

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing./DI) der
Studienrichtung „Industrieller Umweltschutz- und Verfahrenstechnik“ an der
Montanuniversität Leoben.

Einfluss der Probenaufbereitung realer Proben auf die Messunsicherheit von umweltrelevanten Parametern

Vorgelegt von:

Romana Kleinböck
0635116

Betreuer:

Univ.-Prof. DI Dr. mont. Roland Pomberger
DI Alexia Aldrian

Leoben, 25.07.2016

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

.....
Datum

.....
Unterschrift

Kurzfassung

Einfluss der Probenaufbereitung realer Proben auf die Messunsicherheit von umweltrelevanten Parametern

Ziel der Umweltanalytik ist es allgemein, Proben auf verschiedene Parameter mittels qualitativen und quantitativen Analysen zu untersuchen. Die quantitative Analyse ist hinsichtlich der Einhaltung von Grenzwerten von großer Relevanz, da Entscheidungen auf Grundlage dieser Ergebnisse getroffen werden. Dementsprechend ist eine Abschätzung der Qualität der Resultate von besonderer Bedeutung. Eine Möglichkeit, um die Ergebnisse zu bewerten, ist das Maß der Messunsicherheit für ein konkretes Analyseverfahren anzugeben. Diese kann für eine Analysenmethode relativ einfach durch den Einsatz von Standardlösungen und Identifizierung aller Einflussfaktoren geschätzt werden. Kommen jedoch weitere Schritte der Probenauf- und -vorbereitung (wie Trocknung, Zerkleinerung, Aufschluss) hinzu, beeinflusst das die Messunsicherheit in schwierig festzustellenden Ausmaß, denn jeder zusätzliche Schritt kann Ursache weiterer Fehler sein. Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden zwei reale Proben (Restmüll und Ersatzbrennstoff) für die Analyse aufbereitet und auf Anionen, Aschegehalt, Glühverlust, Heizwert, gesamten organischen Kohlenstoff (TOC), gesamten Kohlenstoff (TC) und (Schwer-)Metalle hin untersucht. Basierend auf einem durchdachten Aufbereitungs- und Verjüngungsschema wurden pro Proben 20 einzelne Analyseproben erstellt und analysiert. Die erhaltenen Daten wurden statistisch und graphisch ausgewertet. Zusätzlich wurde auch die Messunsicherheit für die Bestimmung der Metalle Magnesium und Chrom mittels Massenspektrometrie mit induktiv gekoppelten Plasma (ICP-MS) berechnet.

Abstract

Influence of sample preparation of real samples on measurement uncertainty of important environmental parameters

The main objective of environmental analysis is the qualitative and quantitative determination of environmentally important parameters for a variety of samples.

Regarding the compliance of limit values, the results of analytical characterisations have a strong impact, because they are often used as basis of decision-making. The potential errors that may occur during a certain analytical method, can be described by specifying the measurement uncertainty. The measurement uncertainty can be estimated by using standard solutions and determination of any influencing factors that occur during the process. If more steps of sample preparation are added to the process (for example drying, shredding, aqua regia digestion), the uncertainty of the test results increases.

With the aim of estimating the influence of the sample preparation on the uncertainty, two real samples (residual waste, substitute fuel) were prepared for a detailed analysis in the course of this master thesis. A particular scheme has been elaborated to generate 20 samples per material.

The following parameters were examined: anions, ash content, loss of ignition, caloric value, total organic carbon (TOC), total carbon (TC) and (heavy) metals. Furthermore, the obtained results were statistically and graphically evaluated. Finally, the measurement uncertainty was estimated for the parameters magnesium and chromium measured by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS).

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	2
1.1 Problemstellung	2
1.2 Zielsetzung	3
2 GRUNDLAGENTEIL.....	4
2.1 Probenaufbereitung	4
2.2 Messunsicherheit.....	9
3 EXPERIMENTELLER TEIL	14
3.1 Probenaufbereitung der realen Proben.....	14
3.2 Angewendete Analyseverfahren	20
4 ERGEBNISSE / DISKUSSION	24
4.1 Probe 1 – Restmüll	24
4.2 Probe 2 – Ersatzbrennstoff	48
5 MESSUNSICHERHEIT	72
6 ZUSAMMENFASSUNG	76
7 VERZEICHNISSE	79
7.1 Literatur.....	79
7.2 Abkürzungsverzeichnis	81
7.3 Tabellen.....	81
7.4 Abbildungen	83

1 Einleitung

In der Umweltanalytik werden Proben auf verschiedene Parameter untersucht, man unterscheidet allgemein zwischen qualitativer und quantitativer Analyse. Die quantitative Analyse hat einen entscheidenden Einfluss hinsichtlich der (gesetzlich vorgeschriebenen) Einhaltung von Grenzwerten. Die Anforderungen an die Laboratorien sind folglich recht hoch, da Ergebnisse der geforderten Qualität zu liefern sind. Auf der anderen Seite soll der Aufwand (z.B. durch viele Wiederholungen) der Messungen möglichst klein gehalten werden. [1, S. 1] Bei der Beurteilung von Messergebnissen muss stets bewusst sein, dass eine kleine Menge an Probenmaterial repräsentativ für eine weitaus größere Menge an Material ist, und schlussendlich nur dieser geringe Anteil stellvertretend analysiert wird. Dementsprechend wichtig ist die repräsentative Probenahme, die sich aber vor allem bei inhomogenen Materialien als besonders schwierig erweist. Ein Beispiel hierfür sind Abfallproben, bei denen nicht nur die Zusammensetzung an sich stark variiert, sondern auch die Partikelgröße sehr unterschiedlich ist. Wird die Probenahme als erster Schritt des gesamten Analysevorgangs nicht ordnungsgemäß ausgeführt, sind die Analyseergebnisse beispielweise trotz korrekter Durchführung der übrigen Schritte (Probenauf- und vorbereitung, Analyse, Datenauswertung) unzuverlässig. [2, S. 2]

Durch Abschätzung der Messunsicherheit wird versucht, die Qualität der Ergebnisse anzugeben. [1, S. 1] Diese Abschätzung gestaltet sich allerdings als sehr aufwendig, da die Messunsicherheit von vielen Einflussfaktoren abhängig ist. Je nachdem, welche Faktoren in die Berechnung einbezogen werden, ändert sich auch die Messunsicherheit, denn sie ergibt sich aus der Summe der Fehler, die während des gesamten Ablaufs auftreten können. [3, S. 458]

Ein Beispiel zur Beurteilung ist die Berechnung der Varianz s^2 einer gesamten Analyseprozedur. Diese lässt sich, in Formel 1 dargestellt, gemäß dem Gesetz der Fehlerfortpflanzungen durch die Summe der Einzelvarianzen beschreiben. [3, S. 451]

$$s^2_{\text{Gesamt}} = s^2_{\text{Probenahme}} + s^2_{\text{Probenaufbereitung}} + s^2_{\text{Probenvorbereitung}} + s^2_{\text{appar. Analytik}} + s^2_{\text{Datenauswertung}} \quad (1)$$

Die Varianz ist als die mittlere quadratische Abweichung der Messergebnisse vom arithmetischen Mittelwert definiert. Oftmals wird deren Quadratwurzel, die Standardabweichung, bei Messergebnissen verwendet, da die gleiche Einheit wie bei den ursprünglichen Ergebnissen wünschenswert ist. [4. S. 1375]

1.1 Problemstellung

Ziel der Laboratorien ist es, den Analysefehler zu minimieren und möglichst nah an den sogenannten (unbekannten) wahren Wert heranzukommen. Bei der Charakterisierung von Abfällen ist eine Vielzahl von einzelnen Schritten notwendig, bis ein Analyseergebnis erhalten werden kann. Vor allem bei festen Abfallproben ist eine aufwendige Probenaufbereitung oftmals nicht zu vermeiden. Jedoch kann jeder weitere Schritt Ursache weiterer Fehler sein.

Die Messunsicherheit ergibt sich aus der Summe jeglicher möglicher Fehler, die während des gesamten Ablaufs, angefangen bei der Probenahme und Probenaufbereitung bis hin zur Analyse und Auswertung, auftreten können. Den größten Einfluss hat dabei die Probenahme, die Probenaufbereitung steht an zweiter Stelle. [3, S. 451]

In Tabelle 1 soll die Vielzahl an möglichen Quellen aufgezeigt werden, die einen Beitrag zur Messunsicherheit bei Probenahme und Probenaufbereitung haben können. [5, S. 11]

Tabelle 1: Auflistung der möglichen Einflussquellen auf die Messunsicherheit [5, S. 11]

Bei der Probenahme	Bei der Probenaufbereitung
Heterogenität (bzw. Inhomogenität)	Homogenisierung bzw. Probenteilung
Effekte der Stichprobenstrategie	Trocknung und Mahlen
Effekte durch unterschiedliche Dichteverteilung der Probemasse	Verdünnungen
Physikalischer Zustand der Probemasse	Extraktion
Temperatur- und Druckeffekte	Aufschluss
Transport und Konservierung	Verunreinigungen

Der Beitrag der einzelnen Schritte zur Messunsicherheit wird z.B. aus der statistischen Verteilung der Resultate von Messserien geschätzt und zumeist durch Standardabweichungen beschrieben.

1.2 Zielsetzung

Durch die Untersuchung mehrerer Materialien soll der Einfluss der Probenaufbereitung auf die Messunsicherheit abgeschätzt werden (siehe Abbildung 1). Hierfür werden zwei unterschiedliche Proben – eine Restmüllprobe und ein Ersatzbrennstoffprobe – für die Analyse aufbereitet und auf eine Vielzahl von Parametern untersucht.

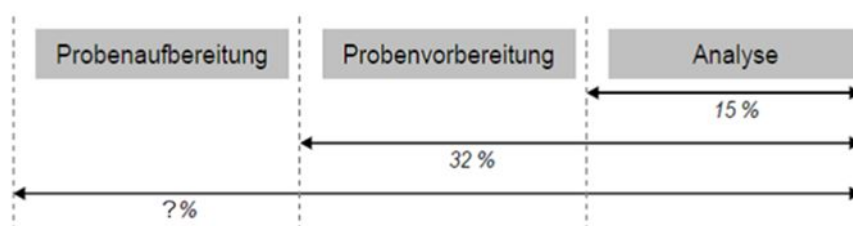


Abbildung 1: Einfluss der unterschiedlichen Schritte auf die Messunsicherheit, nach [3, S. 458]

Die erhaltenen Ergebnisse sollen sowohl statistisch als auch graphisch ausgewertet werden. Des Weiteren soll eine beispielhafte Berechnung der Messunsicherheit der Metalle Magnesium und Chrom für die Bestimmung mittels ICP-MS durchgeführt werden.

2 Grundlagenteil

2.1 Probenaufbereitung

Ziel der Probenaufbereitung ist in erster Linie das Erlangen einer geeigneten Analyseprobe aus dem Ausgangsmaterial. Damit eine Probe als Analysenprobe verwendet werden kann, muss sie in den meisten Fällen aufbereitet werden.

Folgende Definitionen sind laut Norm in Verwendung:

„Probe: Anteil eines Materials, das aus einer größeren Menge dieses Materials ausgewählt wurde

Laboratoriumsprobe: Probe, die an das Laboratorium geschickt oder von diesem erhalten wurde

Untersuchungsprobe/Analysenprobe: aus der Laboratoriumsprobe gewonnene Probe, von der die Prüfmengen zur Untersuchung oder Analyse entnommen werden“ [6, S. 5].

„Prüfmenge/Analysenmenge: geeignete Menge eines Materials für die Messung der Konzentration oder anderer interessierender Eigenschaften, die der Untersuchungsprobe entnommen wurde

ANMERKUNG: Die Prüfmenge kann der Laboratoriumsprobe direkt entnommen werden, falls keine Aufbereitung der Probe erforderlich ist (z. B. bei Flüssigkeiten oder Proben mit geeigneter Homogenität, Größe und Feinheit); üblicherweise erfolgt die Entnahme aus der aufbereiteten Untersuchungsprobe.

Teilprobe

Probe, die durch Verfahren erhalten wurde, bei denen die interessierenden Parameter in Teilen gleicher oder ungleicher Größe zufällig verteilt sind

ANMERKUNG: Eine Teilprobe kann sein:

- a) ein Teil einer Probe, der durch Auswahl oder Aufteilung erhalten wurde;*
- b) die Endprobe einer mehrstufigen Probenaufbereitung.“ [6, S. 6]*

Ein Überblick über den grundsätzlichen Ablauf bei direkten und indirekten Verfahren ist in Abbildung 2 zu sehen. Die zwei wichtigsten Schritte sind hierbei die Reduktion der Partikelgröße und die Probenteilung. Laut Norm bezeichnet man eine Laborprobe dann als Analyseprobe, wenn sie nach der Aufbereitung eine Partikelgröße kleiner 1 mm besitzt und für nachfolgende chemische und physikalische Analysen verwendet werden kann. Immer zu beachten ist, dass jede Teilprobe für die Ausgangsprobe repräsentativ sein muss. [7, S. 8-9].



Abbildung 2: Ablaufschema von der Probenahme bis zur Auswertung der Ergebnisse für indirekte und direkte Verfahren [3, S. 451]

Der Umfang der Aufbereitung bzw. die Reihenfolge der einzelnen Schritte wird durch die Art der Probe bestimmt und ist abhängig davon, welche Parameter bestimmt werden sollen (besondere Vorhergehensweise z.B. bei flüchtigen Verbindungen). Weiters unterscheidet sich die erforderliche Menge an Probenmaterial, die für die jeweiligen Analyseverfahren notwendig sind. Die Probenaufbereitung beinhaltet z.B. Phasentrennung, Trocknung, Entfernen von Störstoffen, Korngrößenreduzierung, Homogenisierung und Probenteilung. [6, S. 8-14] Folgenden Begriffe werden in der Norm definiert:

„Homogenisierung: gleichmäßiges Vermischen von Bestandteilen, Teilchen oder Schichten zur Herbeiführung eines homogenen Zustandes der ursprünglichen Proben (im Fall von Mischproben) oder der vorbehandelten Fraktionen von Proben, um eine gleichmäßige Verteilung von Stoffen und Eigenschaften in der Probe sicherzustellen“ [6, S. 6].

„Phasentrennung: Trennung von Fraktionen Prozess der Teilung von Bestandteilen, Teilchen oder Schichten, wenn die Homogenisierung der Probe praktisch nicht durchführbar ist und/oder die Analyse von unterschiedlichen Fraktionen oder Phasen angebracht ist

Trocknen: Vorgang, bei dem Wasser aus der Probe entfernt wird

Korngrößenreduzierung: mechanisches Zerkleinern der Probe durch Mahlen, Zerreiben, Brechen oder Schneiden

Probenteilung: Vorgang, bei dem eine oder mehrere Teilproben von einer Probe gewonnen werden“ [6, S. 7].

Als Hilfe zur Entscheidungsfindung bezüglich der Reihenfolge der Arbeitsschritte, um die Prüfmenge aus der Laboratoriumsprobe zu gewinnen, dient ein Fließdiagramm, das in Abbildung 3 zu sehen ist. Die einzelnen Aufbereitungsschritte sind in einem Iterationszyklus so lange zu wiederholen, bis die analytischen Anforderungen erfüllt sind und die Prüfmenge schlussendlich gewonnen wurde. [6, S. 9]

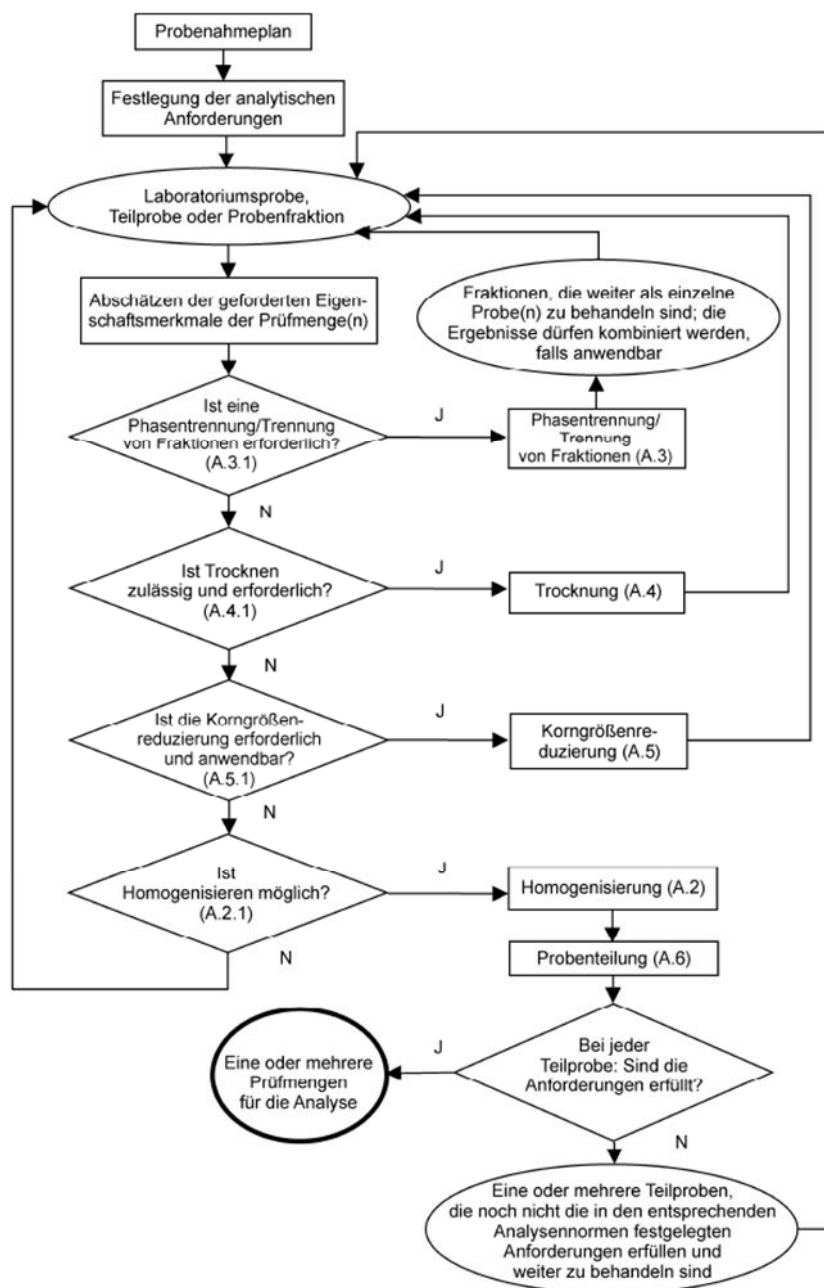


Abbildung 3: Fließdiagramm zur Entscheidungsfindung für die Gewinnung einer repräsentativen Prüfmenge aus einer Laboratoriumsprobe [6, S. 10]

