ist mit circa 1,5 % des deutschlandweiten Verbrauchs im Vergleich zu den anderen betrachteten Metallen (vergleiche Tab. 12) zwar relativ hoch, es ist jedoch davon auszugehen, dass Aluminium zu einem gewissen Anteil in Form von Verbindungen wie z. B. Alumosilikaten vorliegt, die nicht zur Rückgewinnung geeignet sind.

Kupfer

Für die untersuchten, entschlackten Müllverbrennungsaschen wurde ein durchschnittlicher Kupfergehalt von 2.560 mg/(kg TS) errechnet (Mittelwertbildung). Mit dem oben genannten Ascheaufkommen (aufbereitet) errechnet sich das Metall-Potenzial_{chemisch gebunden} von Kupfer für Bayern zu etwa 1.450 Mg. Da generell keine Anreicherung in einer der beiden Fraktionen vorliegt, scheint eine Auftrennung der Asche nach dem magnetischen Verhalten nicht zweckmäßig.

Der Kupferverbrauch Deutschlands ist fast 1.000-mal höher als das chemisch gebundene Potenzial für Bayern aus Müllverbrennungsaschen.

Die chemisch gebundenen Metall-Potenziale von Nickel und Zink liegen ebenfalls um etwa drei Größenordnungen unter dem jeweiligen Jahresverbrauch Deutschlands von 2005. Die Potenziale sind damit alle als sehr gering einzustufen.

9 Schlussfolgerungen, Empfehlungen

Die Schlussfolgerungen und Empfehlungen basieren auf den ausgewerteten Daten (Stand 2013) von 13 bayerischen Müllverbrennungsanlagen und den in Abschnitt 7 dargestellten Untersuchungsergebnissen.

Stoffströme

• Fe- und NE-Metalle

In Bayern betrug im Jahr 2013

- das Aufkommen an Müllverbrennungsrohasche 708.500 Mg (100,0 %),
- die Masse an aufbereiteten Rohaschen 703.300 Mg (99,3 %).

An Rohaschen wurden in

- bayerischen Anlagen (MVAs oder Externen) 489.700 Mg (69,1 %) und in
- außerbayerischen Anlagen⁶ 213.600 Mg (30,2 %)

aufbereitet.

Vier Betreiber von bayerischen Müllverbrennungsanlagen geben die (Roh-)Aschen an drei außerbayerische Aufbereitungsanlagen ab. Ein Betreiber plant die Rohaschen ab dem Jahr 2016 wieder in Bayern aufzubereiten.

Die aus den Aschen zurückgewonnenen Fe- und NE-Metalle – vergleiche Tab. 13 (Ascheaufbereitung) – werden recycelt und in den Stoffkreislauf zurückgeführt. Aufgrund einer arbeitsteiligen Marktwirtschaft haben sich auch die Stoffkreisläufe globalisiert. Da es sich bei den Metallen aus Müllverbrennungsaschen in der Regel um minderwertigere Schrottqualitäten handelt, ist davon auszugehen, dass die Stoffkreisläufe sich nicht auf Bayern beschränken. Die in Deutschland bzw. Bayern hergestellten Produkte entstehen längs einer globalisierten Lieferkette, das heißt, die Stoffströme gehen da hin, wo sie vor allem unter Kostengesichtspunkten benötigt werden und kommen vielfach als Vorprodukte in das High-Tech-Land Deutschland bzw. Bayern zurück.

Tab. 13: Genutzte Mengen und noch vorhandenes Potenzial an Fe- und NE-Metallen in bayerischen Müllverbrennungsaschen (Stand: 2013)

Ascheaufbereitung (Stand 2013)	Fe-Metalle		NE-Metalle	
	Menge	Anteil	Menge	Anteil
In Bayern	49.100 Mg	76,8 %	4.400 Mg	56,4 %
Außerhalb Bayerns	14.800 Mg	23,2 %	3.400 Mg	43,6 %
Gesamt	63.900 Mg	100,0 %	7.800 Mg	100,0 %
Potenzial				
Unbehandelte Rohasche	+480 Mg	+0,8 %	+60 Mg	+0,8 %
Gesamte Rohasche, optimiert aufbereitet				
– Der in Bayern aufbereiteten Asche	+2.440 Mg	+3,8 %	+440 Mg	+5,6 %
– Der außerhalb Bayerns aufbereiteten Asche	+1.430 Mg	+2,2 %	+260 Mg	+3,3 %
Summe Metall-Potenzial_{metallisch}	+4.350 Mg	+6,8 %	+760 Mg	+9,7 %

⁶ zum Teil nach Vorabtrennung von grobem Eisenschrott direkt an den MVAs

Diese Werte ließen sich noch steigern, wenn man keine Rohaschen mehr unbehandelt ließe und Aufbereitungsanlagen bzw. -techniken nutzen würde, bei denen Gehalte von 0,7 % an Fe-Metallen und 0,20 % an NE-Metallen – siehe Tab. 13 (Potenzial) – in dem mineralischen Rest verbleiben.

Aus den bislang unbehandelten Müllverbrennungsrohaschen Bayerns mit einem

- Aufkommen in Höhe von 5.300 Mg (0,7 % der Rohasche)

ließen sich mit einer Aufbereitungstechnik üblicher Trenngüte zusätzlich an

- Fe-Metallen 480 Mg und an
- NE-Metallen 60 Mg

zurückgewinnen.

Bei einer optimierten Aufbereitung aller bayerischen Müllverbrennungsaschen bis zu Restgehalten von 0,7 % Fe-Metallen und 0,20 % NE-Metallen (Aufbereitung analog Anlage F) ist eine zusätzliche Rückgewinnung an

- Fe-Metallen in Höhe von 3.870 Mg und an
- NE-Metallen in Höhe von 700 Mg

erzielbar. Insgesamt ergibt sich ein Potenzial von 4.350 Mg an Fe- und 760 Mg an NE-Metallen (vergleiche Abschnitt 8.2.1), das bei einer vollständigen Aufbereitung von Bayern aus auf die Sekundärrohstoffmärkte gebracht werden kann.

• Chemisch gebundenes Metall-Potenzial

Das in der Müllverbrennungsasche chemisch gebundene Metall-Potenzial, wie es in Tab. 12 für 7 wirtschaftlich wichtige Metalle auf Bayern hochgerechnet ist, macht in Summe rund 69.600 Mg aus. Damit erreicht es nahezu das Niveau der in der Asche enthaltenen Fe- und NE-Metalle (Summe aus bereits genutztem und noch vorhandenem metallischen Potenzial: rund 76.800 Mg). Die Hauptmasse des chemisch gebundenen Potenzials bilden die Elemente Eisen (54 %) und Aluminium (38 %).

Die Elemente liegen in der Asche teilweise dispers verteilt und oftmals in einer inerten silikatischen Matrix eingebunden vor. Durch diese Gegebenheiten ist eine Rückgewinnung der chemisch gebundenen Metalle technisch sehr aufwändig (z. B. metallurgische Verfahren) und unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten kaum realisierbar. Erschwerend kommt dabei hinzu, dass ein großer Anteil der Metalle Bausteine des bei dem Verbrennungsprozess und danach (Nassentschlacker, Alterung) gebildeten Spektrums an Mineralen sind.

• Fazit

Während man an das chemisch gebundene Potenzial an Metallen in den Müllverbrennungsaschen aufgrund der physikalisch-chemischen Gegebenheiten kaum herankommt, ist die weitere Erschließung der Fe- und NE-Metalle ein wichtiges Ziel. Dazu sind die freien Kapazitäten bei den Aufbereitungsanlagen zu nutzen und die eingesetzten Verfahrenstechniken weiterzuentwickeln. Gleichzeitig ist auch unter ökobilanziellen Gesichtspunkten zu eruieren, inwieweit eine über das derzeitige Maß hinausgehende Metallrückgewinnung aus Müllverbrennungsaschen nachhaltig ist.

Aufbereitungstechniken

Bei der Ascheaufbereitung werden Aggregate zur Zerkleinerung der Aschepartikel (in der Regel Prallmühlen) eingesetzt, um Grobfractionen mit Partikelgrößen in einem Bereich von unter 25 bis 45 mm zu erreichen. Eine vollständige „Pulverisierung“ der mineralischen Bestandteile ist nicht zu empfehlen, da dies die baustoffliche Verwertbarkeit der Feinfraktion erheblich einschränkt, um tragfähige, setzungs-/ hebungsarme Baukörper herzustellen [89]. In Bayern ist die Verwertung von aufbereiteter Müllverbrennungsasche als Ersatzbaustoff schwierig und findet aufgrund mangelnder Nachfrage und Akzeptanz außerhalb von Deponiebaumaßnahmen wenig statt.