Für die sachgerechte Herstellung der Analyseprobe ist die Verwendung von geeigneten Geräten maßgeblich. Jedes Verfahren beeinflusst das Analyseergebnis auf gewisse Weise, so können gerätebedingt Verunreinigungen z.B. durch Abrieb, Verschleppung von Kontaminationen oder chemischer Freisetzung auftreten. Wichtig ist daher, dass jegliche verwendeten Gefäße und Geräte aus einem mit der Probe verträglichen Material hergestellt sind. Des Weiteren ist eine Verschleppung von Kontaminationen durch Reinigung der Utensilien so gut wie möglich zu verhindern. [6, S. 7-8]

Der genaue Ablauf der Probenaufbereitung ist aufgrund der großen Vielfältigkeit an Probenmaterial und -beschaffenheit kaum vorherzusagen. Oft ist eine Vorzerkleinerung der Laborprobe auf eine Korngröße von etwa 30 mm notwendig, und möglich enthaltene Störstoffe wie FE-Metalle, Steine und Glas sind zu entfernen, bevor nachfolgende Zerkleinerungsprozesse durchgeführt werden können. [8, Teil 3, S. 2] Vor der Zerkleinerung der Probe wird diese meist getrocknet, da das enthaltene Wasser die nachfolgenden Behandlungen stören könnte. [9, S. 15]

Bei der Grobzerkleinerung kommen z.B. Shredder, Siebe und Grobschneidmühlen zum Einsatz. [7, S. 24-26, 33] Ein Beispiel für ein Zerkleinerungsaggregat der Grobzerkleinerung ist der Doppelwellenzerkleinerer (Zerkleinerung auf eine Korngröße von ca. 2-50 mm) aus Abbildung 4. Das Material wird durch Schneidmesser, die sich entgegengesetzt zueinander bewegen, zerkleinert. [8, Teil 3, S. 5] Oftmals ist davor die Behandlung der Probe mit Trockeneis oder flüssigen Stickstoff zur Versprödung von weichen und zähen Materialien erforderlich. [7, S. 24-26, 33]

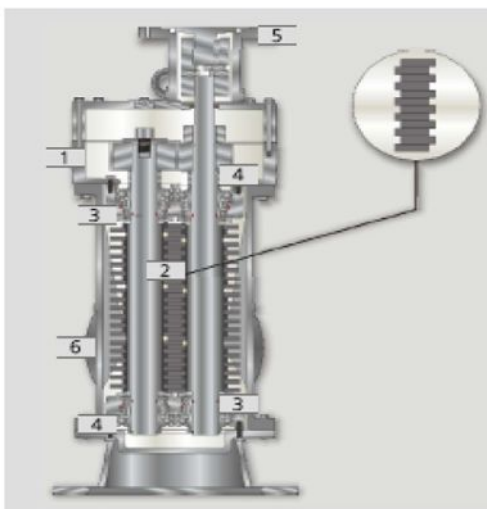


Abbildung 4: Doppelwellenzerkleinerer zur Vorzerkleinerung des Materials [8, Teil 3, S. 5]

Bei der Feinzerkleinerung wird die Partikelgröße auf unter 1 mm reduziert, wofür wiederum Schneidmühlen (siehe Abbildung 5) oder auch andere Mühlen eingesetzt werden können. Schneidmühlen kommen bevorzugt bei der Zerkleinerung von elastischen, gummiartigen und weichen Material zum Einsatz, das Aufgabegut kann dabei länglich, sperrig, dünn und stark verformbar sein (z.B. Kunststoffstränge, Leder, Holz, Metallbleche). [10, S. 141] Vor allem beim Zerkleinern von zähen und weichen Materialien kann es zu einer Erwärmung der Mühle

und somit der Probe kommen, die die Zusammensetzung der Probe negativ beeinflussen kann. In solchen Fällen ist eine Versprödung bzw. Kühlung durch den Einsatz von Trockeneis oder flüssigen Stickstoff notwendig. [7, S. 24-26, 33]

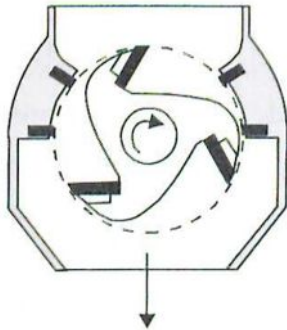


Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer Schneidmühle [10, S. 141]

Die Probenverjüngung erfolgt meist durch die Viertelteilungsmethode (dargestellt in Abbildung 6), die zu den weitverbreitetsten Methoden gehört. Hierfür wird die Probe auf sauberen Untergrund aufgebracht und in vier gleich große Teile geteilt. Anschließend werden zwei gegenüberliegende Viertel ausgewählt, welche zur Weiterverarbeitung verwendet werden, während die anderen zwei Viertel verworfen werden. [11, S. 11-12, 119]

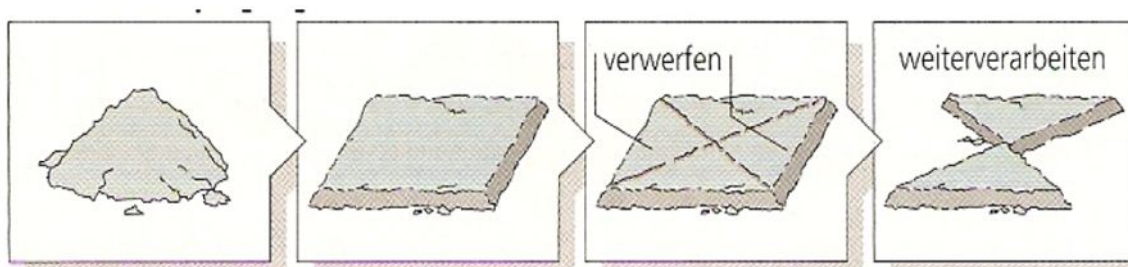


Abbildung 6: Durchführungsschema der Probenverjüngung [8, Teil 3, S. 2]

2.2 Messunsicherheit

Die Messunsicherheit ist ein Maß dafür, inwiefern das Messergebnis mit dem Resultat einer anderen unabhängigen Methode übereinstimmt. [1, S. 1] Folgende Definition bezüglich der Unsicherheit wird laut EURACHEM/CITAC Leitfaden bei der Ermittlung der Messunsicherheit bei analytischen Messungen verwendet:

„Unsicherheit ist ein Parameter, assoziiert mit dem Ergebnis einer Messung, der die Streuung der Werte charakterisiert, die treffenderweise der Messgröße zugeordnet werden können.

ANMERKUNG 1: Der Parameter kann zum Beispiel eine Standardabweichung [B.23] (oder ein gegebenes Vielfaches davon) oder die Breite des Konfidenzintervalles sein.

Mit [B.23] – Standardabweichung einer Stichprobe. Ein Schätzwert für die Standardabweichung σ einer Gesamtheit aus einer Probe von n Ergebnissen.

ANMERKUNG 2: Die Unsicherheit von Messungen schließt generell viele Komponenten ein. Einige dieser Komponenten können aus der statistischen Verteilung der Resultate von Messserien geschätzt und durch Standardabweichungen charakterisiert werden.“ [1, S. 4, 95]

Weitere wesentliche Definitionen werden nachfolgend aufgeführt:

„Es ist wichtig, zwischen "Fehler" bzw. „Messabweichung" und Unsicherheit zu unterscheiden. Die Messabweichung [B.19] ist definiert als Differenz zwischen einem individuellen Ergebnis und dem wahren Wert [B.3] der Messgröße. Als solcher ist eine Messabweichung ein einzelner Wert. Im Prinzip kann der Wert einer bekannten Messabweichung als Korrektur des Ergebnisses verwandt werden.

ANMERKUNG: Die Begriffe "Fehler" bzw. „Messabweichung" beruhen auf einem idealisierten Konzept; sie können nicht exakt bestimmt werden.

Mit [B.19] – Messabweichung: Messergebnis minus einem wahren Wert der Messgröße; und

[B.3] – Wahrer Wert: Wert, der mit der Definition einer betrachteten speziellen Größe übereinstimmt.

ANMERKUNG 1: Diesen Wert würde man bei einer idealen Messung erhalten.

ANMERKUNG 2: Wahre Werte sind ihrer Natur nach nicht bestimmbar.“ [1, S. 5, 93]

„Die Unsicherheit stellt ein Intervall dar und kann, wenn sie für eine analytische Methode und eine definierte Probe bestimmt wird, für alle Bestimmungen, die auf genau diese Art durchgeführt sind, herangezogen werden. Allgemein darf der Wert der Unsicherheit nicht zur Korrektur eines Messergebnisses verwendet werden.“ [1, S. 5]

Einer der größten Einflüsse auf das Messergebnis ist die Probenahme. Die Gewinnung einer repräsentativen Probe ist somit stets das oberste Ziel. Bei der Durchführung stößt man dabei allerdings oft auf Schwierigkeiten, denn die gezogenen Stichproben sollen stellvertretend für oft sehr große Abfallmengen stehen (vergleiche Abbildung 7). [3, S. 452]

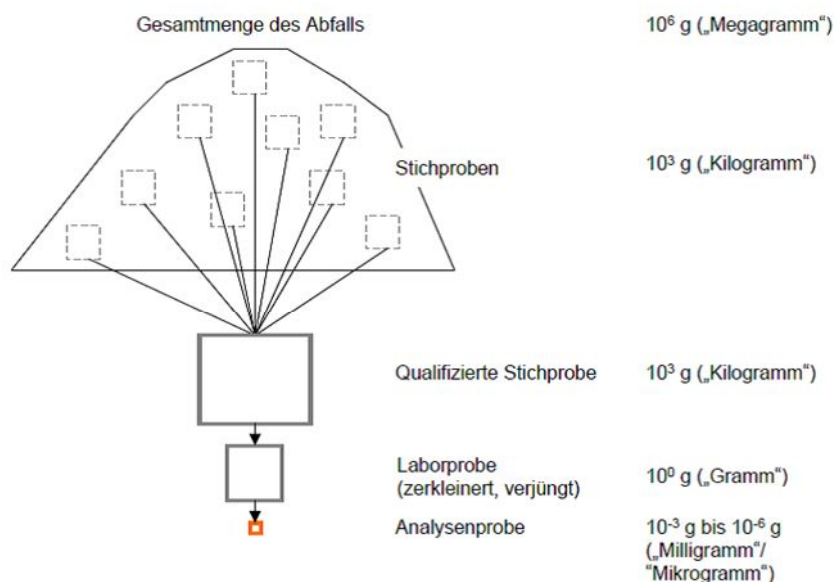


Abbildung 7: Vergleich der Mengen der ursprünglichen Probe bis zur Analyseprobe [3, S. 453]

Erschwerend kommt die meist unterschiedliche Beschaffenheit des Materials hinzu, denn bei den meisten festen Abfällen handelt es sich um sehr heterogene Gemische, die sich unter anderem hinsichtlich Korngröße, Kornform und Wassergehalt unterscheiden. [3, S. 450]

Bei der Probenaufbereitung sind folgende Faktoren von großer Relevanz: Veränderung der Probe durch hohe mechanische oder thermische Belastung, Probenänderung während Transport oder Lagerung (z.B. Probenalterung durch Licht) und Kontamination durch verunreinigte Gerätschaften. [12, S. 5]

Zusätzlich zu den Fehlern, die bei Probenahme und Probenaufbereitung auftreten können, kommt der mögliche Fehler des Analyseverfahrens hinzu. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen systematischen und zufälligen Fehlern. Systematische Fehler werden zum Beispiel durch fehlerhafte Kalibrierung, ungeeignete Messmethoden oder Matrixeffekten verursacht, währenddessen zufällige Fehler durch menschliche Fehler begründet werden, und sich dementsprechend nicht vermeiden lassen. [3, S. 450-451]

Die Kombination aus systematischen und zufälligen Messabweichungen wird als Genauigkeit bezeichnet, die abhängig von Präzision und Richtigkeit ist (siehe Abbildung 8).

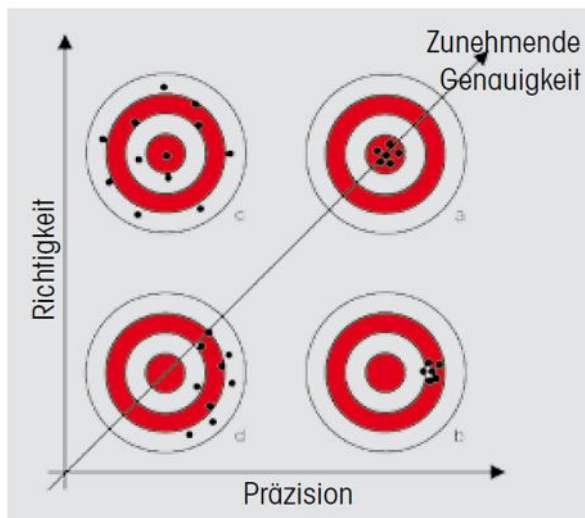


Abbildung 8: Höhere Genauigkeit durch höhere Richtigkeit und Präzision [12, S. 3]

Die Präzision gibt an, inwiefern die Messwerte um ihren Mittelpunkt streuen, sie wird durch die Größe des zufälligen Fehlers bestimmt. Die Richtigkeit dagegen wird durch die Summe der systematischen Fehler beeinflusst, ist demnach als Differenz zwischen dem Mittelwert einer Messreihe und dem als (trotz möglichen Unsicherheiten) „richtig“ anerkannten Wert definiert. Die Genauigkeit als Oberbegriff umfasst folglich beide Fehler, als genau wird ein Ergebnis bezeichnet, das frei von systematischen und zufälligen Fehlern ist. [12, S. 2-4]

Hinsichtlich der gewünschten Bestimmung der Messunsicherheit inklusive Probenaufbereitung, soll die sogenannte Wiederholpräzision (eine Unterart der Präzision – auch Wiederholbarkeit genannt) dargelegt werden. Die Wiederholbarkeit gibt die Streuung zwischen Ergebnissen derselben Messgröße an, die aufeinander folgend bei Wiederholbedingungen bestimmt werden. Die Wiederholbedingungen gelten dann als erfüllt, wenn folgende Faktoren als konstant angenommen werden können: Probenmaterial, Probenahme und Probenpräparation, Messverfahren, -instrumente, und -methoden, Ort, Umgebungsbedingungen, Messtechniker und Durchführung der Messreihe innerhalb einer kurzen Zeitspanne. Quantitativ wird die Wiederholbarkeit durch die Standardabweichung angegeben, die häufig als Prozent vom Mittelwert ausgedrückt wird. [12, S. 2-4]

Die Standardabweichung (oft auch Streuung genannt) dient allgemein als Kenngröße zur Charakterisierung der Schwankungen von Ergebnissen um den Mittelwert, die bei einer Messreihe auftreten. [10, S. 79]

Abschließend wird das Verfahren der Unsicherheitsermittlung, das laut EURACHEM/CITAT Leitfaden zur Abschätzung der Unsicherheit eines Messergebnisses vorzunehmen ist, näher erläutert. [1, S. 11]

Abb. 1: Das Verfahren der Unsicherheitsermittlung

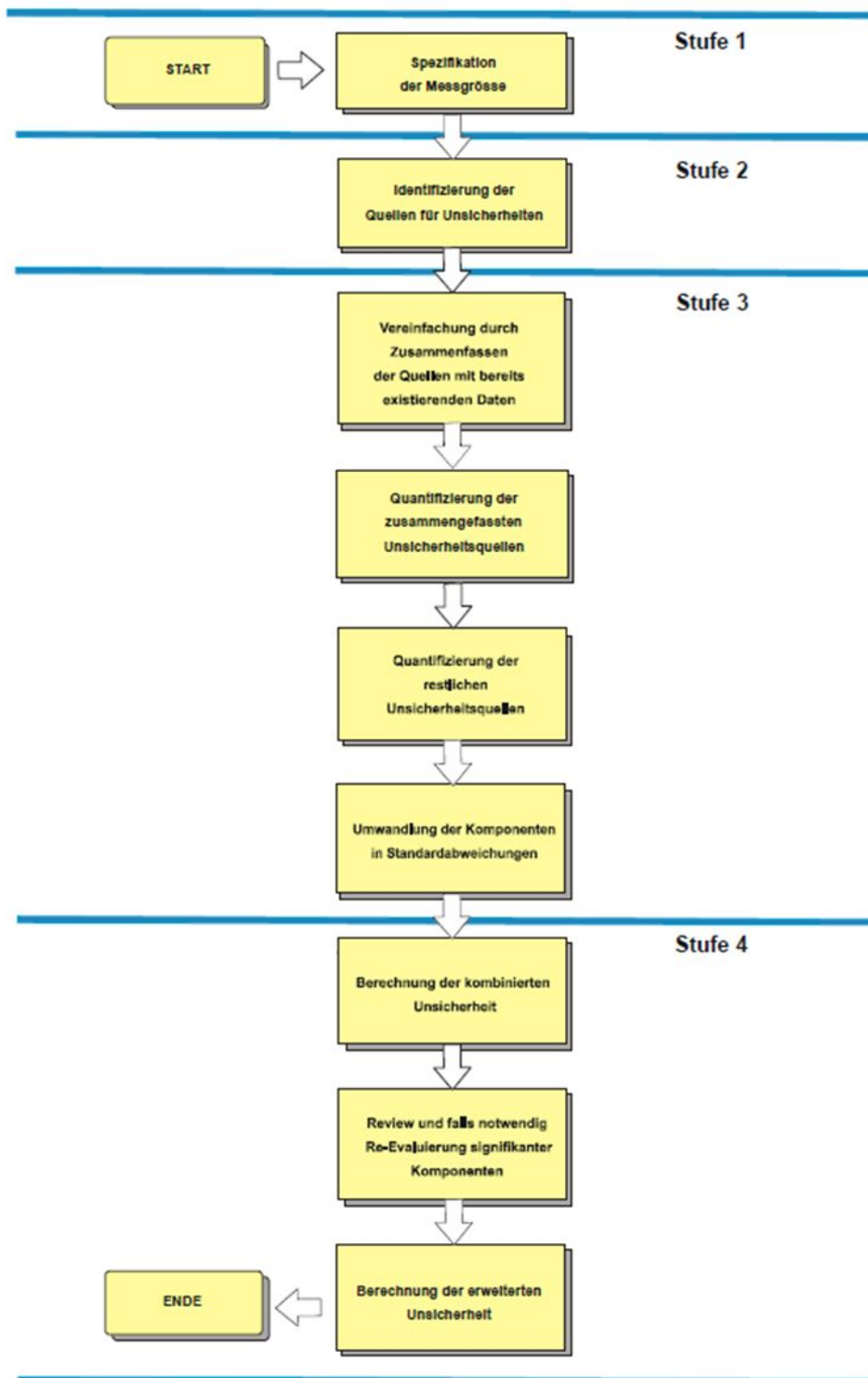


Abbildung 9: Schematischer Ablauf der Berechnung der Messunsicherheit [1, S. 12]

Die durchzuführenden Schritte sind in den folgenden 4 Stufen beschrieben:

„Stufe 1. Spezifizierung der Messgröße

Die Messgröße ist deutlich zu beschreiben, insbesondere ist die Beziehung zwischen der Messgröße und den Parametern (gemessene Mengen, Konstante, Kalibrierstandards), von denen sie abhängt, anzuführen. Wenn möglich, sind Korrekturen für bekannte systematische Effekte einzubeziehen. Diese spezielle Information soll üblicherweise in der relevanten Standardverfahrensvorschrift (Standard Operating Procedure, SOP) oder einer anderen Methodenbeschreibung niedergelegt werden.

Stufe 2. Identifizierung der Quellen der Unsicherheit

Alle möglichen Unsicherheitsquellen sind aufzulisten. Dies schließt die Quellen der Unsicherheit für jeden Parameter und seine Beziehungen zur Messgröße, so wie in Stufe 1 spezifiziert sind, aber auch andere Quellen ein. Chemische Annahmen müssen ebenfalls einbezogen werden. Ein allgemeines Verfahren, um eine strukturierte Liste zu formulieren, wird in Anhang D vorgestellt.

Stufe 3. Quantifizierung der Unsicherheitskomponenten

Man messe oder schätze die Unsicherheitskomponente für jede identifizierte potentielle Unsicherheitsquelle. Es ist oft möglich, einen gemeinsamen Anteil der Unsicherheit für eine Anzahl verschiedener Quellen zu messen oder zu schätzen. Es ist wichtig zu beurteilen, ob die verfügbaren Daten ausreichend für alle Unsicherheitsquellen sind, und gegebenenfalls zusätzliche Experimente und Untersuchungen zu planen um sicherzustellen, dass alle Unsicherheitsquellen angemessen berücksichtigt werden.

Stufe 4. Berechnung der Gesamtunsicherheit

Die Informationen aus Stufe 3 enthalten eine Zahl quantifizierter Anteile der gesamten Unsicherheit, die mit einzelnen Quellen oder mit dem zusammengefassten Effekt verschiedener Quellen verbunden sind. Diese Anteile können als Standardabweichung angegeben und gemäß den entsprechenden Regeln kombiniert werden, um eine kombinierte Standardunsicherheit zu erhalten. Ein geeigneter Erweiterungsfaktor soll verwendet werden, um die erweiterte Unsicherheit zu erhalten.“ [1, S. 11]

3 Experimenteller Teil

3.1 Probenaufbereitung der realen Proben

Zur Bestimmung des Einflusses der Probenaufbereitung auf die Messunsicherheit wurde die nähere Betrachtung und Analyse von zwei Proben, einerseits eines aufbereiteten Restmülls und andererseits eines Ersatzbrennstoffs, gewählt. Für die Abschätzung der Messunsicherheit ist die Kenntnis der Wiederholbarkeit eines Verfahrens unerlässlich. Aus diesem Grund wurde für jedes der Materialien eine Messreihe, bestehend aus 20 Proben, erstellt. Um beispielsweise eine statistische Evaluierung der Qualität eines Ersatzbrennstoffes durchzuführen, sind grundsätzlich mindestens zehn Analyseergebnisse notwendig [3, S. 463]. In diesem Fall wurde für eine aussagekräftigere Analyse die doppelte Anzahl an Ergebnissen gewählt, weiters sollen dadurch mögliche Inhomogenitäten der Probe erkennbar sein.

Bei beiden Probenfraktionen bestand die angelieferte Menge aus 10 kg Material, aus denen jeweils fünf Teilproben gewonnen wurden. Diese fünf Teilproben wurden anschließend zu Analyseproben aufbereitet. Pro Teilprobe wurden vier Analyseproben entnommen, was zu einer Gesamtanzahl von 20 Proben je Probenmaterial führte.

Die Behandlung und Vorgehensweise bei der Probenaufbereitung war bei beiden Proben grundsätzlich ident, die genaue Beschreibung der einzelnen Analyseverfahren folgt in den nachfolgenden Kapiteln. Ein Überblick der bestimmten Parameter ist in Abbildung 10 zu sehen.

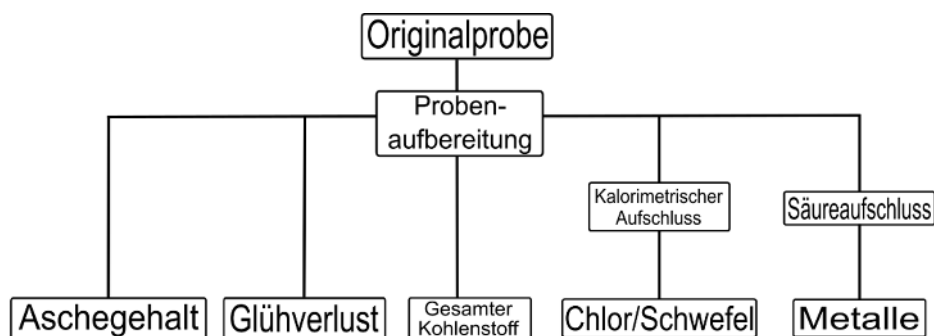


Abbildung 10: Die bei der Analyse bestimmten Parameter

Um aus den 10 kg Probenmaterial die jeweils endgültige Probe zur Erlangung der Analyseprobe gewinnen zu können, musste das Material zerkleinert, gemischt, homogenisiert und verjüngt werden. Zur Probenverjüngung wurde die Viertelteilungsmethode durchgeführt, die in Kapitel 2.1 beschrieben und in Abbildung 6 dargestellt wurde.

Probe 1 – Aufbereiteter Restmüll

Bei der Probe 1 handelte es sich um einen aufbereiteten Restmüll mit einer Korngröße von 30 mm. Dieser war sowohl vom biogenen Anteil als auch von Metall entfrachtet. Ein Überblick der genauen Merkmale ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht der Eigenschaften von Probe 1

Probe 1 – Aufbereiteter Restmüll				
Korngröße	Art der Probe	Beschreibung	Probennummer	Trockensubstanz
30 mm	mittelkalorische Fraktion	Anreicherung von Kunststoff, Textil und Papier; metallentfrachtet; Entfrachtung des biogenen Anteils	1-20	94,1 %

In Abbildung 11 ist die Vorgehensweise für die Gewinnung der 20 Analyseproben aus Probe 1 ersichtlich. Die ursprüngliche Probe wurde zu fünf Teilproben verjüngt. Nach der Feinzerkleinerung wurden je Teilprobe vier Analyseproben entnommen.

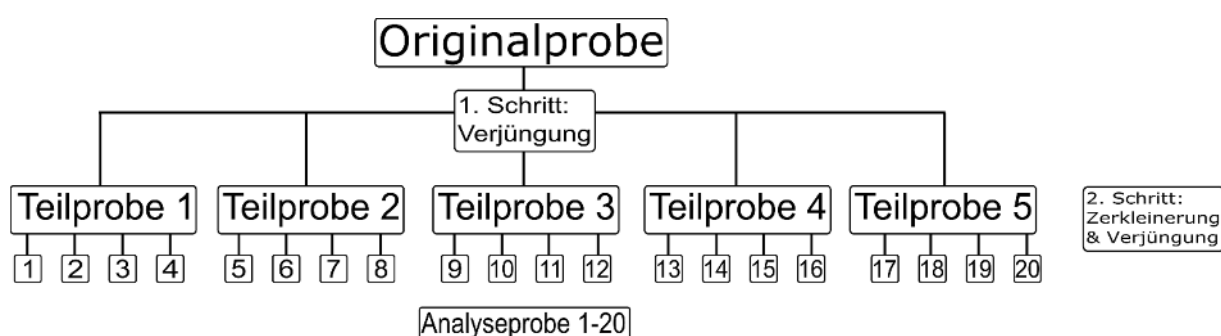


Abbildung 11: Probenaufbereitungsplan für die Gewinnung der 20 Analyseproben – Probe 1

Bei der Probe 1, zu sehen in Abbildung 12, war aufgrund des angelieferten Zustandes und der Korngröße keine Vorzerkleinerung notwendig. Mit der Trocknung bei 105° C und der Aussortierung der Störstoffe (vgl. Tabelle 3) konnte direkt begonnen werden.



Abbildung 12: Probe 1 im unveränderten Zustand

Tabelle 3: Summe der aussortierten Störstoffe bei Probe 1

Störstoffe Probe 1		
Metalle [g]	Glas [g]	Mineralien [g]
192,8	337,5	479,6

Nach dem Aussortieren der Störstoffe wurde die Feinzerkleinerung der Probe mit einer Schneidmühle durchgeführt (siehe Abbildung 13). Die Beschreibung der Schneidmühle und ihr schematische Aufbau ist in Kapitel 2.1 zu sehen.



Abbildung 13: Schneidmühle

Nach der Feinzerkleinerung wurde die erforderte Korngröße $< 0,5$ mm erreicht. Die vollständig aufbereitete Probe ist in Abbildung 14 zu sehen.



Abbildung 14: Probe nach der Feinzerkleinerung

Probe 2 – Ersatzbrennstoff

Bei Probe 2 wurde ein Ersatzbrennstoff aus einer österreichischen Abfallaufbereitungsanlage näher betrachtet. In Tabelle 4 sind die Eigenschaften dargestellt.

Tabelle 4: Übersicht der Eigenschaften von Probe 2

Probe 2 – Ersatzbrennstoff				
Korngröße	Art der Probe	Beschreibung	Probennummer	Trockensubstanz
20-50 mm	hochkalorisch (Main-Burner-Qualität)	ofenfertig	21-40	89,9 %

In Abbildung 15 ist der Aufbereitungsplan und die Vorgehensweise zur Gewinnung der 20 Analyseproben für Probe 2 zu sehen (Probennummer 21-40). Im Unterschied zur Restmüllprobe wurde bei Probe 2 eine Vorzerkleinerung vor der ersten Probenverjüngung durchgeführt. Im zweiten Schritt wurden die fünf Teilproben feinerzerkleinert und wiederum 4 Analyseproben je Teilproben entnommen.

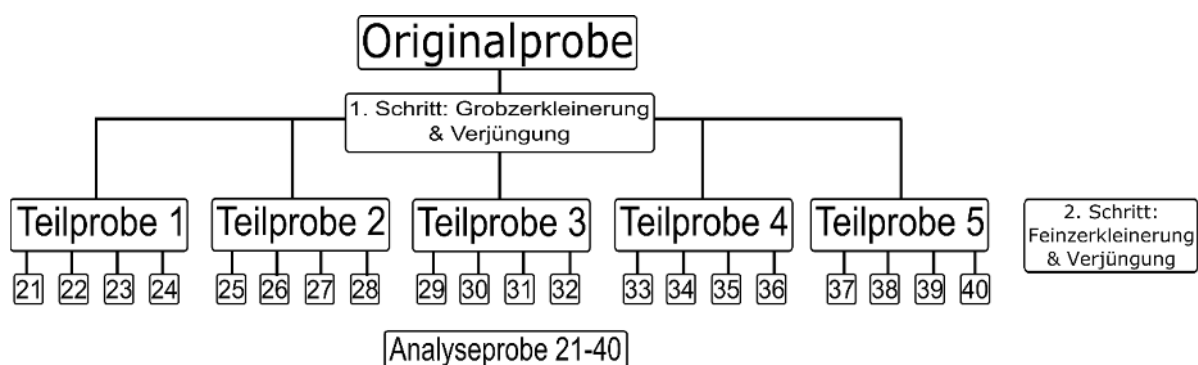


Abbildung 15: Probenaufbereitungsplan für Probe 2

Der Ersatzbrennstoff, in Abbildung 16 ist die Probe in Anlieferungsform dargestellt, ist einer Vorzerkleinerung mittels Doppelwellenzerkleinerer (vgl. Kapitel 2.1 und Abbildung 4) aufgrund der Korngröße unterzogen worden.



Abbildung 16: Probe 2 vor der Grobzerkleinerung

In Abbildung 17 ist die Probe nach der Vorzerkleinerung zu sehen. Anschließend wurde die Probenverjüngung (vgl. Kapitel 2.1) durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 18 ersichtlich.



Abbildung 17: Probe 2 nach der Vorzerkleinerung mit einem Doppelwellenzerkleinerer



Abbildung 18: Probe 2 nach der Vorzerkleinerung und Probenteilung

Nach der Vorzerkleinerung wurde die Probe im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet, um den Wassergehalt zu bestimmen. Die Stoffe, die bei der Zerkleinerung mit der Schneidmühle stören würden (Steine, Metalle, Glas), wurden aussortiert und sonstige, für die Pulverisette zu große Teile händisch nachzerkleinert. (siehe Abbildung 19 und Tabelle 5)



Abbildung 19: Aussortierung der Störstoffe und händische Zerkleinerung

Tabelle 5: Summe der aussortierten Störstoffe bei Probe 2

Störstoffe Probe 2		
Metalle [g]	Glas [g]	Mineralien [g]
3,2	10,9	23,5

Nach der abgeschlossenen Aussortierung wurde der Ersatzbrennstoff mittels Schneidmühle (vgl. Kapitel 2.1) zerkleinert. Die aufbereitete Probe ist in Abbildung 20 zu sehen.



Abbildung 20: Probe nach der Feinzerkleinerung

3.2 Angewendete Analyseverfahren

Brennwert-Heizwert

Als Brennwert wird die Wärmemenge bezeichnet, die bei vollständiger Verbrennung der Probe frei wird, wobei sowohl das vorhandene als auch das beim Verbrennen gebildete Wasser im flüssigen Zustand vorliegt. Im Gegensatz dazu liegt das Wasser beim Heizwert nach der Verbrennung im gasförmigen Zustand vor.

Die Verbrennung wurde in einem Bombenkalorimeter (IKA Kalorimeter C 7000) unter festgelegten Bedingungen durchgeführt. Aufbau der sogenannten kalorimetrischen Bombe ist in Abbildung 21 dargestellt. Die Probe wurde eingewogen (oftmals in gepressten Zustand) und der Tiegel danach in der kalorimetrischen Bombe platziert. Anschließend folgte das Anbringen des Zünddrahtes und des Baumwollfadens an der Probe. Vor der Zündung wurde die Bombe geschlossen und langsam mit Sauerstoff gefüllt, bis der gewünschte Druck erreicht ist. [13, S. 5-10]

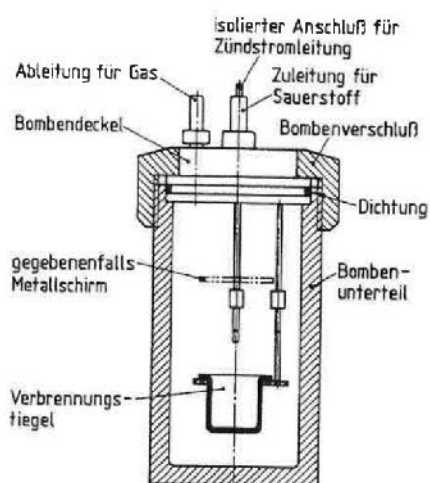


Abbildung 21: Aufbau einer kalorischen Bombe [13, S. 6]

Durch die Wärme die während der Verbrennung entsteht, erhöht sich die Temperatur des Kalorimeters gegenüber seiner Anfangstemperatur. Diese Temperaturerhöhung wurde jeweils gemessen und der Brennwert aus verschiedenen Parametern (u.a. Temperaturerhöhung des Kalorimeters, Wärmekapazität des Kalorimeters, Einwaage der Brennstoffprobe, etc.) errechnet. [13, S. 5-10]

Schwefel- und Chlorgehalt

Um den Schwefel- und Halogengehalt eines Materials zu bestimmen, wird die feste Probe in einem geschlossenen System (kalorimetrische Bombe, IKA Kalorimeter C 7000, vgl. Abbildung 21) verbrannt. Die dabei entstehenden Verbrennungsgase werden mittels

Absorptionslösung (Natriumhydrogencarbonat und Natriumcarbonat) aufgefangen. Zur Analyse dieser Absorptionslösung kommt die Ionenchromatographie zum Einsatz.