Die Ergebnisse der chemischen Analytik der gesiebten und gemahlenden Ascheproben (nach manueller Abtrennung der stückigen Fe- und NE-Metalle) zeigten, dass sich einige Elemente in der magnetischen bzw. mineralischen Teilprobe anreichern. Dadurch werden z. B. für Eisen in einigen Kornklassen der magnetischen Teilprobe die Konzentrationen wirtschaftlich abbaubarer Lagerstätten erreicht. Eine analoge Aussage gilt für Kupfer. Durch einen entsprechenden Siebschnitt der aufbereiteten Asche kann eine bestimmte Fraktion, in der eine hohe Konzentration z. B. von Chlor vorliegt, von der restlichen Asche abgetrennt werden. Diese teilweise entfrachtete Aschefraktion kann höherwertig verwertet werden.

Für die Nutzbarmachung der An- bzw. Abreicherungen müssten den Aufbereitungsanlagen weitere Aggregate nachgeschaltet oder Trennschritte mit anderen verfahrenstechnischen Einstellparametern (z. B. Magnetabscheider mit hoher Feldstärke, andere Siebschnitte etc.) erneut durchlaufen werden. Hierbei ist das Problem der Übertragbarkeit der in dieser Untersuchung im Labormaßstab erfolgten manuellen Abtrennung auf großtechnische Verfahren zu lösen.

10 Zusammenfassung

Das vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) geförderte Projekt „Sekundärrohstoffe in MVA-Aschen“ hatte zum Ziel, das genutzte und ungenutzte Potenzial an Metallen in aufbereiteten Müllverbrennungsaschen aufzuzeigen. Hierzu wurden an vier bayerischen Müllverbrennungsanlagen und bei zwei externen Aufbereitern jeweils fünftägige Probenahmekampagnen durchgeführt. Beprobt wurden sowohl Roh- als auch aufbereitete Müllverbrennungsaschen, die an den Anlagen als Fein- und Grobfraction anfallen. Aus den stündlichen Einzelproben wurden mit Hilfe eines Handmagneten die magnetischen Bestandteile (Fe-Metalle plus magnetisierbare Aschepartikel) der Aschen und anschließend die optisch erkennbaren nichtmagnetischen Metallteile (NE-Metalle) abgetrennt. Aus der magnetischen Teilprobe und dem mineralischen Rest wurden von jeder Aschefraction (Rohasche, Fein-, Grobfraction) magnetische und mineralische Wochenmischproben generiert.

Nach der Bestimmung der Korngrößenverteilung der Wochenmischproben wurden die Proben in Kornklassen aufgetrennt. In den magnetischen und mineralischen Wochenmischproben und den Kornklassen wurden die Gehalte von 53 Elementen – überwiegend Metalle – mittels ICP-MS (Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma) und RFA (Röntgenfluoreszenzanalyse) ermittelt. Die Ergebnisse wurden im Hinblick auf eine mögliche Anreicherung der Elemente in der magnetischen oder mineralischen Teilfraction (gemessene Werte) oder in einer bestimmten Kornklasse (berechnete Werte) betrachtet. Damit steht erstmals für Bayern eine breite und belastbare Datenbasis zu Elementgehalten in Müllverbrennungsaschen zur Verfügung.

Die in den Fragebögen für die vom BayLfU jährlich zu erstellende Abfallbilanz [66] und den Emissionsjahresberichten der Müllverbrennungsanlagen vorhandenen Daten zu Anlageninput, Durchsatz, Rohascheaufbereitung und Verwertungswegen der aufbereiteten Müllverbrennungsaschen wurden für die Jahre 2012 und 2013 zusammengestellt und mit den Anlagenbetreibern diskutiert. Dadurch konnten für 13 der 14 bayerischen Müllverbrennungsanlagen die Stoffströme und der aktuelle Stand der Technik bei der Aufbereitung von Müllverbrennungsaschen in Bayern dargestellt werden.

Im Jahr 2013 wurden 99,3 % (703.300 Mg) der anfallenden Müllverbrennungsrohaschen (708.500 Mg) aufbereitet. An unaufbereiteten Rohaschen wurden 5.300 Mg (0,7 % der Rohasche) direkt als Ersatzbaustoff im Deponiebau verwertet. Die (teilweise) Aufbereitung der Rohaschen erfolgte direkt an den Müllverbrennungsanlagen (496.400 Mg, 70,1 % der Rohasche) oder vollständig bei externen Unternehmen (206.800 Mg, 29,2 %). Dadurch wurden 63.900 Mg Fe- und 7.800 Mg NE-Metalle (9,0 % bzw. 1,1 %, jeweils bezogen auf die Rohasche) zurückgewonnen. Von der aufbereiteten mineralischen Fraction (zusammen mit der unaufbereiteten Rohasche; 626.700 Mg Originalsubstanz) wurden 566.100 Mg (79,9 % der Rohasche) – überwiegend als Deponiebaustoff – verwertet, 60.600 Mg (8,6 %) wurden beseitigt. Von den Anlagenbetreibern sind in absehbarer Zeit keine gravierenden Veränderungen bei der Ascheaufbereitung geplant. Aufgrund der laufenden Optimierung der Aufbereitungsverfahren ist davon auszugehen, dass künftig prozentual vermehrt Metalle zurückgewonnen werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass Fe- und NE-Metalle mit der verwendeten Separationstechnik auch aus dem Feinkorn der Müllverbrennungsaschen weitgehend abtrennbar sind. Mit einer optimierten konventionellen trocken-mechanischen Aufbereitung sind Restgehalte von 0,7 % für Fe- und 0,20 % für NE-Metalle in der aufbereiteten mineralischen Fraction erreichbar. Unter der Annahme, alle bayerischen Müllverbrennungsrohaschen würden bis zu diesen Restgehalten aufbereitet, besteht ein zusätzliches Metall-Potenzial_{metallisch} von 4.350 Mg Fe- und 760 Mg NE-Metallen. Dies entspricht einer Steigerung der bisherigen Rückgewinnung um 6,8 bzw. 9,7 Prozentpunkte.

In den magnetischen Teilproben reichern sich Chrom, Eisen, Kobalt, Mangan und Nickel an. Aluminium, Europium und Kalium weisen jeweils höhere Gehalte in den mineralischen Teilproben auf. Hinsichtlich der Abhängigkeit der Konzentrationen von der Partikelgröße wurden bei Brom, Cadmium, Chlor, Phosphor und Zink zunehmende Elementgehalte mit abnehmender Korngröße festgestellt, während die Siliziumkonzentrationen der Ascheproben mit zunehmender Korngröße ansteigen.

Kritische Rohstoffe kommen in den Aschen in einem weiten Wertebereich vor; Magnesium ist in Gehalten bis 20 g/(kg TS) enthalten, während Platin und einzelne Seltene Erden Konzentrationen um 1 mg/(kg TS) aufweisen. Edelmetalle wie Gold, Platin und Silber sind lediglich mit geringen Gehalten (einstelliger mg/kg-Bereich) in den Aschen zu finden.

In einigen Kornklassen erreichen die Eisen- und Kupfergehalte die Konzentrationen von abbauwürdigen Erzen (notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für eine wirtschaftliche Verwertung). Das bedeutet nicht zwangsläufig, dass diese Kornklassen sich als Ausgangsstoffströme für ein Metallrecycling eignen und Primärerze bei der Metallproduktion teilweise ersetzen können. Zum einen hängt eine Verwertbarkeit unter anderem von der Speziation der Metalle in den jeweiligen Aschen/Kornklassen ab. Zum anderen ist insbesondere die Mannigfaltigkeit an in den Aschen/Kornklassen enthaltenen Elementen als problematisch zu sehen; diese kann sich negativ auf den Recyclingprozess und/oder die Qualität/Reinheit der zu gewinnenden Metalle auswirken.

Aus der chemischen Analyse der manuell von elementaren Metallen weitestgehend befreiten Ascheproben wurden durchschnittliche Konzentrationen von chemisch gebundenen Metallen bestimmt und daraus ein theoretisches Metall-Potenzial_{chemisch gebunden} für Bayern berechnet. Dieses liegt in der Größenordnung des metallischen Potenzials (rund 70.000 Mg), ist aber aufgrund der dispersen Verteilung der Metalle in der mineralischen Matrix für eine Rückgewinnung kaum nutzbar. Im Vergleich zu den Metallverbräuchen Deutschlands sind beide Metall-Potenziale von untergeordneter Bedeutung (Größenordnung um die 1 Prozent des Verbrauchs).