Zu Beginn des Verfahrens erfolgte die Einwaage von ca. 1 g Probe in den Probeniegel, der daraufhin in der Bombe platziert wurde. Der Zünddraht wurde mit der Probe in Kontakt gebracht, die Bombe geschlossen und Sauerstoff vorsichtig zugeführt (um das Aufwirbeln der Probe zu vermeiden). Anschließend wurde die Zündung der Bombe durch das Schließen des Zündkreises gestartet. Durch die Verbrennung fand die Überführung des Gesamtgehaltes an Schwefel in Sulfat bzw. des Chlorgehaltes in Chloride statt. Diese entstandenen Gase wurden durch die Absorptionslösung aufgefangen, welche anschließend auf ein Endvolumen von 100 ml aufgefüllt und mittels Ionenchromatographie analysiert wurden. [14, S. 5-10]

Aschegehalt

Bei der Analyse des Aschegehalts wird der Rückstand bestimmt, der nach der vollständigen Verbrennung der Probe mit Luft in einem Muffelofen unter vorgegebenen Bedingungen übrig bleibt. [15, S. 1]

Im Gegensatz zum Glühverlust, gibt der Aschegehalt den inerten mineralischen Rückstand (mit Ausnahme der verdampften Anteile) an, die Bestimmung wird bei höherer Temperatur durchgeführt. Der Glühverlust erfasst dagegen hauptsächlich den organischen Anteil, der während dem Verfahren verglüht. [16, S. 120]

Zunächst wurde ungefähr 1 g der Probe in einen Tiegel aus z.B. Porzellan eingewogen. Die Tiegel wurden im kalten Muffelofen (Nabertherm L 9 Programm Controller S27) platziert und das Temperaturprogramm gestartet. Wichtig war das Einhalten einer konstante Heizrate während dem Erhitzen, bis letztlich eine Endtemperatur von 815 °C (± 15 °C) erreicht wurde (konstant halten für mindestens 60 min). Nach dem Vorgang wurden die Tiegel in einem Exsikkator abgekühlt und nach Temperatúrausgleich zurückgewogen, wobei eine zu lange Abkühlung vermieden werden sollte, da andernfalls aufgenommene Feuchte und Kohlendioxid das Ergebnis verfälschen können. Die Veraschung ist vollständig abgelaufen, wenn keine unverbrannten Teile mehr in der Probe vorhanden sind, gegebenenfalls muss eine Wiederholung des Vorgangs für weitere 30 min bei 815 °C durchgeführt werden. [15, S. 1,2]

Glühverlust

Der Glühverlust (angegeben in Prozent des Gewichts der Trockenmasse) wird oft als Schätzwert bezüglich der nicht flüchtigen organischen Bestandteile in Abfall herangezogen. Eingeschlossen sind hierbei der Gehalt an elementarem Kohlenstoff, die Verdampfung von organischen Stoffen und die chemischen Reaktionen anorganischer Verbindungen.

Die Bestimmung des Glühverlusts erfolgte durch Erhitzen der Probe in einem Ofen (Nabertherm L 9 Programm Controller S27) bei 550 °C (± 25 °C). Üblicherweise wird dafür eine zuvor getrocknete Probe verwendet, es gibt aber auch die Möglichkeit, das Verfahren mit der ungetrockneten Probe (inklusive einer Trocknungsstufe oder mit Bezug auf die Trockenmasse) durchzuführen.

Zu Beginn wurde ca. 1 g der Probe eingewogen, in den kalten Muffelofen gestellt und mindestens eine Stunde auf die vorgegebene Temperatur erhitzt. Nach dem Herausnehmen aus dem Ofen wurde der heiße Tiegel ein paar Minuten abgekühlt und dann in einem Exsikkator auf Umgebungstemperatur gebracht, wonach das Abwiegen stattfand. Das Glühen wird als vollständig angesehen, wenn Massenkonstanz erreicht ist. Ist diese auch nach dem dritten Mal Glühen nicht gegeben, wird der Wert der letzten Messung aufgezeichnet. [17, S. 4 7]

Gesamter Kohlenstoff (TC)

Unter dem gesamten Kohlenstoff (TC – total carbon) versteht man die Menge an organisch und anorganisch gebundenen Kohlenstoff sowie an elementarem Kohlenstoff in einer Probe.

Im Gegensatz dazu beinhaltet der gesamte organische Kohlenstoff (TOC – total organic carbon) die Menge an Kohlenstoff, der bei der Verbrennung zu Kohlenstoffdioxid umgesetzt wird, jedoch bei der Behandlung mit Säure nicht als Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird. Jener Anteil, der mit Säure als Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird, wird als gesamter anorganischer Kohlenstoff (TIC – total inorganic carbon) bezeichnet.

Der gesamte Kohlenstoff wurde durch Verbrennung in einem Verbrennungsofen (TOC-Feststoffanalysator Stöhlein, Typ: C-mat 5500) bestimmt. Es wurden ungefähr 5 mg Probe eingewogen und mit einem sauerstoffhaltigen Gasstrom (frei von Kohlenstoffdioxid) in CO₂ umgewandelt. Auf eine ausreichend hohe Verbrennungstemperatur muss dabei geachtet werden, damit der Kohlenstoff vollständig verbrannt wird. Die freigesetzte Menge an Kohlenstoffdioxid wurde mittels Infrarot-Spektrometrie bestimmt. [18, S. 3-9]

Metallgehalt

Für die Ermittlung des Metallgehalts wurde ein Aufschluss mittels Königswasser durchgeführt. Anders als bei den vorhergehenden Bestimmungen, wird die Analyseprobe hier in flüssige Form gebracht um anschließend mittels Massenspektrometrie mit induktiv gekoppelten Plasma (ICP-MS) analysiert werden zu können.

Als Aufschlussmethode, die das vollständige Auflösen der mineralischen Anteile und die Mineralisierung der organischen Stoffe einer Probe zum Ziel hat, kam der offene Königswasseraufschluss zum Einsatz. Hierbei wurde ca. 0,8 g Probe in einen Rundstandkolben eingewogen. Vorsichtig wurde die entsprechende Menge an Königswasser, bestehend aus 3 Teilen Salzsäure und einem Teil Salpetersäure, hinzugegeben. Nach Abklingen der Reaktion der Probe mit Königswasser (Aufschäumen während des Vorganges möglich), wurde der Kolben auf der Heizplatte platziert und mit einem Rückflusskühler verbunden. Der genaue Aufbau ist in Abbildung 22 dargestellt. [19, S. 4-12)



Abbildung 22: thermischer Aufschluss im Rückflusssystem

Die Temperatur des Reaktionsgemisches wurde langsam auf die Rückflussbedingungen erhöht und für mindestens 2 Stunden gehalten. Nach Beendigung des Verfahrens wurde die abgekühlte Probe filtriert und auf 50 ml Aufschlussvolumen aufgefüllt, anschließend mittels ICP-MS analysiert. [19, S. 4-12)

Vorteile bei dem Einsatz der ICP-MS sind das vergleichsweise schnelle Analyseverfahren, die sehr niedrige Nachweisgrenze und die Möglichkeit, mehrere Elemente gleichzeitig zu bestimmen (Multielementbestimmung). [20, S. 208-211]

4 Ergebnisse / Diskussion

Für die Auswertung der Ergebnisse wurde für jeden gemessenen Parameter ein Diagramm erstellt, in denen die Messwerte relativiert auf den Mittelwert dargestellt wurden, um die jeweilige relative Standardabweichung einzelner Proben zu erkennen. Die Betrachtung der beiden Proben erfolgte hierfür getrennt. Zur besseren Unterscheidung wurden die Diagramme für die beiden Proben farblich verschieden gestaltet. Für die Probe 1 wurden die Diagramme in blau erstellt, für die Probe 2 in grün. Weiters wurden die fünf Teilproben mit jeweils unterschiedlichen Schattierungen versehen, um mögliche Zusammenhänge zwischen ihnen leichter erkennen zu können.

4.1 Probe 1 – Restmüll

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der einzelnen Parameter für eine allgemeine Übersicht nach der Größe ihrer Streuung geordnet.

Tabelle 6: Einteilung der Parameter nach dem Ausmaß ihrer relativen Streuung

Höhe der relativen Streuung – Probe 1		
Parameter	Relative Streuung [%]	Beurteilung
Heizwert, K	< 10	Eine geringere Streuung lässt vermuten, dass die beeinflussenden Stoffe homogen in der Probe verteilt sind
Chlor, Aschegehalt, TC, Glühverlust, Schwefel, Al, As, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Hg, Ti, V	10 – 20	
Sb, Ba, Co, P, Se, Tl	20 – 50	Mäßig homogene Verteilung
Pb, Cd, Cr, Cu, Zn	50 – 100	
Cu, Sn	> 100	Inhomogene Verteilung

Chlor- und Schwefelgehalt

Eine Quelle für Chlor im Abfall sind vor allem chlorhaltige Produkte wie PVC (Polyvinylchlorid) und andere chlorhaltige Kunststoffe. Eine untergeordnete Rolle beim Eintrag spielen Kochsalz, mit Chlorbleiche behandeltes Papier und Pappe (verwendet bis in die 90er Jahre) sowie chlorhaltige Pigmente und Farben. Da Chlor bei Müllverbrennungsanlagen maßgeblich für Hochtemperaturkorrosion im Kessel verantwortlich ist, ist ein niedriger Chloranteil erwünscht. Weiters muss auch die Rauchgasreinigung auf den maximalen Chlorgehalt abgestimmt werden. [21, S. 11-16]

Der Schwefelgehalt von Restmüll liegt ungefähr zwischen 0,1 und 0,5 % und ist in der Regel deutlich geringer als der Chlorgehalt. [22, S. 7] Auch bei dieser Probe ist das der Fall (vgl. Tabelle 7 und Tabelle 8 bzw. Abbildung 23 und Abbildung 24). Schwefeleintrag erfolgt meist durch die Fein- und Mittelfraktion, mineralische Bestandteile und biogene Abfälle im Restmüll. [22, S. 7]

Tabelle 7: Chlorgehalt Probe 1

Chlorgehalt							
Probennummer	Chlor [mg/kg]	Probennummer	Chlor [mg/kg]	Probennummer	Chlor [mg/kg]	Probennummer	Chlor [mg/kg]
1	8590	6	12620	11	7970	16	7360
2	8750	7	13340	12	10870	17	9490
3	8300	8	11700	13	14110	18	10810
4	8890	9	7970	14	10030	19	9950
5	11850	10	8160	15	10990	20	11500
Mittelwert = 10160 mg/kg Standardabweichung = 19,1 %							

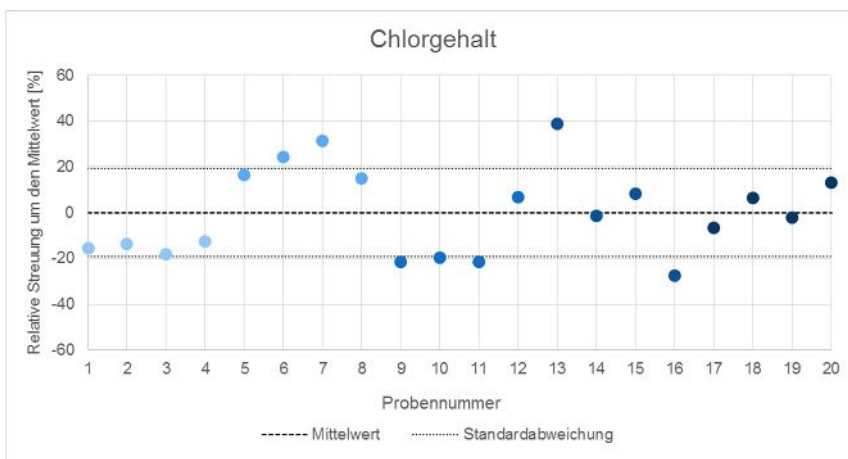


Abbildung 23: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Chlorgehalt – Probe 1

Tabelle 8: Schwefelgehalt Probe 1

Schwefelgehalt							
Probennummer	Schwefel [mg/kg]	Probennummer	Schwefel [mg/kg]	Probennummer	Schwefel [mg/kg]	Probennummer	Schwefel [mg/kg]
1	5070	6	5940	11	4120	16	4480
2	5170	7	4310	12	5310	17	5330
3	4690	8	5710	13	5410	18	5700
4	6030	9	5140	14	5180	19	5790
5	6450	10	4950	15	5050	20	5280
Mittelwert = 5260 mg/kg Standardabweichung = 11,1 %							

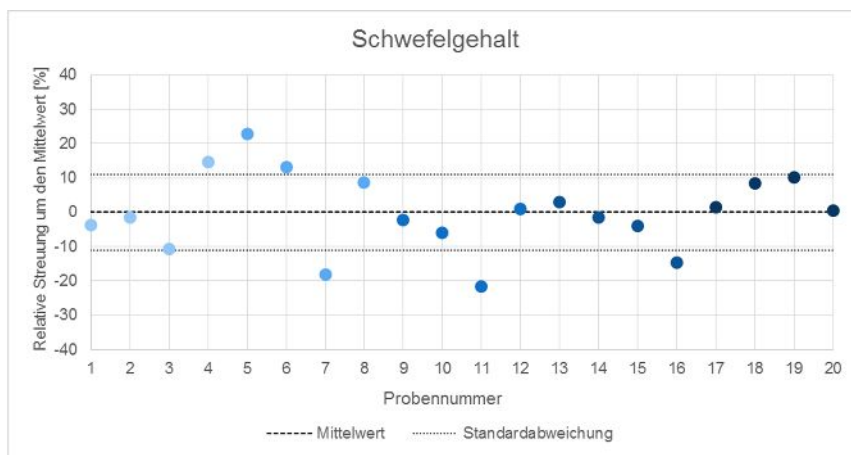


Abbildung 24: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Schwefelgehalt – Probe 1

Aschegehalt

Der Aschegehalt ist jener Anteil des Materials, der nach der Verbrennung übrig bleibt. Er besteht hauptsächlich aus anorganischem und unverbrennbarem Material. [23, S. 13]

Der höhere Aschegehalt des Restmülls (siehe Tabelle 9) im Vergleich zum EBS (mit durchschnittlich 9,68 %) lässt sich auf den höheren Anteil mineralischer Bestandteile zurückführen.

Tabelle 9: Aschegehalt Probe 1

Aschegehalt							
Probennummer	Aschegehalt [%]	Probennummer	Aschegehalt [%]	Probennummer	Aschegehalt [%]	Probennummer	Aschegehalt [%]
1	40,21	6	29,89	11	38,96	16	43,56
2	37,84	7	31,32	12	30,38	17	38,15
3	41,62	8	31,73	13	28,50	18	37,39
4	38,84	9	45,42	14	31,34	19	36,73
5	25,88	10	39,86	15	28,78	20	34,11
Mittelwert = 35,53 % Standardabweichung = 15,5 %							

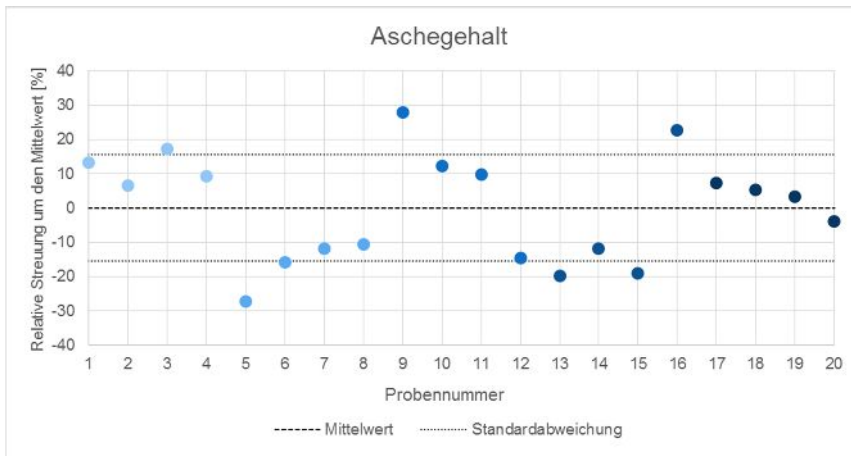


Abbildung 25: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Aschegehalt – Probe 1

In Abbildung 25 ist die Streuung der Ergebnisse für den Aschegehalt zu sehen. Die Standardabweichung liegt mit 15,5 % im unteren Bereich, doch ist eine deutliche Gruppierung der Messwerte erkennbar. Die Einflussfaktoren des Aschegehaltes sind demnach innerhalb der Teilproben eher inhomogen verteilt.

Brennwert-Heizwert

Üblicher Hausmüll, der in der Regel aus Papier, Pappe, Verpackungsmaterial, organischen Stoffen, Glas, Blech und Steinen besteht, besitzt einen Heizwert der in der Größenordnung von 3,3 bis 10,5 MJ/kg TS (entspricht 3300 bis 10500 J/g TS) liegt. Die große Spannweite ergibt sich aus der unterschiedlichen jahreszeitlich abhängigen Zusammensetzung des Mülls, so hat z.B. der Abfall im Sommer einen höheren Wassergehalt. [23, S. 18, 19]

Der deutlich höhere Heizwert / Brennwert des Restmülls (siehe Tabelle 10 und Tabelle 11 bzw. Abbildung 26) lässt sich durch die Aufbereitung erklären. Es wurden sowohl eine Anreicherung von Kunststoff, Textilien und Papier als auch eine Entfrachtung des biogenen Anteils durchgeführt.

Tabelle 10: Ergebnisse der Heizwertbestimmung Probe 1

Heizwert (Hu)							
Probennummer	Heizwert [J/g TS]	Probennummer	Heizwert [J/g TS]	Probennummer	Heizwert [J/g TS]	Probennummer	Heizwert [J/g TS]
1	12800	6	14500	11	12700	16	12100
2	13000	7	14400	12	16000	17	14100
3	11600	8	15400	13	15600	18	14400
4	13500	9	14200	14	15900	19	14500
5	15200	10	13500	15	15000	20	13800
Mittelwert = 14100 J/g TS Standardabweichung = 8,7 %							

Tabelle 11: Ergebnisse der Brennwertbestimmung Probe 1

Brennwert (Ho)							
Probennummer	Brennwert [J/g TS]	Probennummer	Brennwert [J/g TS]	Probennummer	Brennwert [J/g TS]	Probennummer	Brennwert [J/g TS]
1	13900	6	15700	11	13800	16	13100
2	14100	7	15700	12	17400	17	15300
3	12700	8	16700	13	17000	18	15600
4	14700	9	15400	14	17200	19	15800
5	16500	10	14700	15	16300	20	15000
Mittelwert = 15300 J/g TS Standardabweichung = 8,7 %							

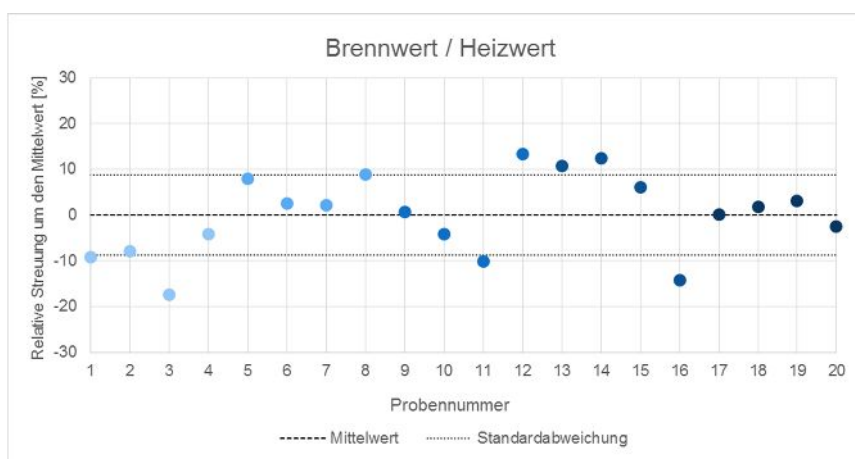


Abbildung 26: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Brennwert / Heizwert – Probe 1

Glühverlust

Der Glühverlust dient in erster Linie dazu, den Organikgehalt der Probe zu bestimmen. Ein erhöhter Glühverlust ist vor allem auf einen hohen Anteil an Kunststofffolien und beispielsweise behandeltes Holz zurückzuführen. [24, S. 8]

Der Glühverlust liegt unter jenen des EBS mit 88,5 % (siehe Tabelle 12 und Abbildung 27), was sich durch den höheren Anteil an mineralischen Bestandteilen und weniger Kunststoff erklären lässt.

Tabelle 12: Glühverlust Probe 1

Glühverlust							
Probennummer	Glühverlust [%]	Probennummer	Glühverlust [%]	Probennummer	Glühverlust [%]	Probennummer	Glühverlust [%]
1	59,3	6	65,5	11	50,7	16	48,0
2	60,0	7	61,9	12	74,0	17	61,7
3	56,6	8	66,0	13	69,1	18	64,5
4	59,5	9	50,9	14	70,2	19	66,6
5	69,2	10	53,4	15	66,9	20	65,3
Mittelwert = 62,0 % Standardabweichung = 11,5 %							

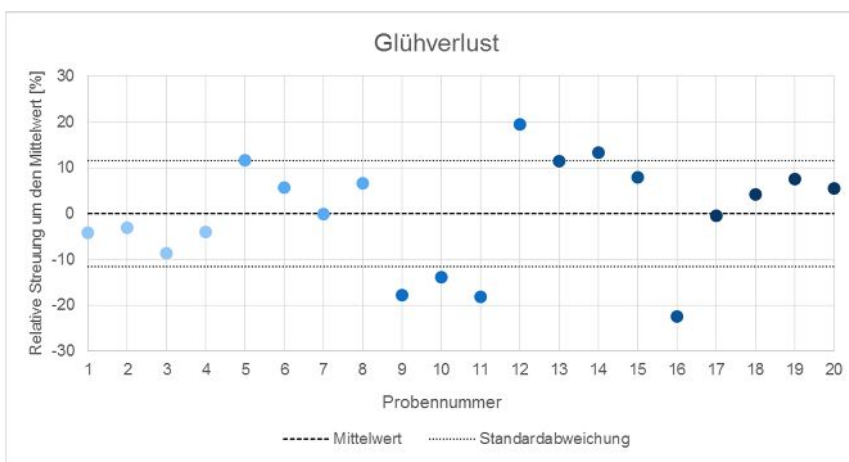


Abbildung 27: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Glühverlust – Probe 1

Gesamter Kohlenstoff (TC)

Der gesamte Kohlenstoff gilt als Summe an anorganischen und organischen Kohlenstoff. Da aufgrund des Ergebnisses des Glühverlusts von einem hohen Organikanteil ausgegangen werden kann, ist auch ein hoher TC-Wert plausibel (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: TC-Gehalt von Probe 1

Gesamter Kohlenstoff (TC)							
Probennummer	TC [%]	Probennummer	TC [%]	Probennummer	TC [%]	Probennummer	TC [%]
1	33,1	6	35,5	11	25,9	16	35,8
2	34,8	7	36,1	12	40,7	17	43,9
3	28,0	8	35,3	13	35,5	18	36,6
4	23,8	9	34,6	14	38,0	19	35,2
5	37,5	10	36,0	15	39,7	20	32,4
Mittelwert = 34,9 % Standardabweichung = 13,5 %							

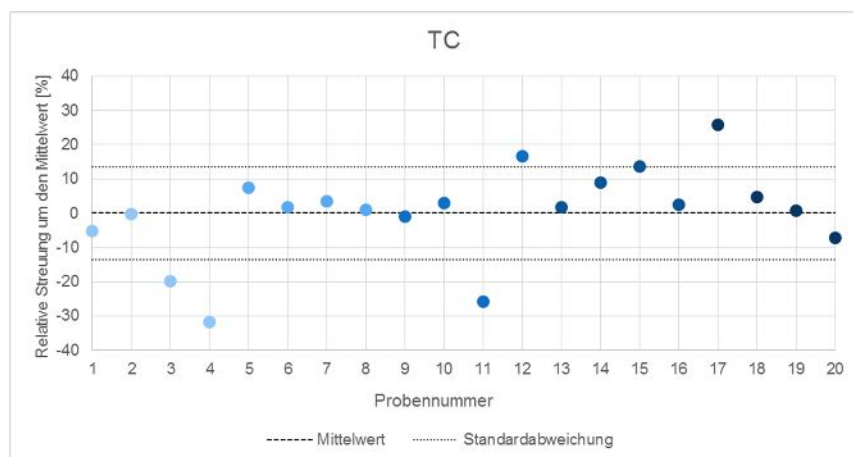


Abbildung 28: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den TC-Gehalt – Probe 1

In Abbildung 28 sind die Werte des TC aufgetragen. Zu beachten ist, dass bei der Bestimmung des gesamten Kohlenstoffs eine vergleichsweise geringe Menge an Probenmaterial eingewogen wird (ca. 5 mg), was grundsätzlich eine tendenziell größere Abweichung erwarten lässt. Die Standardabweichung liegt mit durchschnittlich 13,5 % im eher unteren Bereich der aufgetretenen Streuungen, jedoch heben sich einige Ergebnisse (z.B. jene mit der Probennummer 3, 4, 11 und 17) deutlich vom Mittelwert ab, wodurch die Erwartungen teilweise bestätigt werden.

Metallgehalt

Die Bewertung der Ergebnisse der Metallgehaltbestimmung gestaltete sich als relativ schwierig. Die meisten Metalle können durch unterschiedliche Quellen in den Abfall gelangen, und sind dann eher inhomogen verteilt. Der Schwermetallinput z.B. erfolgt durch Metalle, Elektronikschrott, Problemstoffe, mineralische Bestandteile, Papier/Pappe und Glas. Fraktionen wie Problemstoffe, Elektronikschrott und Metalle sind zwar gewichtsmäßig oft nur im geringen Anteil im Restmüll vorhanden, haben aber einen großen Einfluss auf den Schwermetallinput.

Aluminium, Eisen, Zink und Chrom werden hauptsächlich durch Metalle eingetragen, währenddessen erhöhter Blei- und Quecksilbergehalt durch Problemstoffe zustande kommt. Kupfer und Cadmium kommen häufig von Elektronikschrott und Arsen beispielsweise von Glas. [25; S. 4]

Aufgrund der großen Anzahl an Ergebnisse für die Metallgehaltbestimmung, werden die nachfolgenden Daten nach der Größe ihrer Standardabweichung geordnet. Auf allfällige Besonderheiten wird eigens eingegangen.

Die nachfolgenden Ergebnisse (Tabelle 14 bis Tabelle 25 bzw. Abbildung 29 bis Abbildung 40) liegen im Bereich einer Standardabweichung von 0-20 %, hier kann von einer homogenen Verteilung ausgegangen werden. Zu bemerken ist allerdings, dass Gruppierungen deutlich seltener vorkommen als bei den vorher bestimmten Parametern.

Tabelle 14: Arsengehalt Probe 1

Arsen							
Probennummer	As [mg/kg]	Probennummer	As [mg/kg]	Probennummer	As [mg/kg]	Probennummer	As [mg/kg]
1	9,8	6	11,8	11	13,8	16	13,1
2	11,8	7	11,0	12	10,0	17	9,9
3	13,0	8	12,1	13	8,8	18	14,2
4	12,0	9	13,1	14	7,9	19	12,8
5	11,5	10	11,6	15	8,5	20	11,5
Mittelwert = 11,4 mg/kg Standardabweichung = 15,6 %							

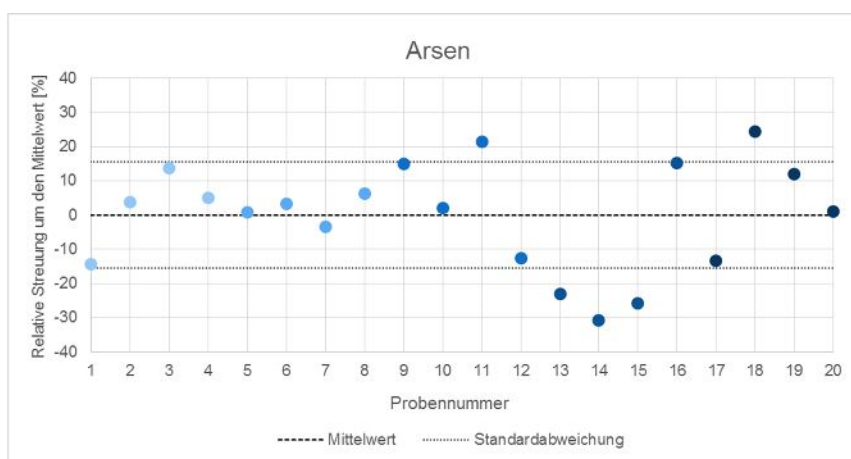


Abbildung 29: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Arsengehalt – Probe 1

Tabelle 15: Kaliumgehalt Probe 1

Kalium							
Probennummer	K [mg/kg]	Probennummer	K [mg/kg]	Probennummer	K [mg/kg]	Probennummer	K [mg/kg]
1	3500	6	3360	11	2730	16	2850
2	3250	7	3430	12	3000	17	3140
3	3240	8	3610	13	3250	18	3210
4	3330	9	2810	14	3090	19	3140
5	3170	10	2710	15	3050	20	3020
Mittelwert = 3140 mg/kg Standardabweichung = 7,9 %							

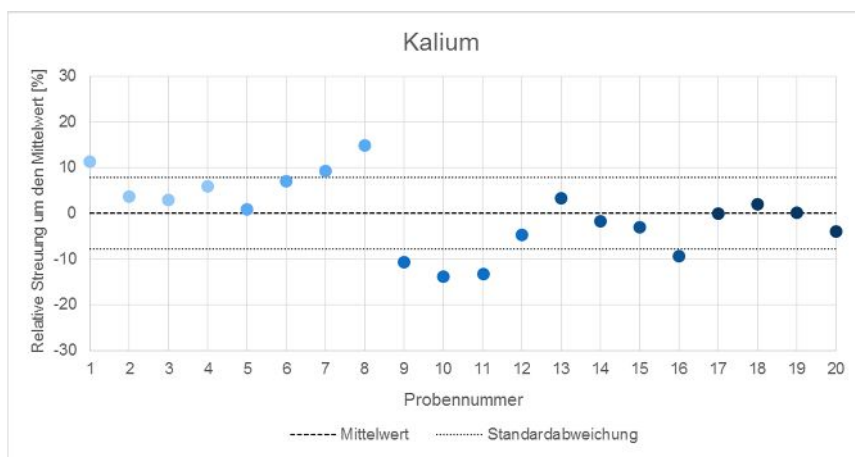


Abbildung 30: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Kaliumgehalt – Probe 1

Tabelle 16: Mangangehalt Probe 1

Mangan							
Probennummer	Mn [mg/kg]	Probennummer	Mn [mg/kg]	Probennummer	Mn [mg/kg]	Probennummer	Mn [mg/kg]
1	285	6	240	11	367	16	394
2	372	7	218	12	239	17	269
3	303	8	237	13	260	18	258
4	296	9	319	14	248	19	275
5	209	10	299	15	282	20	253
Mittelwert = 281 mg/kg Standardabweichung = 18,0 %							

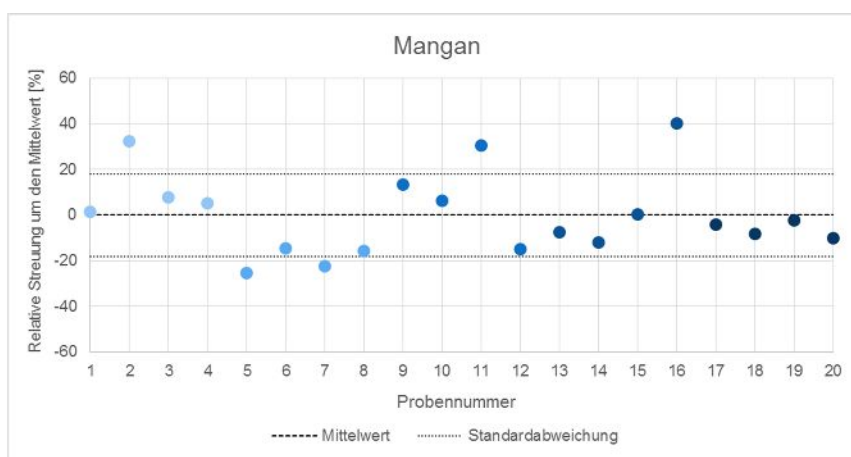


Abbildung 31: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Mangangehalt – Probe 1

Tabelle 17: Molybdängehalt Probe 1

Molybdän							
Probennummer	Mo [mg/kg]	Probennummer	Mo [mg/kg]	Probennummer	Mo [mg/kg]	Probennummer	Mo [mg/kg]
1	11,2	6	12,1	11	10,9	16	10,9
2	12,0	7	8,7	12	7,2	17	12,8
3	12,0	8	7,8	13	9,3	18	10,3
4	14,4	9	13,1	14	8,4	19	10,7
5	8,9	10	13,5	15	8,3	20	10,1
Mittelwert = 10,6 mg/kg Standardabweichung = 19,1 %							

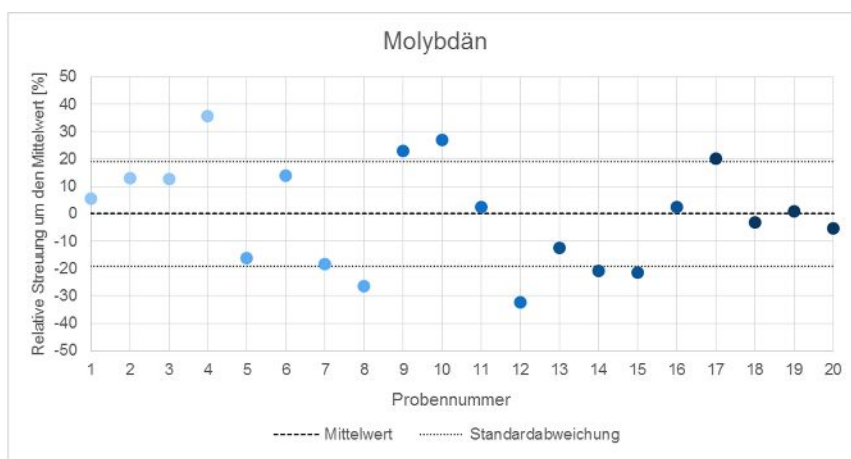


Abbildung 32: Diagramm Molybdän Probe 1

Tabelle 18: Natriumgehalt Probe 1

Natrium							
Probennummer	Na [mg/kg]	Probennummer	Na [mg/kg]	Probennummer	Na [mg/kg]	Probennummer	Na [mg/kg]
1	4330	6	4670	11	3310	16	3340
2	3910	7	5150	12	3280	17	3600
3	3940	8	5120	13	3660	18	3630
4	4020	9	3460	14	3390	19	3690
5	4780	10	3340	15	3480	20	3370
Mittelwert = 3870 mg/kg Standardabweichung = 15,8 %							

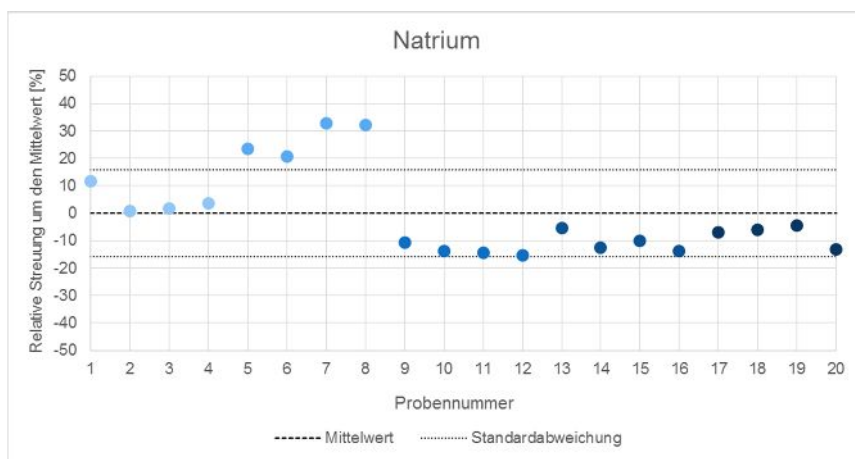


Abbildung 33: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Natriumgehalt – Probe 1

Tabelle 19: Quecksilbergehalt Probe 1

Quecksilber							
Probennummer	Hg [mg/kg]	Probennummer	Hg [mg/kg]	Probennummer	Hg [mg/kg]	Probennummer	Hg [mg/kg]
1	0,84	6	0,46	11	0,64	16	0,67
2	0,76	7	0,57	12	0,72	17	0,44
3	0,59	8	0,41	13	0,54	18	0,47
4	0,68	9	0,65	14	0,58	19	0,50
5	0,61	10	0,68	15	0,58	20	0,49
Mittelwert = 0,59 mg/kg Standardabweichung = 19,0 %							