Je mehr Metalle aus der Verbrennung von Siedlungsabfällen in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden können, desto höher wird die Akzeptanz, Müllverbrennung nicht nur unter den Aspekten Volumenreduzierung, Schadstoffzerstörung, Energierückgewinnung und Klimaschutz, sondern auch unter dem Aspekt stoffliches Recyceln als eine nachhaltige Abfallbehandlungsmaßnahme einzustufen.

Literatur

- [1] SIMON, F.-G.; ADAM, C.:
Ressourcen aus Abfall.
Chem. Ing. Tech. 84 (2012) 7, S. 999 – 1004.
- [2] EUROPÄISCHE KOMMISSION:
Große Herausforderung für die Industrie der EU: 20 kritische Rohstoffe.
Pressemitteilung, Brüssel, 26. Mai 2014, 2 S.
- [3] VEREINIGUNG DER BAYERISCHEN WIRTSCHAFT E.V.:
Studie - Rohstoffsituation der bayerischen Wirtschaft.
München, 2015, 5. Auflage, 101 S.
- [4] ANONYM:
Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008
über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien.
Abl. Nr. L 312 (2008), S. 3 – 30.
- [5] ANONYM:
Gesetz zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts. Vom 24. Februar 2012.
Artikel 1: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen
Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG).
BGBl. I (2012) 10, S. 212 – 264.
Zuletzt geändert durch § 44 Abs. 4 des Gesetzes zur Vorbeugung vor und Bekämpfung von
Tierseuchen (Tiergesundheitsgesetz – TierGesG) vom 22.05.2013.
BGBl. I (2013) 25, S. 1324 – 1347.
Berichtigt durch Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie über Industrieemissionen vom 07.10.2013.
BGBl. I (2013) 60, S. 3753.
- [6] ANONYM:
Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts. Vom 27. April 2009. Artikel 1: Verordnung
über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV).
BGBl. I (2009) 22, S. 900 – 950.
Zuletzt geändert durch Artikel 7 der Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie über Industrie-
emissionen, zur Änderung der Verordnung über Immissionschutz- und Störfallbeauftragte und
zum Erlass einer Bekanntgabeverordnung vom 02.05.2013.
BGBl. I (2013) 21, S. 973 – 1020.
- [7] UMWELTBUNDESAMT (UBA):
Themen > Abfall | Ressourcen > Entsorgung > Thermische Behandlung > Thermische Behand-
lung von Siedlungsabfällen.
<http://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/entsorgung/thermische-behandlung>
(abgerufen am 25. Februar 2015).
- [8] MEIER, M.; HEGER, S.; SCHMID, K.:
Müllpyrolyseanlage in Burgau – das Ende der letzten Drehrohranlage für Hausmüll.
Müll und Abfall 47 (2015) 5, S. 248 – 253.
- [9] ALWAST, H.; RIEMANN, A.:
Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen.
Hrsg. vom Umweltbundesamt. Texte 50/2010. Förderkennzeichen 363 01 256, UBA-FB 001409.
Dessau-Roßlau, 2010, 87 S.

- [10] THOMÉ-KOZMIENSKY, K.J.:
Möglichkeiten und Grenzen der Verwertung von Sekundärabfällen aus der Abfallverbrennung.
In: Aschen, Schlacken, Stäube – aus Abfallverbrennung und Metallurgie –. Hrsg. von Karl J. Thomé-Kozmiensky.
TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2013, S. 79 – 278.
- [11] ANONYM:
Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie über Industrieemissionen, zur Änderung der Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen beim Umfüllen oder Lagern von Ottokraftstoffen, Kraftstoffgemischen oder Rohbenzin sowie zur Änderung der Verordnung zur Begrenzung der Kohlenwasserstoffemissionen bei der Betankung von Kraftfahrzeugen. Vom 2. Mai 2013.
BGBl. I (2013) 21, S. 1021 – 1075.
Artikel 3. Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17. BImSchV).
BGBl. I (2013) 21, S. 1044 – 1067.
Berichtigung der Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie über Industrieemissionen, zur Änderung der Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen beim Umfüllen oder Lagern von Ottokraftstoffen, Kraftstoffgemischen oder Rohbenzin sowie zur Änderung der Verordnung zur Begrenzung der Kohlenwasserstoffemissionen bei der Betankung von Kraftfahrzeugen. Vom 7. Oktober 2013.
BGBl. I (2013) 60, S. 3754 – 3755.
- [12] PRETZ, T.; MEIER-KORTWIG, J.:
Aufbereitung von Müllschlacken unter besonderer Berücksichtigung der Metallrückgewinnung. Rohstofftechnik im Wandel. Aachener Umwelttage der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften, 26./27. November 1998.
Aachen, 1998, 15 S.
- [13] BUNGE, R.:
Wertstoffgewinnung aus KVA-Rostasche.
In: Schenk, K. (Ed.): KVA-Rückstände in der Schweiz. Der Rohstoff mit Mehrwert.
Bundesamt für Umwelt, Bern, 2010, S. 170 – 184.
- [14] KNORR, W.; HENTSCHEL, B.; MARB, C.; SCHÄDEL, S.; SWEROV, M.; VIERLE, O.; LAY, J. P.:
Rückstände aus der Müllverbrennung: Chancen für eine stoffliche Verwertung von Aschen und Schlacken. Herausgeber: Deutsche Bundesstiftung Umwelt.
Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1999, 258 S.
- [15] REICHENBERGER, H.-P.; GLEIS, M.; QUICKER, P.; MOCKER, M.; FAULSTICH, M.:
Feste Rückstände aus Verbrennungsanlagen, Teil 1.
Müll und Abfall 40 (2008) 8, S. 386 – 393.
- [16] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ:
Aschen aus der Müllverbrennung – Baustoff auf Deponien oder Abfall zur Ablagerung?
Augsburg, 2005, 8 S.
- [17] RIEDEL, H.:
Müllverbrennungsschlacken: umwelt- und verwertungsrelevante Eigenschaften.
VGB PowerTech 84 (2004) 3, S. 42 – 48.

- [18] PFRANG-STOTZ, G.; REICHEL, J.:
Einfluss geänderter Stoffströme in der Abfallwirtschaft auf die zukünftige Qualität und die Verwertungsmöglichkeiten von Müllverbrennungsschlacken.
Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft. Wissenschaftliche Berichte. FZKA 7025.
Karlsruhe, 2005, 326 S.
- [19] LICHTENSTEIGER, T.:
Müllschlacken aus petrologischer Sicht.
Geowissenschaften 14 (1996), S. 173 – 179.
- [20] GILLNER, R.; PRETZ, T.; ROMBACH, E.; FRIEDRICH, B.:
NE-Metallpotenzial in Rostaschen aus Müllverbrennungsanlagen.
World of Metallurgy – ERZMETALL 64 (2011) 5, S. 260 – 268.
- [21] RÜßMANN, D.:
Metallrecycling mit sensorgestütztem Sortierverfahren – VeMRec.
Urban Mining Kongress & r³ Statusseminar „Strategische Metalle. Innovative Ressourcentechnologien“. Essen, 11./12. Juni 2014.
- [22] PRETZ, T.; WENS, B.:
Wertstoffpotentiale in Verbrennungsrückständen.
45. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, Essen, 14. – 16. März 2012, S. 14/1 – 14/8.
- [23] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN E. V. (FGSV):
Merkblatt über die Verwendung von Hausmüllverbrennungssasche im Straßenbau M HMVA.
Ausgabe 2014, Köln, 14 S.
- [24] DAEHN, C.:
Einsatz von Ersatzbaustoffen in Bayern – Stand und Perspektiven.
In: Aschen, Schlacken, Stäube – aus Abfallverbrennung und Metallurgie.
TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2013, S. 43 – 52.
- [25] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT:
Mantelverordnung Grundwasser/Ersatzbaustoffe/Bodenschutz. Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzstoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material. Arbeitsentwurf. Stand: 31.10.2012.
Startseite > Service > Publikationen > Downloads.
http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/entw_mantelverordnung.pdf (abgerufen am 12. Mai 2015).
Berlin, 2012.
- [26] BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN INDUSTRIE E.V.:
Stellungnahme. Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzstoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material (Stand 31.10.2012). Dokumenten Nr. D 0418.
Berlin, 11. Februar 2013, 58 S.

- [27] BUNDESVERBAND BAUSTOFFE – STEINE UND ERDEN E.V.:
Position der Bauwirtschaft zur Mantelverordnung. Stand: 10. Februar 2015.
Startseite > Informationen > Position zur Mantelverordnung.
<http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/mantelvo.html> (abgerufen am 12. Mai 2015).
Berlin, 2015.
- [28] DEMMICH, J.:
Stellungnahme der Industrie zum Arbeitsentwurf der Mantelverordnung.
In: Aschen, Schlacken, Stäube – aus Abfallverbrennung und Metallurgie.
TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2013, S. 3 – 19.
- [29] BERTRAM, H.-U.:
Anmerkungen zur Ersatzbaustoffverordnung. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2 –
Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –. Hrsg. von Karl J. Thomé-Kozmiensky.
TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2015, S. 23 – 53.
- [30] ANONYM:
3. Arbeitsentwurf zur MantelV lässt weiter auf sich warten.
EUWID Recycling und Entsorgung 25 (2015) 20, S. 21.
- [31] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA):
Mitteilung 19. Merkblatt über die Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Sied-
lungsabfälle.
Berlin, 1994, 30 S.
- [32] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA):
Mitteilung 20. Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfäl-
len – Technische Regeln.
Berlin, 2003, 128 S.
- [33] THE INTERNATIONAL ASH WORKING GROUP (IAWG) – CHANDLER, A.J.; EIGHMY, T.T.; HARTLÉN, J.;
HJELMAR, O.; KOSSON, D.S.; SAWELL, S.E.; VAN DER SLOOT, H.A.; VEHLow, J.:
Municipal solid waste incinerator residues. Studies in Environmental Science 67.
Elsevier, Amsterdam, 1997, 974 S.
- [34] REIMANN, D.O.:
Müllverbrennungsschlacke – Inhaltsstoffe, Menge und Verwertbarkeit.
UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox. 1 (1989) 2, S. 18 – 25.
- [35] HENTSCHEL, B.:
Vergleichende mineralogische und chemische Untersuchungen an Rostschlacken aus Anlagen
zur thermischen Abfallbehandlung – Alterungsverhalten und Einfluss der Anlagenbetriebsweise.
Dissertation, RWTH Aachen.
Shaker Verlag, Aachen, 1999, 169 S.
- [36] ANONYM:
BRB und IGAM zeichnen düstere Zukunft für Schlacken-Verwertung.
EUWID Recycling und Entsorgung 25 (2015) 20, S. 11.
- [37] FRANZ, M.:
KVA-Schlackenaufbereitung in der Schweiz – Von den Anfängen bis heute.
Nutec Engineering AG, Kloten, 2014, 14 S.

- [38] BÖNI, D.:
Ausbeute aus der Trockenasche.
Publikation zum Vortrag am VDI Wissensforum, 23. Juni 2010, 16 S.
http://zar-ch.ch/fileadmin/user_upload/Contentdokumente/Oeffentliche_Dokumente/Ausbeute__aus_Trockenschlacke.pdf (abgerufen am 21. Mai 2015).
- [39] MARTIN GMBH FÜR UMWELT- UND ENERGIETECHNIK:
Martin Trockenentschlackung. Broschüre.
München, 2014, 2 S.
- [40] LÜCK, T.:
Die weitergehende Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacke nach dem Verfahren der Scherer + Kohl GmbH. In: Optimierung der Abfallverbrennung 1. Hrsg. von Karl J. Thomé-Kozmiensky.
TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2004, S. 621 – 641.
- [41] HOLM, O.:
Aufschluss, Trennung und Recycling von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren (ATR) > Home / News zum Verbundprojekt "Aufschluss, Trennung und Recycling von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren (ATR)".
Berlin
<http://www.atr.bam.de/de/home/index.htm> (abgerufen am 19. Mai 2015).
- [42] MAIER, M.; THOME, V.; SEIFERT, S.; KARLSTETTER, C.:
Elektrodynamische Fragmentierung – Die Möglichkeit einer effizienteren Aufbereitung von Müllverbrennungsschlacken.
VDI-/ITAD-Spezialtag, Würzburg, 09. Oktober 2013, 8 S.
- [43] SEIFERT, S.; THOME, V.; KARLSTETTER, C.:
Elektrodynamische Fragmentierung – Eine Technologie zur effektiven Aufbereitung von Abfallströmen.
In: Recycling und Rohstoffe, Band 7.
TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2014, S. 431 – 438.
- [44] STIFTUNG ZENTRUM FÜR NACHHALTIGE ABFALL- UND RESSOURCENNUTZUNG:
Versuche zur Erhöhung des Wirkungsgrad des Wirbelstromabscheiders. Zusätzliche Abtrennung NE-Metallen aus der Feinschlacke. Versuchsbericht vom 26.07.2011.
http://zar-ch.ch/fileadmin/user_upload/Contentdokumente/Oeffentliche_Dokumente/110708_bericht_ne_abscheider.pdf (abgerufen am 20. Mai 2015).
- [45] STIFTUNG ZENTRUM FÜR NACHHALTIGE ABFALL- UND RESSOURCENNUTZUNG:
Produkte > Aluminium > Al-Granulat 0.7 – 3.0 mm (Datenblatt).
http://zar-ch.ch/fileadmin/user_upload/Contentdokumente/Materialspezifikation/materialspezifikation_alu_07bis3mm.pdf (abgerufen am 28. Mai 2015).
- [46] STIFTUNG ZENTRUM FÜR NACHHALTIGE ABFALL- UND RESSOURCENNUTZUNG:
Produkte > Aluminium > Al-Granulat 3.0 – 5.0 mm (Datenblatt).
http://zar-ch.ch/fileadmin/user_upload/Contentdokumente/Materialspezifikation/materialspezifikation_alu_3bis5mm.pdf (abgerufen am 28. Mai 2015).

- [47] STIFTUNG ZENTRUM FÜR NACHHALTIGE ABFALL- UND RESSOURCENNUTZUNG:
Produkte > NE-Edelmetalle > NE-Edelfraktion.
<http://zar-ch.ch/zar/produkte/ne-edelmetalle/> (abgerufen am 24. Juli 2015).
- [48] MORF, L.:
Persönliche Mitteilung, E-Mail vom 22. Mai 2015.
- [49] STIFTUNG ZENTRUM FÜR NACHHALTIGE ABFALL- UND RESSOURCENNUTZUNG:
Kompetenzen/Projekte > Mineralikaufbereitung > Inertisierung des mineralischen Anteils.
<http://zar-ch.ch/zar/kompetenzenprojekte/mineralikaufbereitung/> (abgerufen am 21. Mai 2015).
- [50] DER SCHWEIZERISCHE BUNDESRAT:
Technische Verordnung über Abfälle (TVA) vom 10. Dezember 1990 (Stand am 1. Juli 2011).
SR 814.600.
- [51] QUICKER, P.; ZAYAT-VOGEL, B.; PRETZ, T.; GARTH, A.; KORALEWSKA, R.; MALEK, S.:
Trocken-/Nassentschlackung in MVA und Optionen zur Wertstoffrückgewinnung.
14. Münsteraner Abfalltage, 24./25. Februar 2015, Münster.
- [52] GARTH, A.; PRETZ, T.:
Nasse und trockene Entaschung in Abfallverbrennungsanlagen: Ergebnisse eines UFOPlan-Projekts.
ATA-Gesprächskreis „Rückgewinnung von Metallen“, 21. April 2015, Ingolstadt.
- [53] QUICKER, P.; ZAYAT-VOGEL, B.; PRETZ, T.; GARTH, A.; KORALEWSKA, R.; MALEK, S.:
Nasse und trockene Entaschung in Abfallverbrennungsanlagen – Erkenntnisse für die Überarbeitung des BVT-Merkblatts Abfallverbrennung. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen – Hrsg. von Karl J. Thomé-Kozmiensky. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2014, S. 153 – 170.
- [54] SCHERER, G.:
Aufbereitung von Schlacke aus Kehrichtverbrennungsanlagen.
Europäisches Patentamt. EP 1 447 138 A1. Anmeldetag: 04.02.2004, Veröffentlichungstag 18.08.2004, Patentblatt 2004/34
- [55] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF):
r³ – Strategische Metalle und Mineralien. Innovative Technologien für Ressourceneffizienz. Bonn, 2013, 54 S.
- [56] HOLM, O.:
Gewinnung von Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse – ATR.
Urban Mining Kongress & r³ Statusseminar „Strategische Metalle. Innovative Ressourcentechnologien“. Essen, 11./12. Juni 2014.
- [57] HOLM, O.:
r³ Verbundprojekttitel „Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren (ATR)“.
r³-Kickoff, Helmholtz-Institut für Ressourcentechnologie, Freiberg, 17./18. April 2013.
- [58] RÜßMANN, D.; HEINRICHS, S.; FEIL, A.; PRETZ, T.; GISBERTZ, K.; FRIEDRICH, B.:
Erhöhung der Wertschöpfung bei der Aufbereitung von NE-Metallen aus Müllverbrennungsrostaschen mittels sensorgestützter Sortierung.
Jahrestagung „Aufbereitung und Recycling“, 13./14. November 2013, Freiberg.