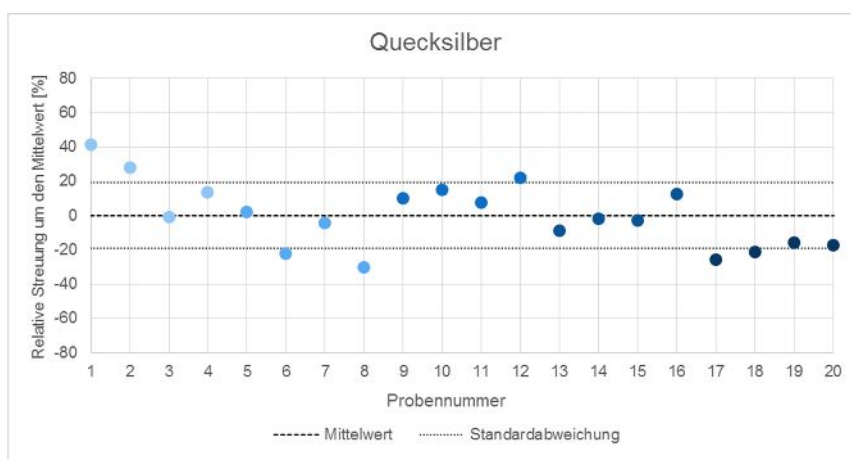


Abbildung 34: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Quecksilbergehalt – Probe 1

Tabelle 20: Titangehalt Probe 1

Titan							
Probennummer	Ti [mg/kg]	Probennummer	Ti [mg/kg]	Probennummer	Ti [mg/kg]	Probennummer	Ti [mg/kg]
1	290	6	240	11	283	16	262
2	289	7	236	12	217	17	264
3	323	8	254	13	251	18	309
4	329	9	287	14	224	19	285
5	228	10	262	15	266	20	268
Mittelwert = 268 mg/kg Standardabweichung = 11,7 %							

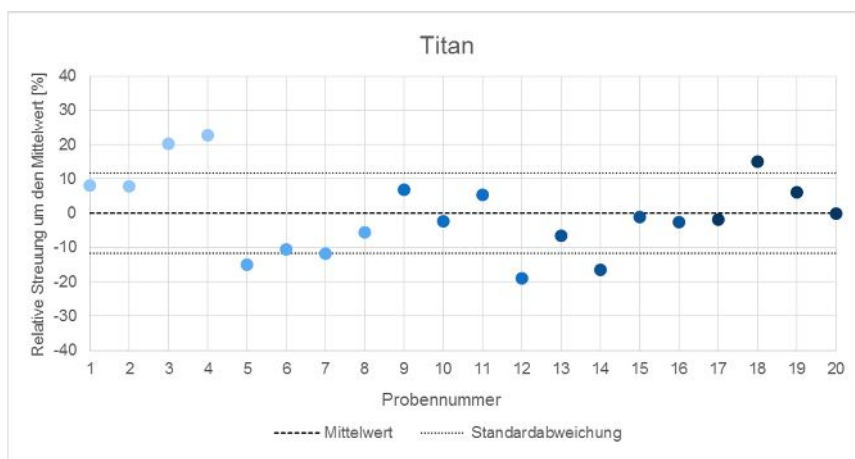


Abbildung 35: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Titangehalt – Probe 1

Tabelle 21: Vanadiumgehalt Probe 1

Vanadium							
Probennummer	V [mg/kg]	Probennummer	V [mg/kg]	Probennummer	V [mg/kg]	Probennummer	V [mg/kg]
1	12,6	6	11,3	11	14,9	16	13,7
2	13,1	7	11,1	12	8,9	17	11,9
3	15,7	8	13,1	13	8,8	18	13,9
4	14,6	9	13,4	14	7,9	19	13,9
5	10,4	10	12,3	15	9,7	20	12,3
Mittelwert = 12,2 mg/kg Standardabweichung = 17,8 %							

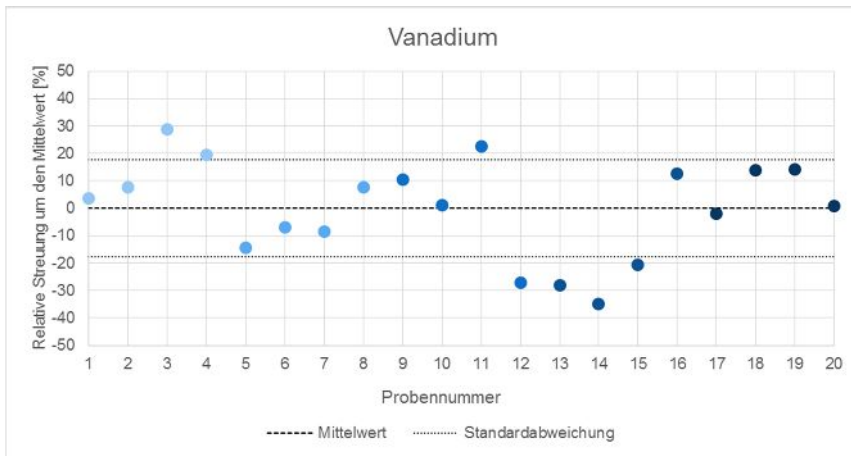


Abbildung 36: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Vanadiumgehalt – Probe 1

Tabelle 22: Aluminiumgehalt Probe 1

Aluminium							
Probennummer	Al [mg/kg]	Probennummer	Al [mg/kg]	Probennummer	Al [mg/kg]	Probennummer	Al [mg/kg]
1	8510	6	5850	11	8530	16	8320
2	9120	7	7010	12	5810	17	6510
3	9130	8	7230	13	5240	18	6130
4	9480	9	6970	14	5130	19	6940
5	6860	10	7530	15	6180	20	6630
Mittelwert = 7160 mg/kg Standardabweichung = 18,3 %							

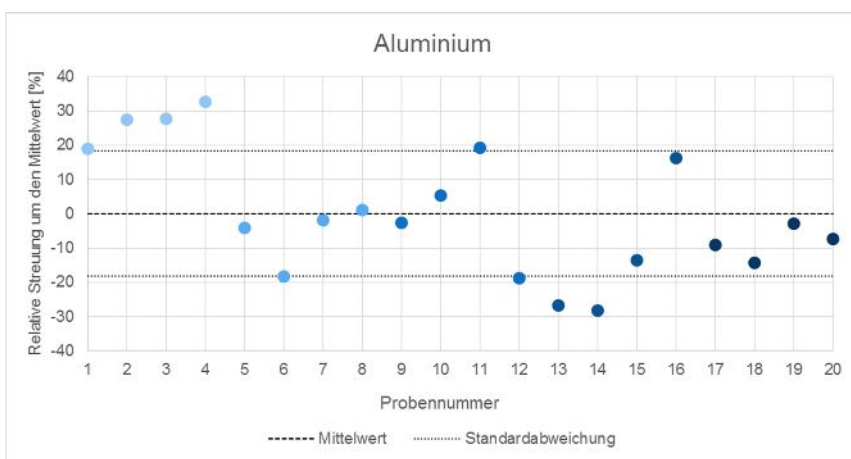


Abbildung 37: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Aluminiumgehalt – Probe 1

Tabelle 23: Calciumgehalt Probe 1

Calcium							
Probennummer	Ca [mg/kg]	Probennummer	Ca [mg/kg]	Probennummer	Ca [mg/kg]	Probennummer	Ca [mg/kg]
1	65300	6	51200	11	62800	16	65200
2	71500	7	51800	12	45800	17	56800
3	68400	8	53700	13	48100	18	59900
4	69800	9	65400	14	46800	19	58500
5	47000	10	60000	15	47300	20	54000
Mittelwert = 57500 mg/kg Standardabweichung = 14,6 %							

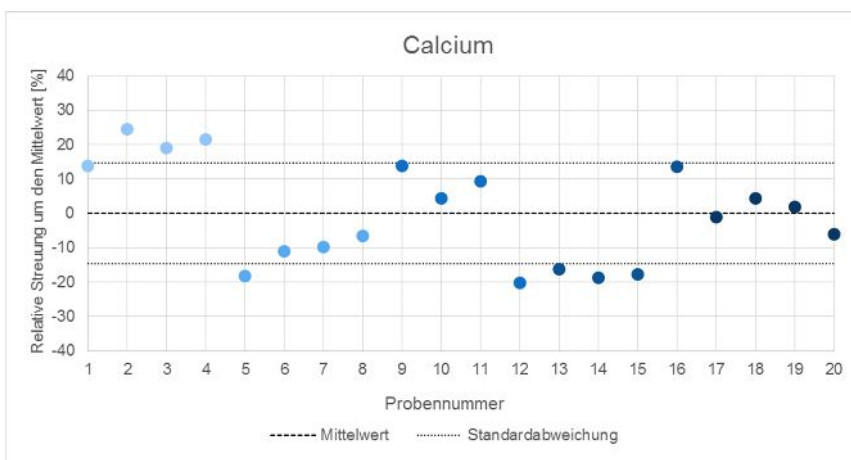


Abbildung 38: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Calciumgehalt – Probe 1

Tabelle 24: Eisengehalt Probe 1

Eisen							
Probennummer	Fe [mg/kg]	Probennummer	Fe [mg/kg]	Probennummer	Fe [mg/kg]	Probennummer	Fe [mg/kg]
1	10410	6	10730	11	11740	16	10120
2	12390	7	9210	12	9050	17	11370
3	10350	8	8940	13	7980	18	9800
4	11620	9	11180	14	7700	19	9440
5	7610	10	9350	15	7880	20	9870
Mittelwert = 9840 mg/kg Standardabweichung = 14,4 %							

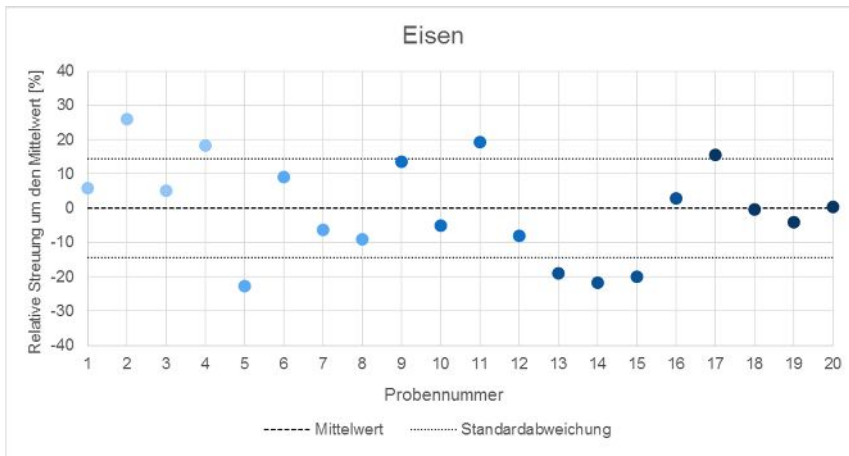


Abbildung 39: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Eisengehalt – Probe 1

Tabelle 25: Magnesiumgehalt Probe 1

Magnesium							
Probennummer	Mg [mg/kg]	Probennummer	Mg [mg/kg]	Probennummer	Mg [mg/kg]	Probennummer	Mg [mg/kg]
1	8770	6	6270	11	7430	16	7570
2	9130	7	5910	12	5210	17	6550
3	8650	8	6840	13	5520	18	7070
4	9110	9	8090	14	5360	19	6650
5	5670	10	7170	15	5630	20	6310
Mittelwert = 6950 mg/kg Standardabweichung = 18,3 %							

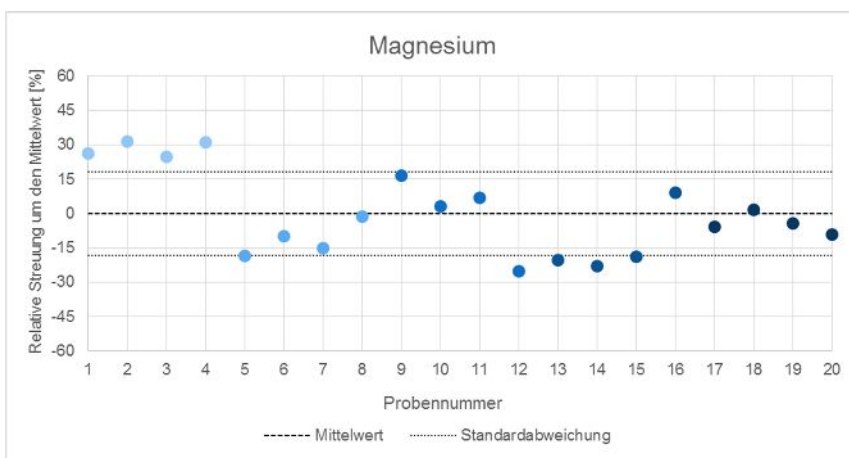


Abbildung 40: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Magnesiumgehalt – Probe 1

Die nachfolgenden Ergebnisse (Tabelle 26 bis Tabelle 37 und Abbildung 41 bis Abbildung 52) fallen in den Bereich mäßig homogen mit einer Standardabweichung zwischen 20-100%.

Tabelle 26: Antimongehalt Probe 1

Antimon							
Proben-nummer	Sb [mg/kg]	Proben-nummer	Sb [mg/kg]	Proben-nummer	Sb [mg/kg]	Proben-nummer	Sb [mg/kg]
1	90	6	140	11	150	16	160
2	80	7	170	12	160	17	130
3	110	8	130	13	230	18	150
4	80	9	160	14	260	19	250
5	160	10	170	15	200	20	210
Mittelwert = 160 mg/kg Standardabweichung = 31,5 %							

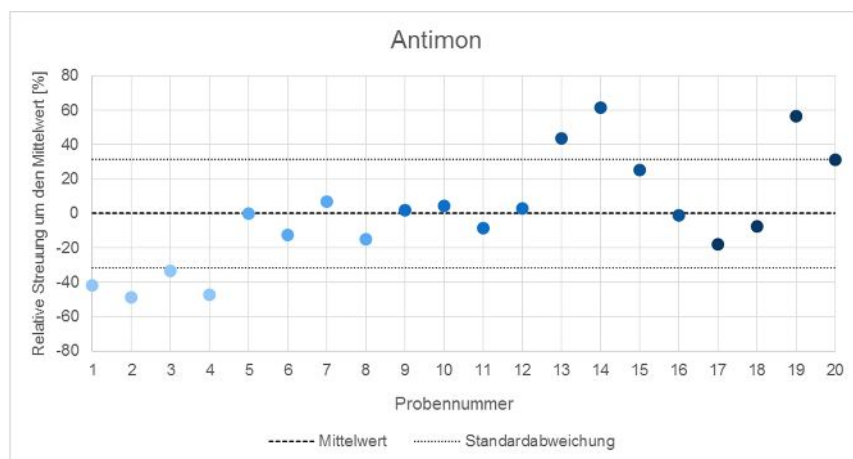


Abbildung 41: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Antimongehalt – Probe 1

Tabelle 27: Bariumgehalt Probe 1

Barium							
Proben-nummer	Ba [mg/kg]	Proben-nummer	Ba [mg/kg]	Proben-nummer	Ba [mg/kg]	Proben-nummer	Ba [mg/kg]
1	740	6	840	11	710	16	770
2	660	7	790	12	580	17	520
3	730	8	1000	13	400	18	490
4	740	9	770	14	510	19	540
5	630	10	630	15	480	20	470
Mittelwert = 650 mg/kg Standardabweichung = 23,2 %							

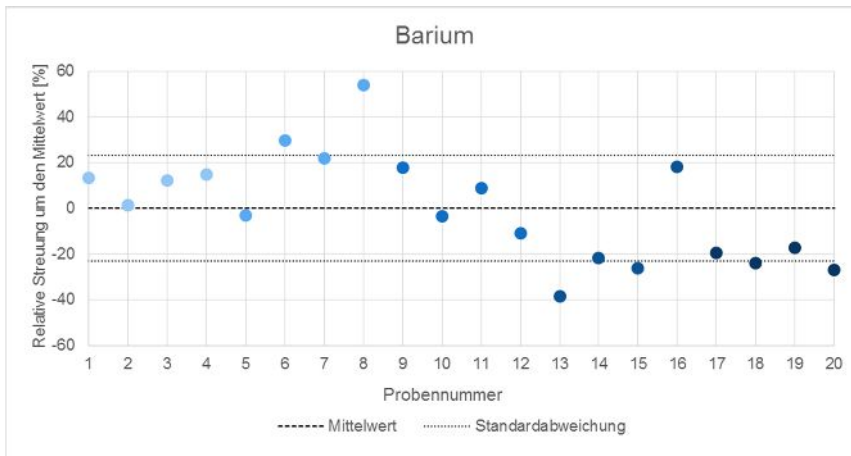


Abbildung 42: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Bariumgehalt – Probe 1

Tabelle 28: Bleigehalt Probe 1

Blei							
Probennummer	Pb [mg/kg]	Probennummer	Pb [mg/kg]	Probennummer	Pb [mg/kg]	Probennummer	Pb [mg/kg]
1	131	6	76	11	169	16	249
2	123	7	65	12	63	17	81
3	108	8	112	13	90	18	62
4	126	9	414	14	137	19	67
5	68	10	116	15	60	20	56
Mittelwert = 119 mg/kg Standardabweichung = 70,6 %							

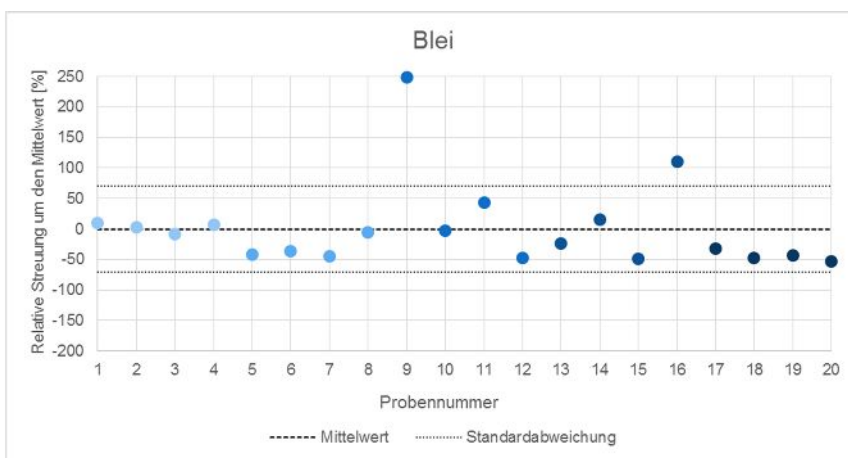


Abbildung 43: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Bleigehalt – Probe 1

Die Höhe des Parameters Cadmium wird häufig bei der Beurteilung der Qualität eines Materials verwendet, da er durch seine hohe Toxizität und Akkumulation großes Gefährdungspotential für Mensch und Umwelt hat. Der Eintrag erfolgt meist durch Lösungsmittel und Batterien. Der Cadmiumgehalt der Probe ist in Tabelle 29 und Abbildung 44 dargestellt.