- [59] GISBERTZ, K.; FRIEDRICH, B.; HEINRICH, S.; RÜßMANN, D.; PRETZ, T.; KNEPPERGES, C.: Metallurgische Verwertbarkeit aufbereiteter NE-Metallkonzentrate aus MV-Rostaschen. World of Metallurgy – ERZMETALL 67 (2014) 2, S. 89 – 98.
- [60] GISBERTZ, K.; FRIEDRICH, B.: VeMRec – Metallurgische Herausforderungen beim Recycling von NE-Metallkonzentraten aus Abfallverbrennungs-Rostasche. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2. Hrsg. von Karl J. Thomé-Kozmiensky. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2015, S. 227 – 253.
- [61] DEIKE, R.; WARNECKE, R.; VOGELL, M.: Abschlussbericht zum Projekt „Recyclingpotenziale bei Rückständen aus der Müllverbrennung“. Universität Duisburg-Essen, 2012, 91 S.
- [62] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT: Restmüllzusammensetzung, Einflussfaktoren, Abhängigkeit von lokalen abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen (EFRE-Ziel-2-Gebiete in Bayern). Augsburg, 2008, 71 S.
http://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_abfall_00161.htm
- [63] DEIKE, R.; EBERT, D.; SCHUBERT, D.; ULUM, R.M.; WARNECKE, R.; VOGELL, M.: Das Recycling von Metallen aus MV-Schlacke. Potenziale für ein wirtschaftliches und nachhaltiges Urban-Mining. Müll und Abfall 46 (2014) 1, S. 4 – 12.
- [64] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN ISO 11465:1996-12: Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts auf Grundlage der Masse – Gravimetrisches Verfahren (ISO 11465:1993). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1996, 4 S.
- [65] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN 15934:2012-11: Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall – Berechnung des Trockenmassenanteils nach Bestimmung des Trockenrückstands oder des Wassergehalts. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012, 23 S.
- [66] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (LFU): Informationen aus der Abfallwirtschaft – Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2013. Augsburg, 2014, 100 S.
- [67] N.N.: MV-Schrott 2012. Fax an MVA ... vom 28.02.2013.
- [68] N.N.: Persönliche Mitteilung, Gespräch am 18.10.2013.
- [69] N.N.: MV-Schrott 2013. Fax an MVA ... vom 03.02.2014.

- [70] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA):
Mitteilung 32. PN 98: Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen. Stand Dezember 2001.
Herausgegeben im Juli 2004 von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) unter Vorsitz vom Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz (LAGA-Vorsitz 2003 und 2004).
Mainz, 2004, 67 S.
- [71] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.:
DIN 18123:2011-04: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011, 24 S.
- [72] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.:
DIN ISO 11466:1997-06: Bodenbeschaffenheit – Extraktion in Königswasser löslicher Spurenelemente.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1997, 3 S.
- [73] BIO INTELLIGENCE SERVICE S.A.S.:
Establishing harmonized methods to determine the capacity of all portable and automotive batteries and rules for the use of a label indicating the capacity of these batteries.
European Commission DG Environment, 2009, 192 S.
http://ec.europa.eu/environment/waste/batteries/pdf/battery_report.pdf (aufgerufen am 03. Juni 2015).
- [74] NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION:
ANSI C18.1M, Part 1-2005. American National Standard for Portable Primary Cells and Batteries with Aqueous Electrolyte – General and Specifications.
Rosslyn, 2005, 60 S.
- [75] BORNSCHEUER, U.; STREIT, W.; DILL, B.; HEIKER, F.R.; KIRSCHNING, A.; EISENBRAND, G.; FUGMANN, B.; POHNERT, G.; FAUPEL, F.; DINGERDISSEN, U.; GAMSE, T.:
RÖMPP Online.
Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
<https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/Welcome.do>
- [76] U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR; U.S. GEOLOGICAL SURVEY:
Mineral commodity summaries 2015.
Reston, Virginia, 2015, 196 S.
- [77] AL BARAZI, S.I.:
Persönliche Mitteilung, E-Mail vom 11.09.2014.
- [78] BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR):
Commodity Top News Nr. 31: Seltene Erden.
Hannover, 2010, 6 S.
- [79] BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR):
Commodity Top News Nr. 33: Elektronikmetalle – zukünftig steigender Bedarf bei unzureichender Versorgungslage?
Hannover, 2010, 13 S.

- [80] BRITISH GEOLOGICAL SURVEY (BGS):
Mineral Profile: Niobium – tantalum.
Keyworth, Nottingham, 2011, 27 S.
- [81] HOLLEMAN, A.F.; WIBERG, E.:
Lehrbuch der Anorganischen Chemie, 102., stark umgearbeitete und verbesserte Auflage von
N. Wiberg.
Walter de Gruyter, Berlin, New York, 2007, 2149 S.
- [82] MEINFELDER, T.; RICHERS, U.:
Entsorgung der Schlacke aus der thermischen Restabfallbehandlung.
Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft. Wissenschaftliche Berichte.
FZKA 7422.
Karlsruhe, 2008, 88 S.
- [83] ANONYM:
Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und sonstigen Entsorgung von Abfällen und zur Erfassung
und Überwachung von Altlasten in Bayern (Bayerisches Abfallwirtschafts- und Altlastengesetz –
BayAbfAltG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 9. August 1996.
GVBl. (1996) 18, S. 396 – 403.
Gesetzestitel durch § 2 des Gesetzes zur Umsetzung des Gesetzes zum Schutz des Bodens in
Bayern vom 23. Februar 1999 in Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und sonstigen Entsorgung
von Abfällen in Bayern (Bayerisches Abfallwirtschaftsgesetz – BayAbfG) geändert.
GVBl. (1999) 5, S. 36 – 39.
Zuletzt geändert (Art. 11, 23, 29 und 32) durch § 1 Nr. 172 der Verordnung zur Anpassung des
Landesrechts an die geltende Geschäftsordnung vom 22. Juli 2014.
GVBl. (2014) 14, S. 286 – 337.
- [84] ANONYM:
Bayerisches Immissionsschutzgesetz (BayImSchG). Vom 8. Oktober 1974.
GVBl. (1974) 21, S. 499 – 502.
Zuletzt geändert (Art. 6, 7, 8, 8a, 16b und 19) durch § 1 Nr. 170 der Verordnung zur Anpassung
des Landesrechts an die geltende Geschäftsordnung vom 22. Juli 2014.
GVBl. (2014) 14, S. 286 – 337.
- [85] ANONYM:
Verordnung zur Umsetzung des Europäischen Abfallverzeichnisses. Vom 10. Dezember 2001.
Artikel 1: Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung –
AVV).
BGBl. I (2001) 65, S. 3379 – 3412.
Zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 22 des Gesetzes zur Neuordnung des Kreislaufwirt-
schafts- und Abfallrechts. Vom 24. Februar 2012.
BGBl. I (2012) 10, S. 212 – 264.
- [86] BUNDESVEREINIGUNG DEUTSCHER STAHLRECYCLING- UND ENTSORGUNGSUNTERNEHMEN E.V.
(BDSV):
Stahlschrottsortenliste. Fassung vom 01. Januar 2010.
Düsseldorf, 2010, 3 S.
http://www.bdsv.org/downloads/sortenliste_de.pdf (abgerufen am 16. Juni 2015).

- [87] BUNDESVEREINIGUNG DEUTSCHER STAHLRECYCLING- UND ENTSORGUNGSUNTERNEHMEN E.V. (BDSV):
Europäische Stahlschrottsortenliste. Fassung: 1. Juni 1995.
Düsseldorf, 1995, 7 S.
http://www.bdsv.org/downloads/sortenliste_eu.pdf (abgerufen am 16. Juni 2015).
- [88] BGR BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE:
– Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe für Metall- und Nichtmetallrohstoffe – Stand 01/07.
<https://www.yumpu.com/de/document/view/4039331/-rohstoffwirtschaftliche-steckbriefe-fur-metall-und-bmwi> (abgerufen am 10. Juli 2015).
- [89] MARB, C.; HENTSCHEL, B.; MALLICK, R.; LAUNER, M.; BAUER, U.; GEMEINHARDT, C.; GEBSER, V.; SIPPEL, C.:
Verwertung von Rostschlacken aus der Thermischen Abfallbehandlung im Rahmen von Bauvorhaben: geotechnische und umweltrelevante Eigenschaften des Schlackekörpers unter den in der Verwertungspraxis gängigen Einbaubedingungen – Abschlussbericht zum 31.07.2002.
Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg, 2002, 83 S.

Anhang

Tabelle Aschezusammensetzung

Tab. A-1: Prozentuale Zusammensetzung der untersuchten Aschen (Wochenmittelwerte) in Mass.-% auf Trockensubstanz bezogen

Asche	Roh				Aufbereitet					
	Trocken	Nass			Feinfraktion			Grobfraktion		
Anlage	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Metallisch	2,50	1,33	0,74	0,25	0,04	0,03	0,02	1,11	0,59	0,38
Magnetisch	14,9	9,2	12,9	9,8	8,8	9,1	11,5	10,9	9,4	10,7
Grobschrott	1,6	18,5	5,4	–	–	–	–	–	–	–
Mineralisch	81,0	70,9	81,0	90,0	91,1	90,9	88,5	88,0	90,0	88,9

Gruppe 1: Lithium, Natrium

Lithium

Tab. A-2: Lithiumgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	9,7	11,7	18,4	13,2	12,1	16,6	22,8	15,5	15,1	23,9
Magnetisch	–	30,6	18,4	12,6	14,3	18,3	25,6	14,1	14,6	26,1

Tab. A-3: Lithiumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	14,1	17,4	10,2	11,8	14,3
A	19,0	18,7	11,7	7,3	13,5
B	19,1	20,3	17,5	19,6	23,5
C	14,5	14,5	12,9	10,9	15,4

Tab. A-4: Lithiumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	31,0	16,8	14,3	15,0	
	E	18,5	18,8	14,9	13,4	
	F	23,7	24,9	20,8	22,9	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	21,5		15,3	17,8	26,3
	E	20,3		19,2	13,6	19,6
	F	31,9		21,2	22,6	24,8

Gruppe 1 (Forts.)

Natrium

Tab. A-5: Natriumgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. RFA: Röntgenfluoreszenzanalyse

RFA	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	33.300	22.200	14.700	9.870	15.000	13.000	12.800	15.500	15.000	11.900
Magnetisch	–	13.900	9.570	7.800	14.500	8.870	9.500	14.300	10.000	11.200

Tab. A-6: Natriumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. RFA: Röntgenfluoreszenzanalyse

RFA	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	14.400	16.300	33.400	49.800	28.200
A	12.110	13.446	24.908	36.858	16.800
B	8.800	12.611	12.913	11.919	12.383
C	7.771	7.053	10.174	13.950	8.334

Tab. A-7: Natriumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	16.489	19.891	17.936	15.521	
	E	9.249	8.685	11.179	14.422	
	F	12.555	14.527	21.421	20.301	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	13.932		16.500	18.370	10.695
	E	14.146		12.214	12.827	11.455
	F	17.885		16.346	22.373	14.073

Gruppe 2: Beryllium, Strontium, Barium

Beryllium

Tab. A-8: Berylliumgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Fett gedruckt: Ausreißer. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	< 0,5	< 0,5	0,5	< 0,5	0,5	0,5	< 0,5	0,5	< 0,5	< 0,5
Magnetisch	–	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,5	< 0,5	< 0,5	0,6	< 0,5	5,0

Tab. A-9: Berylliumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	0,5	0,7	< 0,5	< 0,5	< 0,5
A	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,6
B	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
C	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5

Tab. A-10: Berylliumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	< 0,5	0,6	0,5	< 0,5	
	E	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	
	F	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	0,6		< 0,5	< 0,5	0,7
	E	< 0,5		< 0,5	< 0,5	< 0,5
	F	< 0,5		< 0,5	< 0,5	< 0,5

Gruppe 2 (Forts.)

Strontium

Tab. A-11: Strontiumgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. RFA: Röntgenfluoreszenzanalyse

RFA	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	393	601	563	500	1.040	535	442	1.410	411	365
Magnetisch	–	407	502	481	505	557	370	844	516	407

Tab. A-12: Strontiumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. RFA: Röntgenfluoreszenzanalyse

RFA	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	618	471	476	417	3.150
A	499	454	425	464	366
B	481	534	583	544	413
C	472	508	551	454	410

Tab. A-13: Strontiumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion					
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm
Kornklasse		V	VI	III	I/II
Anlage	D	439	830	1.402	875
	E	525	453	542	519
	F	434	435	483	382
Grobfraktion					
Korngröße		< 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V	III	II	I
Anlage	D	884	1.569	883	511
	E	525	531	401	412
	F	429	421	359	203

Gruppe 2 (Forts.)

Barium

Tab. A-14: Bariumgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. RFA: Röntgenfluoreszenzanalyse

RFA	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	1.810	2.280	2.510	3.060	2.960	2.410	2.160	3.010	1.950	1.670
Magnetisch	–	2.190	2.220	2.740	2.200	1.930	1.530	2.120	2.470	2.170

Tab. A-15: Bariumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. RFA: Röntgenfluoreszenzanalyse

RFA	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	2.310	2.510	2.820	1.350	4.020
A	2.214	2.360	2.727	1.869	1.250
B	2.327	2.317	2.233	2.228	2.406
C	2.784	2.799	3.085	3.069	2.864

Tab. A-16: Bariumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	1.420	2.247	3.120	2.082	
	E	2.324	2.062	2.397	1.780	
	F	2.065	2.204	2.426	1.890	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	2.530		3.243	2.445	2.100
	E	2.251		2.169	2.023	1.546
	F	2.111		2.130	1.927	921

Gruppe 3 und Seltene Erden: Yttrium, Lanthan, Cer, Samarium, Gadolinium, Erbium

Yttrium

Tab. A-17: Yttriumgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Fett gedruckt: Ausreißer. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	8,2	5,5	7,3	6,5	18,0	7,0	6,4	13,9	5,5	6,2
Magnetisch	–	4,7	6,0	6,7	13,2	5,0	5,3	12,3	4,8	6,2

Tab. A-18: Yttriumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	7,9	8,7	5,4	1,8	3,2
A	7,8	7,5	8,6	3,1	6,6
B	7,7	8,0	8,4	5,4	5,5
C	7,2	7,1	10,6	5,6	5,6

Tab. A-19: Yttriumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm		
Kornklasse	V	VI	III	I/II		
Anlage	D	22,7	30,0	17,8		
	E	6,4	6,8	5,7		
	F	6,1	7,1	7,2		
Grobfraktion						
Korngröße	< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm	
Kornklasse	IV/V		III	II	I	
Anlage	D	17,8		20,4	13,0	17,0
	E	5,3		6,3	5,1	6,6
	F	6,8		6,4	5,7	4,4

Gruppe 3 und Seltene Erden (Forts.)

Lanthan

Tab. A-20: Lanthangehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Fett gedruckt: Ausreißer. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	9,0	10,9	12,3	14,0	11,0	15,3	13,5	12,1	11,4	14,3
Magnetisch	–	9,7	18,6	16,8	14,9	30,3	22,1	10,7	13,4	15,2

Tab. A-21: Lanthangehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	14,9	15,1	9,5	3,8	6,6
A	16,9	14,5	9,2	5,6	9,2
B	13,7	13,4	10,6	9,3	10,6
C	18,6	15,9	29,3	14,1	12,5

Tab. A-22: Lanthangehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	9,6	14,8	13,3	10,8	
	E	21,7	17,7	10,9	12,1	
	F	15,2	15,8	14,1	13,7	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	13,1		18,9	11,8	13,4
	E	14,1		12,3	10,6	13,6
	F	21,7		17,1	13,5	8,3

Gruppe 3 und Seltene Erden (Forts.)