Tabelle 29: Cadmiumgehalt Probe 1

Cadmium							
Probennummer	Cd [mg/kg]	Probennummer	Cd [mg/kg]	Probennummer	Cd [mg/kg]	Probennummer	Cd [mg/kg]
1	1,14	6	2,60	11	1,27	16	3,99
2	2,23	7	2,37	12	1,17	17	1,22
3	1,50	8	3,92	13	2,16	18	1,36
4	1,13	9	1,18	14	0,80	19	1,22
5	2,35	10	1,13	15	1,00	20	1,51
Mittelwert = 1,76 mg/kg Standardabweichung = 51,9 %							

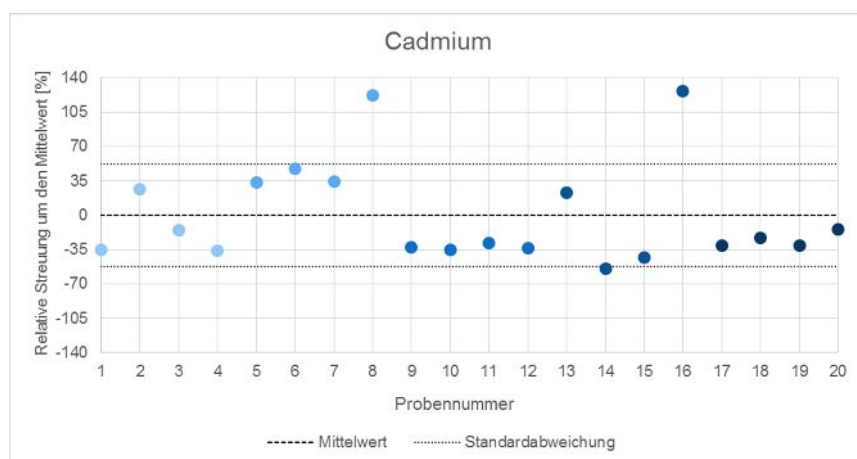


Abbildung 44: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Cadmiumgehalt – Probe 1

Tabelle 30: Chromgehalt Probe 1

Chrom							
Probennummer	Cr [mg/kg]	Probennummer	Cr [mg/kg]	Probennummer	Cr [mg/kg]	Probennummer	Cr [mg/kg]
1	56,8	6	289,1	11	161,1	16	97,7
2	78,0	7	17,6	12	4,1	17	207,2
3	153,1	8	15,7	13	27,5	18	62,7
4	177,9	9	36,0	14	22,4	19	44,8
5	17,6	10	196,7	15	59,9	20	46,2
Mittelwert = 88,6 mg/kg Standardabweichung = 90,9 %							

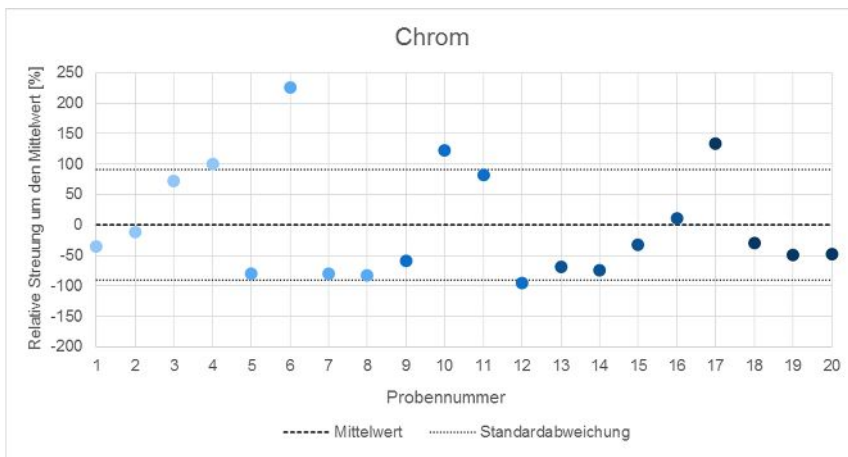


Abbildung 45: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Chromgehalt – Probe 1

Tabelle 31: Cobaltgehalt Probe 1

Cobalt							
Probennummer	Co [mg/kg]	Probennummer	Co [mg/kg]	Probennummer	Co [mg/kg]	Probennummer	Co [mg/kg]
1	11,1	6	10,8	11	12,3	16	12,4
2	25,2	7	8,8	12	6,4	17	8,2
3	14,9	8	10,4	13	6,8	18	7,9
4	12,4	9	14,7	14	7,0	19	8,1
5	7,5	10	11,8	15	7,9	20	7,9
Mittelwert = 10,6 mg/kg Standardabweichung = 40,4 %							

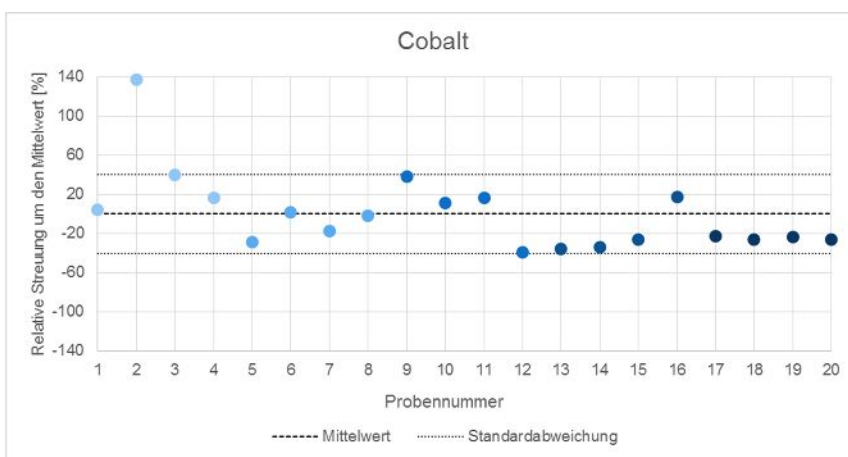


Abbildung 46: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Cobaltgehalt – Probe 1

Tabelle 32: Kupfergehalt Probe 1

Kupfer							
Probennummer	Cu [mg/kg]	Probennummer	Cu [mg/kg]	Probennummer	Cu [mg/kg]	Probennummer	Cu [mg/kg]
1	100	6	2120	11	2860	16	1110
2	160	7	450	12	600	17	480
3	110	8	2110	13	160	18	2050
4	150	9	1360	14	150	19	250
5	1940	10	1430	15	170	20	390
Mittelwert = 910 mg/kg Standardabweichung = 97,7 %							

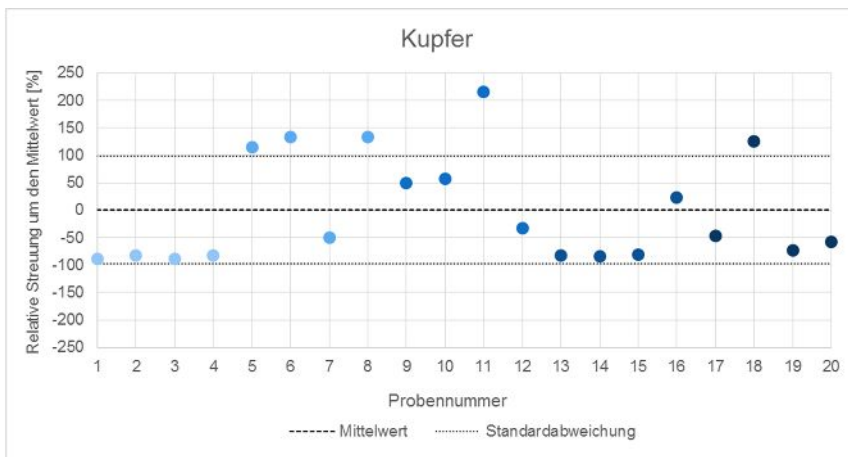


Abbildung 47: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Kupfergehalt – Probe 1

Tabelle 33: Nickelgehalt Probe 1

Nickel							
Probennummer	Ni [mg/kg]	Probennummer	Ni [mg/kg]	Probennummer	Ni [mg/kg]	Probennummer	Ni [mg/kg]
1	58,0	6	145,1	11	52,8	16	44,0
2	116,0	7	33,1	12	19,3	17	186,2
3	108,3	8	35,6	13	38,0	18	90,7
4	106,6	9	43,5	14	32,7	19	88,8
5	30,1	10	154,6	15	63,2	20	68,9
Mittelwert = 75,8 mg/kg Standardabweichung = 62,3 %							

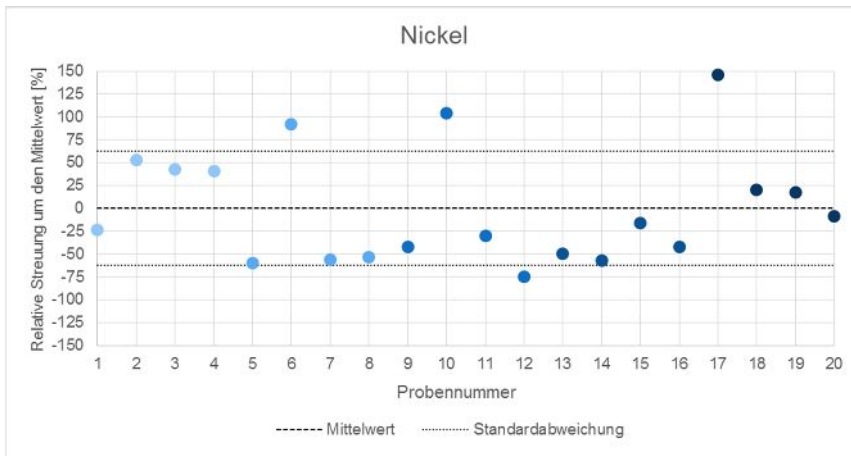


Abbildung 48: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Nickelgehalt – Probe 1

Tabelle 34: Phosphorgehalt Probe 1

Phosphor							
Probennummer	P [mg/kg]	Probennummer	P [mg/kg]	Probennummer	P [mg/kg]	Probennummer	P [mg/kg]
1	2250	6	1340	11	1190	16	1070
2	2750	7	1760	12	1310	17	1520
3	2620	8	1370	13	1260	18	1700
4	2310	9	1120	14	1290	19	1420
5	1260	10	1060	15	1330	20	1400
Mittelwert = 1570 mg/kg Standardabweichung = 32,7 %							

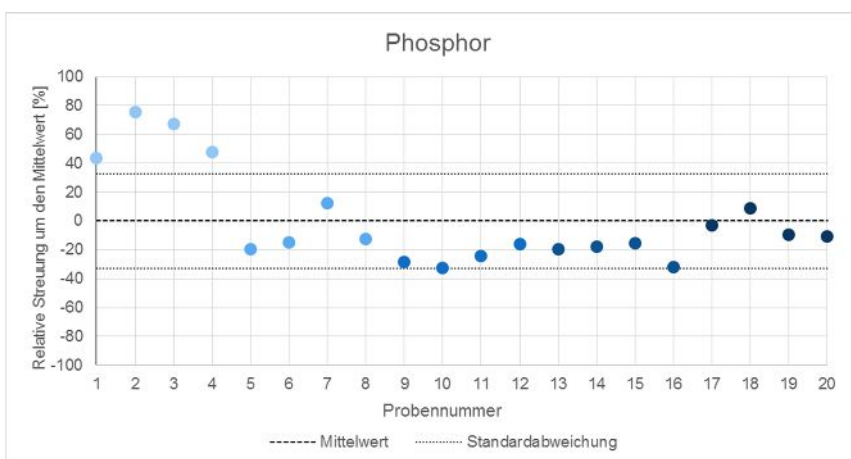


Abbildung 49: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Phosphorgehalt – Probe 1

Tabelle 35: Selengehalt Probe 1

Selen							
Probennummer	Se [mg/kg]	Probennummer	Se [mg/kg]	Probennummer	Se [mg/kg]	Probennummer	Se [mg/kg]
1	0,71	6	0,65	11	0,84	16	1,42
2	0,86	7	0,64	12	0,58	17	0,81
3	0,77	8	0,88	13	0,67	18	0,95
4	0,77	9	0,85	14	0,67	19	0,79
5	0,59	10	0,78	15	0,69	20	0,83
Mittelwert = 0,79 mg/kg Standardabweichung = 22,9 %							

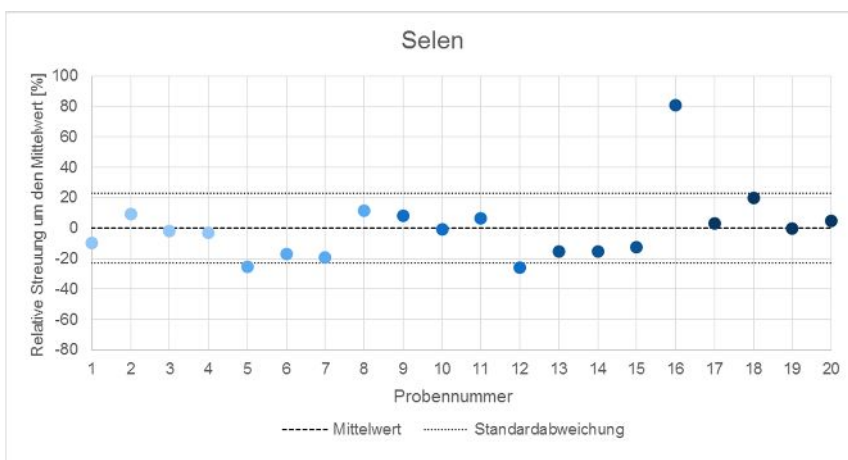


Abbildung 50: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Selengehalt – Probe 1

Tabelle 36: Thalliumgehalt Probe 1

Thallium							
Probennummer	Tl [mg/kg]	Probennummer	Tl [mg/kg]	Probennummer	Tl [mg/kg]	Probennummer	Tl [mg/kg]
1	0,05	6	0,05	11	0,05	16	0,05
2	0,05	7	0,05	12	0,04	17	0,06
3	0,06	8	0,10	13	0,05	18	0,06
4	0,06	9	0,06	14	0,05	19	0,10
5	0,06	10	0,05	15	0,04	20	0,05
Mittelwert = 0,06 mg/kg Standardabweichung = 27,5 %							

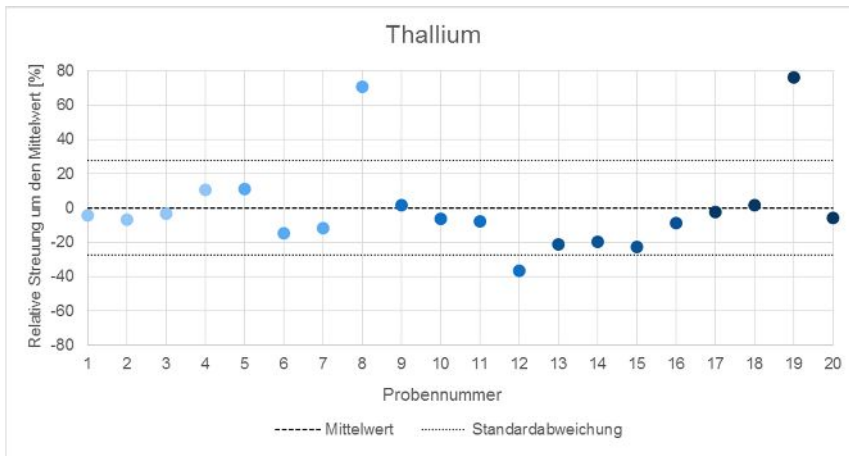


Abbildung 51: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Thalliumgehalt – Probe 1

Tabelle 37: Zinkgehalt Probe 1

Zink							
Probennummer	Zn [mg/kg]	Probennummer	Zn [mg/kg]	Probennummer	Zn [mg/kg]	Probennummer	Zn [mg/kg]
1	327	6	346	11	584	16	732
2	400	7	427	12	342	17	1668
3	294	8	413	13	344	18	1153
4	307	9	644	14	365	19	626
5	452	10	659	15	316	20	1458
Mittelwert = 593 mg/kg Standardabweichung = 66,1 %							

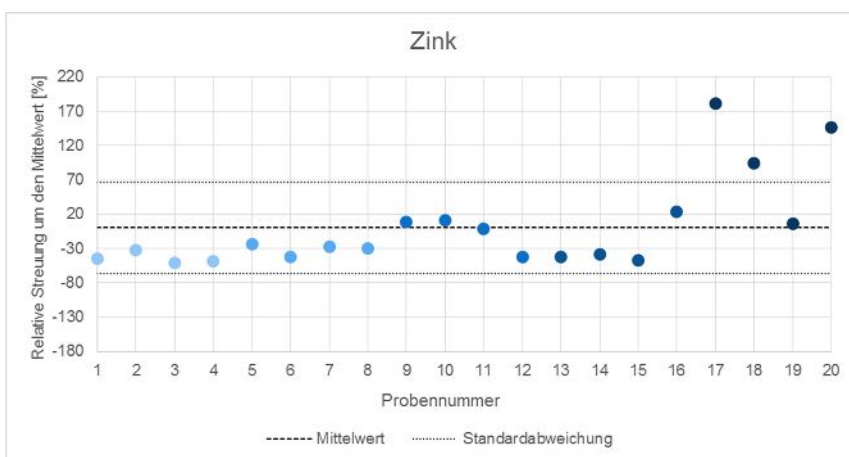


Abbildung 52: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Zinkgehalt – Probe 1

Die Ergebnisse von Zinn sind sehr inhomogen verteilt mit einer relativen Standardabweichung von über 100% (siehe Tabelle 38 und Abbildung 53). Auffällig sind die Proben mit der Nummer 9, 10, 16 und 19, deren Werte deutlich über dem Mittelwert liegen, und die die hohe Standardabweichung verursachen.