Cer

Tab. A-23: Cergehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	15,2	16,7	22,7	24,3	18,8	21,1	18,0	18,2	17,6	19,8
Magnetisch	–	16,6	19,2	25,1	19,6	25,0	21,4	20,9	21,4	21,2

Tab. A-24: Cergehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	24,2	28,0	14,2	7,6	16,9
A	22,0	22,9	15,0	9,7	16,9
B	22,6	22,1	20,9	18,0	20,5
C	30,2	25,5	36,4	28,4	21,3

Tab. A-25: Cergehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	13,6	22,9	20,3	18,9	
	E	24,6	23,5	17,7	20,2	
	F	17,7	20,0	16,3	15,3	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	20,1		23,5	20,0	24,2
	E	18,5		20,2	21,1	22,8
	F	27,5		17,7	23,0	15,4

Gruppe 3 und Seltene Erden (Forts.)

Samarium

Tab. A-26: Samariumgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Fett gedruckt: Ausreißer. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	1,1	1,2	1,7	1,5	1,3	1,7	3,4	1,4	1,5	1,7
Magnetisch	–	1,1	1,3	1,5	1,2	2,0	1,1	1,1	2,0	1,2

Tab. A-27: Samariumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	1,6	2,1	1,2	0,6	1,2
A	1,6	1,6	1,0	0,8	1,4
B	1,5	1,7	1,5	1,3	1,5
C	1,7	1,7	1,4	1,3	1,4

Tab. A-28: Samariumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	0,9	1,4	1,2	1,2	
	E	1,7	1,6	1,3	1,6	
	F	1,4	1,8	1,2	1,1	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	1,4		1,2	1,1	1,7
	E	1,3		1,4	1,4	1,9
	F	1,8		15,2	1,1	1,3

Gruppe 3 und Seltene Erden (Forts.)

Gadolinium

Tab. A-29: Gadoliniumgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Fett gedruckt: Ausreißer. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	1,0	1,6	1,7	1,5	1,2	2,5	1,5	1,4	1,6	1,3
Magnetisch	–	4,1	24,3	1,6	1,2	3,5	1,9	3,7	2,2	1,3

Tab. A-30: Gadoliniumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	1,5	1,9	1,1	0,5	0,9
A	3,9	3,3	2,3	0,8	1,5
B	1,5	1,6	1,3	1,2	1,3
C	1,7	1,5	1,3	1,3	1,2

Tab. A-31: Gadoliniumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	5,2	2,5	2,2	1,3	
	E	3,5	2,7	1,8	1,8	
	F	2,0	1,6	2,4	2,7	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	2,1		1,8	1,7	2,7
	E	2,4		1,9	1,9	2,1
	F	2,1		1,1	1,0	1,1

Gruppe 3 und Seltene Erden (Forts.)

Erbium

Tab. A-32: Erbiumgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Fett gedruckt: Ausreißer. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	0,4	0,6	0,7	0,9	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7
Magnetisch	–	0,7	0,6	0,8	0,7	1,7	0,6	0,7	0,6	0,8

Tab. A-33: Erbiumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	0,6	0,8	0,5	0,2	0,5
A	0,6	0,7	0,6	0,5	0,6
B	0,7	0,9	0,7	0,7	0,8
C	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8

Tab. A-34: Erbiumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	0,4	0,6	0,6	0,6	
	E	0,6	0,7	0,6	0,6	
	F	0,6	0,7	0,7	0,7	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	0,6		0,6	0,7	0,7
	E	1,2		1,4	0,8	0,9
	F	0,7		0,7	0,8	0,6

Gruppe 5: Vanadium, Tantal

Vanadium

Tab. A-35: Vanadiumgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Fett gedruckt: Ausreißer. RFA: Röntgenfluoreszenzanalyse

RFA	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	46,0	46,0	80,0	75,0	54,0	68,0	56,0	82,0	80,0	59,0
Magnetisch	–	38,0	86,0	89,0	81,0	88,0	56,0	95,0	76,0	59,0

Tab. A-36: Vanadiumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. RFA: Röntgenfluoreszenzanalyse

RFA	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	< 20	51,0	47,0	51,0	66,0
A	51,1	59,9	42,5	43,0	47,0
B	67,2	71,8	80,0	74,4	85,1
C	59,2	84,1	90,5	80,4	82,7

Tab. A-37: Vanadiumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	41,8	52,4	67,5	62,5	
	E	60,1	63,9	61,2	67,7	
	F	63,1	58,4	63,3	53,4	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	49,5		69,3	68,5	87,5
	E	53,2		59,8	72,2	77,0
	F	67,5		48,0	68,6	70,6

Gruppe 5 (Forts.)

Tantal

Tab. A-38: Tantalgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	< 0,025	< 0,025	< 0,025	< 0,025	0,009	< 0,005	< 0,025	0,025	< 0,025	< 0,025
Magnetisch	–	< 0,025	< 0,025	< 0,025	0,025	< 0,025	< 0,025	0,025	< 0,025	< 0,025

Die Tantalgehalte lagen in allen mineralischen und magnetischen Kornklassen unter der Bestimmungsgrenze. Diese betrug 0,025 mg/(kg TS) für die Proben der Anlagen A, B, D und E; 0,05 mg/(kg TS) für die Proben der Anlage F und 0,25 mg/(kg TS) für die Proben der Anlage C. Daher sind keine Werte für die Kornklassen (ohne Trennung in mineralisch/magnetisch) angebar.

Gruppe 6: Wolfram

Wolfram

Tab. A-39: Wolframgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Fett gedruckt: Ausreißer. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	7,3	458	16,4	27,7	40,8	20,9	13,8	31,9	9,9	7,4
Magnetisch	–	43,9	21,4	80,9	86,9	15,2	16,5	147	9,3	8,4

Tab. A-40: Wolframgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	17,1	10,7	4,7	2,0	25,6
A	84,1	76,5	36,1	55,4	20,0
B	42,6	46,6	16,0	11,4	11,1
C	39,0	31,1	24,6	23,2	12,8

Tab. A-41: Wolframgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	30,6	40,6	23,5	486	
	E	19,4	12,2	7,9	8,6	
	F	17,4	16,2	15,6	12,9	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	36,2		33,1	34,0	103,7
	E	13,2		17,3	5,4	10,6
	F	10,9		7,7	5,5	< 2

Gruppe 10: Platin

Platin

Tab. A-42: Platingehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,09	0,05	0,09	0,12	0,05	< 0,05	< 0,05
Magnetisch	–	< 0,05	0,05	0,09	0,05	0,12	< 0,05	0,06	0,07	< 0,05

Tab. A-43: Platingehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	0,1	0,1	< 0,05	< 0,05	< 0,05
A	0,1	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
B	0,1	0,1	< 0,05	< 0,05	< 0,05
C	0,2	0,1	0,1	< 0,05	< 0,05

Tab. A-44: Platingehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	
	E	0,1	0,1	0,1	0,1	
	F	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	0,1		< 0,05	< 0,05	< 0,05
	E	0,2		0,1	0,1	< 0,05
	F	< 0,1		< 0,1	< 0,1	< 0,1

Gruppe 13: Gallium, Indium, Thallium

Gallium

Tab. A-45: Galliumgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	4,2	4,9	5,8	8,6	5,4	6,0	6,1	5,5	5,0	6,0
Magnetisch	–	6,9	7,1	9,2	6,6	7,1	7,9	7,0	7,1	8,2

Tab. A-46: Galliumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	8,5	7,7	4,1	2,0	2,7
A	7,6	7,9	5,1	3,3	6,1
B	5,6	6,6	5,7	5,1	5,4
C	9,5	9,1	7,7	6,7	6,9

Tab. A-47: Galliumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	8,4	6,0	4,7	4,7	
	E	6,1	6,6	5,4	4,9	
	F	6,5	6,7	5,8	6,2	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	6,5		4,5	4,5	6,1
	E	6,5		5,1	5,0	5,4
	F	8,3		5,1	5,0	5,8

Gruppe 13 (Forts.)

Indium

Tab. A-48: Indiumgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Fett gedruckt: Ausreißer. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	0,3	0,7	0,5	0,9	0,7	0,5	0,6	0,2	0,3	0,3
Magnetisch	–	0,8	0,6	1,1	0,6	0,6	0,8	1,3	1,1	1,0

Tab. A-49: Indiumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	0,4	0,6	0,3	0,1	< 0,05
A	0,6	0,8	0,4	0,3	0,3
B	0,5	0,4	0,5	0,6	1,0
C	1,2	1,3	0,6	0,5	0,4

Tab. A-50: Indiumgehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	0,3	0,4	0,3	0,2	
	E	0,7	0,6	0,4	0,2	
	F	0,6	0,5	0,3	0,4	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	0,7		0,5	0,3	0,4
	E	0,5		0,3	0,3	0,2
	F	0,7		0,3	0,3	0,1

Gruppe 13 (Forts.)

Thallium

Tab. A-51: Thalliumgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1
Magnetisch	–	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1

Die Thalliumgehalte lagen in allen mineralischen und magnetischen Kornklassen unter der Bestimmungsgrenze. Diese betrug 0,1 mg/(kg TS) für die Proben der Anlagen A, B, C, D und E und 0,2 mg/(kg TS) für die Proben der Anlage F. Daher sind keine Werte für die Kornklassen (ohne Trennung in mineralisch/magnetisch) angebbbar.

Gruppe 14: Germanium, Zinn

Germanium

Tab. A-52: Germaniumgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Fett gedruckt: Ausreißer. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	< 5	< 5	< 5	< 5	5,0	< 5	< 5	5,0	< 5	< 5
Magnetisch	–	7,9	15,9	5,0	5,4	10,8	11,7	9,0	7,1	10,7

Die Germaniumgehalte lagen in allen mineralischen Kornklassen unter der Bestimmungsgrenze von 5 mg/(kg TS). Daher sind keine Werte für die Kornklassen (ohne Trennung in mineralisch/magnetisch) angebbbar.

Gruppe 14 (Forts.)

Zinn

Tab. A-53: Zinngehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. Fett gedruckt: Ausreißer. RFA: Röntgenfluoreszenzanalyse

RFA	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	195	331	208	498	211	249	245	163	132	149
Magnetisch	–	356	274	467	300	238	263	433	193	335

Tab. A-54: Zinngehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. RFA: Röntgenfluoreszenzanalyse

RFA	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	289	350	240	56	49
A	354	479	235	172	135
B	283	255	203	298	376
C	619	542	391	222	205

Tab. A-55: Zinngehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	162	190	219	113	
	E	229	221	152	100	
	F	252	275	196	207	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	245		258	122	184
	E	193		200	95	93
	F	344		140	128	71

Gruppe 16: Selen, Tellur

Selen

Tab. A-56: Selengehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	0,6	1,0	1,2	2,0	1,9	1,3	1,9	1,7	1,4	1,3
Magnetisch	–	1,2	1,4	2,2	1,6	1,3	2,2	1,5	2,0	3,6

Tab. A-57: Selengehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Rohaschen der Anlagen A, B und C. ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

ICP-MS	Kornklasse				
	< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
	V	VI	III	II	I
A (trocken)	1,4	1,1	0,8	0,5	< 0,5
A	1,7	1,3	0,9	1,1	0,8
B	1,6	1,4	1,1	0,9	1,2
C	3,2	2,3	1,5	1,3	1,0

Tab. A-58: Selengehalte [mg/(kg TS)] in den Kornklassen der untersuchten Fein- und Grobfraktionen der Anlagen D, E und F

Feinfraktion						
Korngröße		< 0,5 mm	0,5 – 2 mm	2 – 8 mm	> 8 mm	
Kornklasse		V	VI	III	I/II	
Anlage	D	3,4	2,1	1,7	1,4	
	E	1,5	1,1	1,1	0,7	
	F	2,2	2,0	1,8	1,8	
Grobfraktion						
Korngröße		< 2 mm		2 – 8 mm	8 – 16 mm	> 16 mm
Kornklasse		IV/V		III	II	I
Anlage	D	2,1		1,3	0,9	1,1
	E	3,7		1,0	0,7	1,0
	F	2,5		1,4	1,3	1,1

Gruppe 16 (Forts.)

Tellur

Tab. A-59: Tellurgehalte [mg/(kg TS)] der mineralischen und magnetischen Wochenmischproben der Anlagen A bis F. RFA: Röntgenfluoreszenzanalyse

RFA	Rohasche				Aufbereitete Asche					
	Trocken	Feucht			Feinfraktion			Grobfraktion		
	A	A	B	C	D	E	F	D	E	F
Mineralisch	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Magnetisch	–	31,0	9,0	25,0	31,0	35,0	< 5	20,0	27,0	21,0

Die Tellurgehalte lagen in allen mineralischen Kornklassen unter der Bestimmungsgrenze von 5 mg/(kg TS). Daher sind keine Werte für die Kornklassen (ohne Trennung in mineralisch/magnetisch) angebbbar.

Müllverbrennungsanlagen Bayern 2012: Abfallinput und Müllverbrennungsauschenoutput

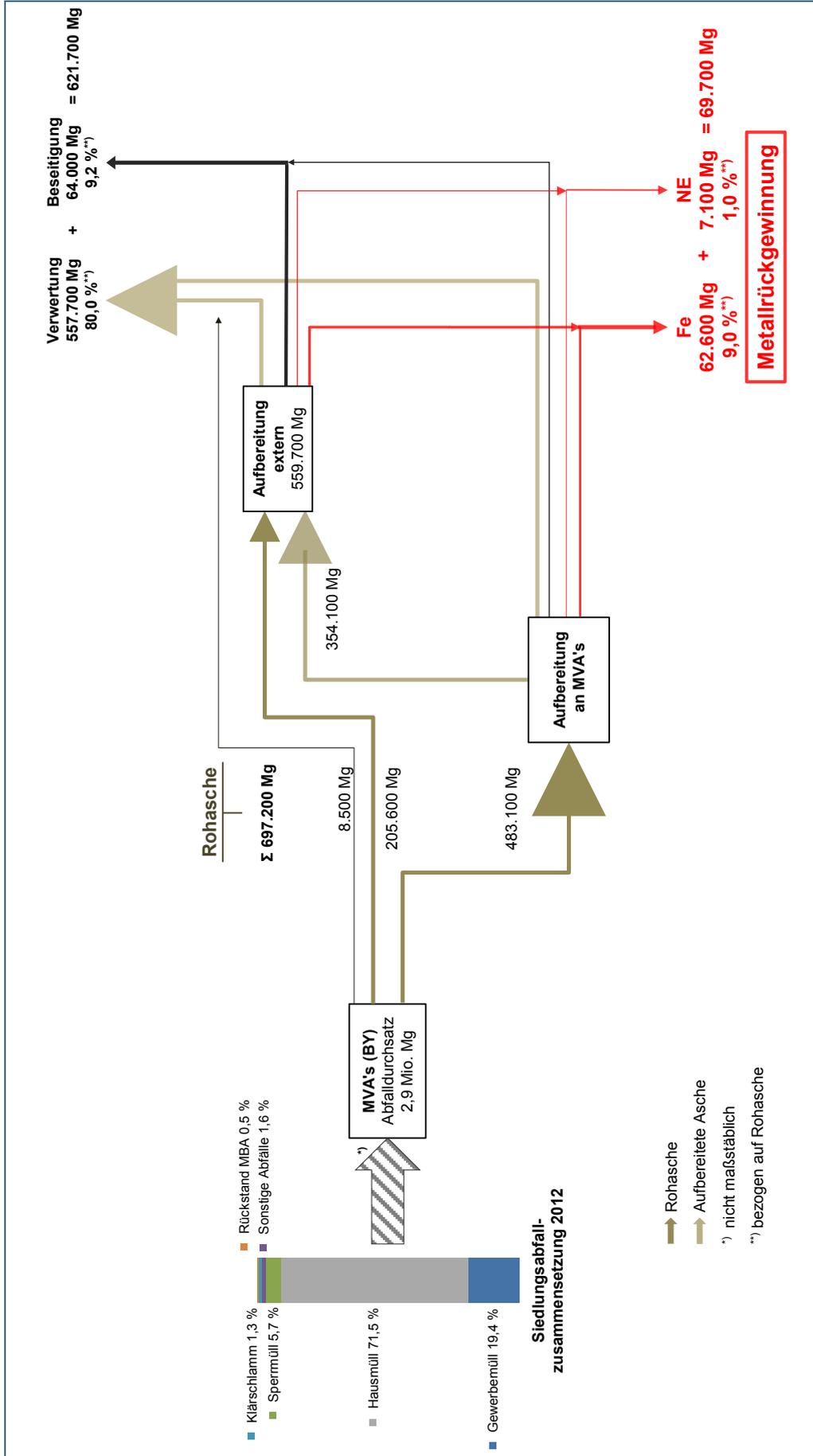


Abb. A-1: Abfallinput (Zusammensetzung) und Stoffströme der aufbereiteten Müllverbrennungsauschen der bayerischen Müllverbrennungsanlagen für das Jahr 2012. Daten beziehen sich auf 13 der 14 Anlagen.