Tabelle 38: Zinngehalt Probe 1

Zinn							
Probennummer	Sn [mg/kg]	Probennummer	Sn [mg/kg]	Probennummer	Sn [mg/kg]	Probennummer	Sn [mg/kg]
1	79,4	6	53,4	11	114,0	16	352,1
2	46,0	7	56,6	12	34,7	17	36,8
3	58,7	8	76,2	13	41,4	18	30,3
4	46,4	9	488,0	14	59,6	19	153,9
5	50,4	10	258,7	15	32,1	20	37,8
Mittelwert = 105,3 mg/kg Standardabweichung = 116 %							

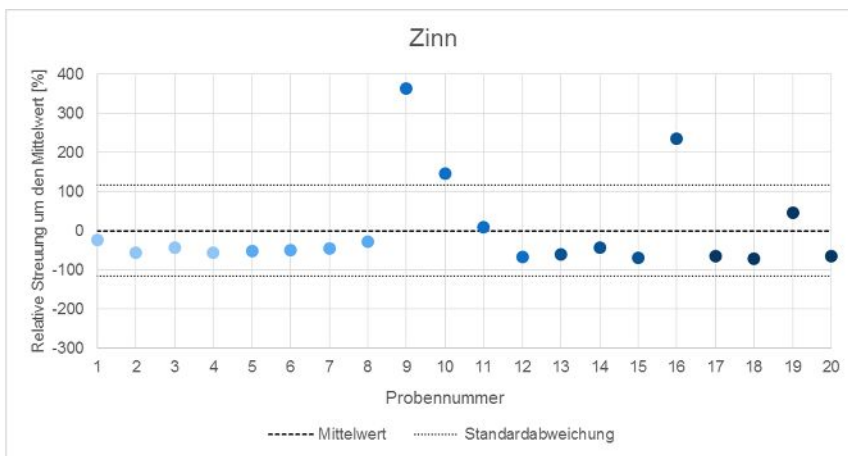


Abbildung 53: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Zinngehalt – Probe 1

Die Messwerte für Beryllium liegen unterhalb der Bestimmungsgrenze (vgl. Tabelle 39).

Tabelle 39: Ergebnis für Beryllium

Beryllium							
Probennummer	Be [mg/kg]	Probennummer	Be [mg/kg]	Probennummer	Be [mg/kg]	Probennummer	Be [mg/kg]
1	< 0,625	6	< 0,625	11	< 0,625	16	< 0,625
2	< 0,625	7	< 0,625	12	< 0,625	17	< 0,625
3	< 0,625	8	< 0,625	13	< 0,625	18	< 0,625
4	< 0,625	9	< 0,625	14	< 0,625	19	< 0,625
5	< 0,625	10	< 0,625	15	< 0,625	20	< 0,625

4.2 Probe 2 – Ersatzbrennstoff

Auch für den EBS wurden die Ergebnisse zur besseren Übersicht in Tabelle 40 nach dem Ausmaß ihrer Streuung geordnet.

Tabelle 40: Einteilung der Parameter nach der Höhe ihrer relativen Streuung

Höhe der relativen Streuung – Probe 2		
Parameter	Relative Streuung [%]	Beurteilung
Heizwert, Glühverlust, TC	< 10	Eine geringere Streuung lässt vermuten, dass die beeinflussenden Stoffe homogen in der Probe verteilt sind
Schwefel, Aschegehalt, Al, As, Ca, Mg, P, Se	10 – 20	
Ba, Cd, Cr, Co, Fe, Mn, Mo, Na, Ti, V, Zn	20 – 50	Mäßig homogene Verteilung
Chlor, Sb, Pb, Hg	50 – 100	
Sn	> 100	Inhomogene Verteilung

Chlor- und Schwefelgehalt

Ein Ersatzbrennstoff guter Qualität hat einen Chlorgehalt < 0,2 %. Chlorgehalt zwischen 0,2-0,8 % liegen im Normalbereich. [26, S. 13] Die Werte für Probe 2 sind in Tabelle 41 und Abbildung 54 dargestellt. Der durchschnittliche Gehalt liegt bei 0,65 %, auffällig sind die Proben 29-32 mit einem deutlich höheren Gehalt von ca. 1,4 %. Grund könnte ein höherer Anteil an chlorhaltigen Kunststoffen, Papier oder Pappe sein in der dritten Teilprobe sein.

Tabelle 41: Chlorgehalt Probe 2

Chlorgehalt							
Probennummer	Chlor [mg/kg]	Probennummer	Chlor [mg/kg]	Probennummer	Chlor [mg/kg]	Probennummer	Chlor [mg/kg]
21	4560	26	2640	31	14070	36	7740
22	5870	27	3850	32	13250	37	3150
23	5830	28	2680	33	6940	38	2580
24	6260	29	13320	34	7600	39	2930
25	2850	30	14620	35	7050	40	2490
Mittelwert = 6510 mg/kg Standardabweichung = 63,8 %							

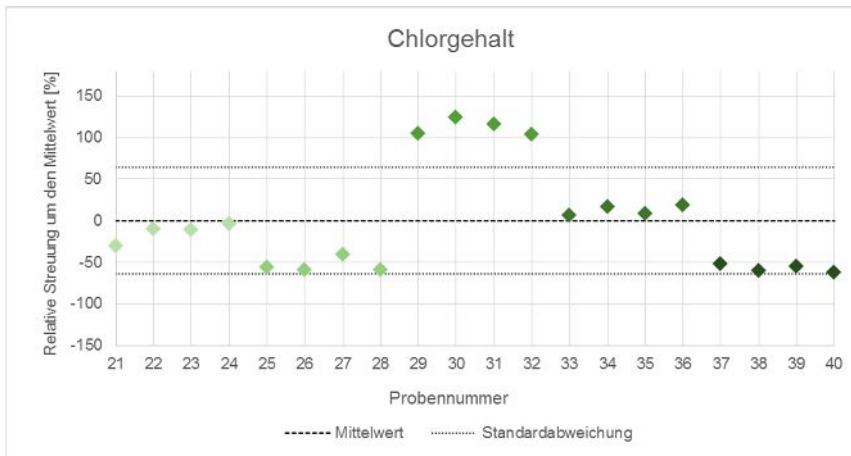


Abbildung 54: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Chlorgehalt – Probe 2

Besonders auffallend in Abbildung 54 ist die deutlich erkennbare Gruppierung der jeweils 4 Proben, die aus den 5 Teilproben gewonnen wurden. Wie oben bereits erwähnt, stammt der Chlorgehalt zum Großteil aus PVC. So ist der unterschiedliche Gehalt der Teilproben durch eine sehr inhomogene Verteilung von z.B. chlorhaltigen Kunststoffen erklärbar. In der aufbereiteten Probe selbst ist das Chlor dagegen gleichmäßig verteilt.

Der vergleichsweise zu Probe 1 geringere Schwefelanteil von Probe 2 kann durch die deutlich geringere Menge an mineralischen und biogenen Bestandteilen (vgl. Abbildung 55) erklärt werden. Die genauen Werte sind in Tabelle 42 und Abbildung 56 zu sehen.



Abbildung 55: Vergleich der Zusammensetzungen von Probe 1 (links) und Probe 2 (rechts)

Tabelle 42: Schwefelgehalt Probe 2

Schwefelgehalt							
Probennummer	Schwefel [mg/kg]	Probennummer	Schwefel [mg/kg]	Probennummer	Schwefel [mg/kg]	Probennummer	Schwefel [mg/kg]
21	1340	26	970	31	900	36	1110
22	1080	27	820	32	830	37	1100
23	1090	28	940	33	1170	38	1200
24	1080	29	950	34	1250	39	1030
25	960	30	940	35	1140	40	940
Mittelwert = 1040 mg/kg Standardabweichung = 13,3 %							

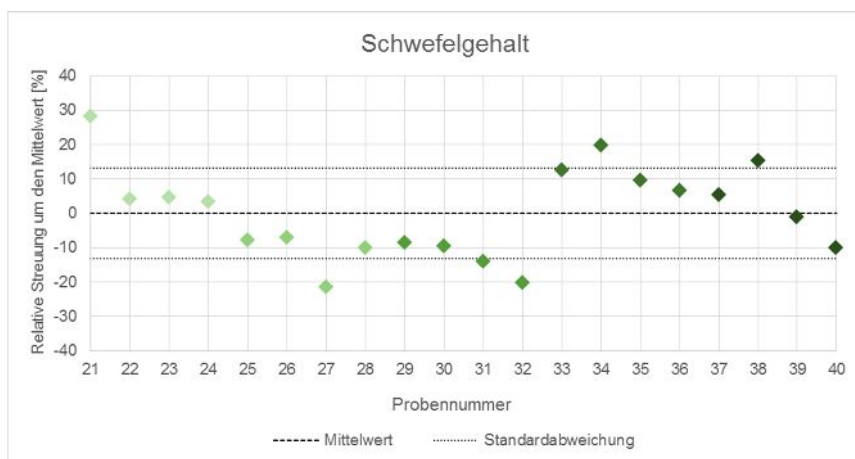


Abbildung 56: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Schwefelgehalt – Probe 2

Aschegehalt

Hinsichtlich eines Ersatzbrennstoffes ist ein niedriger Aschegehalt von Vorteil, denn ein höherer Aschegehalt bedeutet einen geringeren Heizwert. Weiters ist der Anteil, der als Feinstaubemissionen ausgetragen wird, höher und setzt ein effizientes Entstaubungssystem voraus. Ein Aschegehalt von durchschnittlich unter 10 % (vgl. Tabelle 43 und Abbildung 57) zeugt von der guten Qualität eines Ersatzbrennstoffes. [26, S. 13] Der etwas höhere Wert bei den Proben 33-36 deuten auf einen vermehrten Anteil an anorganischen Material hin, der sich auch leicht auf den Heizwert dieser Proben (siehe Abbildung 58) auswirkt.

Tabelle 43: Aschegehalt Probe 2

Aschegehalt							
Probennummer	Aschegehalt [%]	Probennummer	Aschegehalt [%]	Probennummer	Aschegehalt [%]	Probennummer	Aschegehalt [%]
21	9,67	26	10,51	31	8,30	36	11,81
22	8,89	27	9,36	32	8,13	37	9,00
23	8,75	28	9,63	33	11,11	38	8,60
24	9,42	29	7,91	34	14,59	39	8,96
25	9,57	30	8,27	35	12,62	40	8,40
Mittelwert = 9,68 % Standardabweichung = 17,8 %							

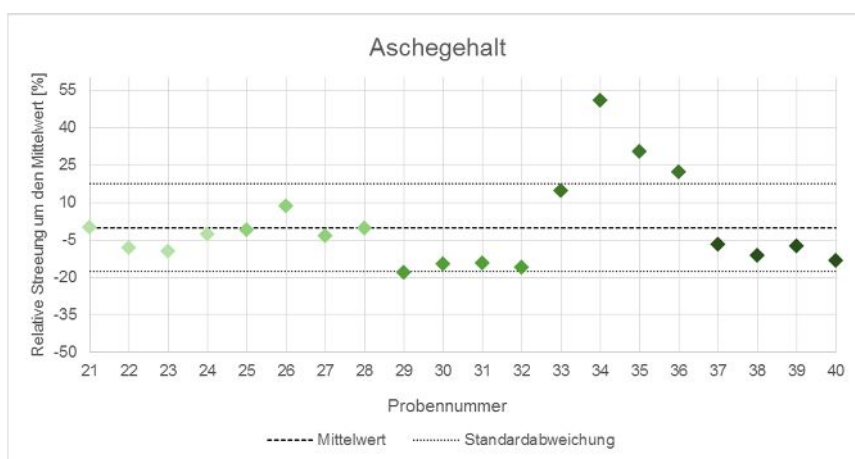


Abbildung 57: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Aschegehalt – Probe 2

Heizwert

Der Heizwert des Ersatzbrennstoffes bestimmt sein Einsatzgebiet. So werden EBS mit einem Heizwert zwischen 11-18 MJ/kg meist zur Mitverbrennung in Müllverbrennungsanlagen eingesetzt. Ein zu hoher Heizwert ist aufgrund der damit verbundenen geringeren Durchsatzmengen nicht erwünscht. EBS mit einem Heizwert über 22 MJ/kg werden beispielsweise in der Primarfeuerung von Zementwerken oder im Hochofen eingesetzt. [27, S. 8-14]. Der Heizwert des beprobten EBS liegt im hochkalorischen Bereich (siehe Tabelle 44 bzw. Tabelle 45).

Tabelle 44: Heizwert Probe 2

Heizwert (Hu)							
Probennummer	Heizwert [J/g TS]	Probennummer	Heizwert [J/g TS]	Probennummer	Heizwert [J/g TS]	Probennummer	Heizwert [J/g TS]
21	24200	26	23000	31	26000	36	22700
22	24400	27	24600	32	25800	37	23400
23	23700	28	23600	33	24000	38	24400
24	25000	29	25700	34	24000	39	24500
25	23600	30	26000	35	23600	40	23200
Mittelwert = 24300 J/g TS Standardabweichung = 4,2 %							

Tabelle 45: Brennwert Probe 2

Brennwert (Ho)							
Probennummer	Brennwert [J/g TS]	Probennummer	Brennwert [J/g TS]	Probennummer	Brennwert [J/g TS]	Probennummer	Brennwert [J/g TS]
21	26300	26	25000	31	28300	36	24700
22	26500	27	26700	32	28100	37	25400
23	25700	28	25600	33	26000	38	26500
24	27200	29	27900	34	26100	39	26600
25	25700	30	28300	35	25600	40	25200
Mittelwert = 26400 J/g TS Standardabweichung = 4,2 %							

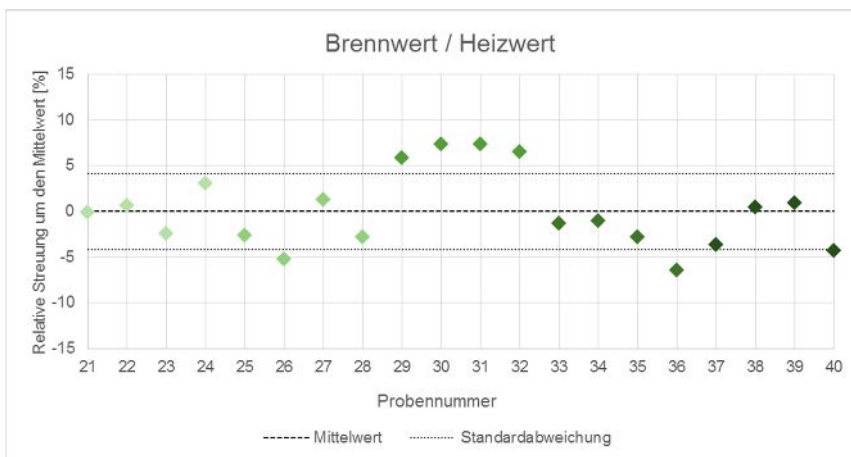


Abbildung 58: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Brenn- und Heizwert – Probe 2

In Abbildung 58 ist die niedrige Streuung gut erkennbar, sie ist mit einem Wert von 4,2 % sehr niedrig. Eine leichte Gruppierung der Werte ist zwar erkennbar, ist aber durch die niedrige Standardabweichung von weniger großem Ausmaß.

Glühverlust

Der Glühverlust des EBS ist deutlich höher als der des Restmülls mit durchschnittlich 62 % (vgl. Tabelle 46 und Abbildung 59). Besonders auffällig ist die sehr niedrige Standardabweichung mit 1,5 %, die auf eine sehr homogene Verteilung innerhalb der Proben hinweisen.

Tabelle 46: Glühverlust Probe 2

Glühverlust							
Probennummer	Glüh-verlust [%]	Probennummer	Glüh-verlust [%]	Probennummer	Glüh-verlust [%]	Probennummer	Glüh-verlust [%]
21	89,1	26	88,0	31	89,5	36	85,7
22	89,4	27	88,5	32	89,4	37	89,3
23	88,6	28	88,0	33	86,9	38	89,9
24	89,2	29	89,4	34	85,5	39	89,4
25	88,2	30	89,5	35	86,5	40	90,1
Mittelwert = 88,5 % Standardabweichung = 1,5 %							

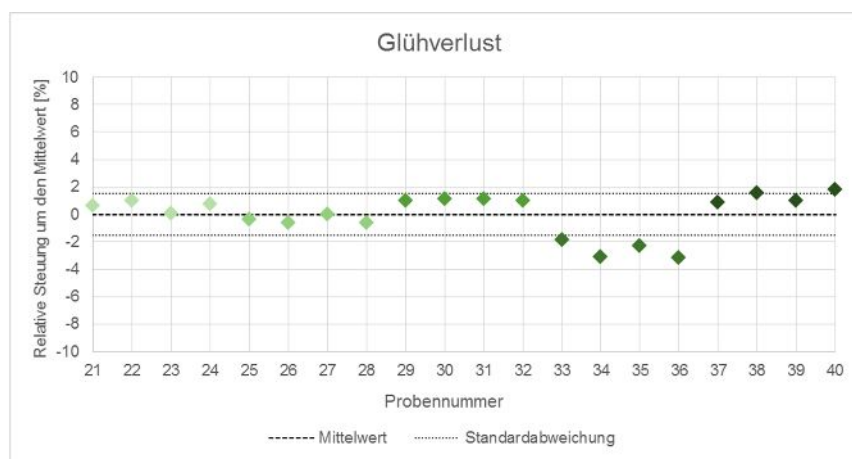


Abbildung 59: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Glühverlust – Probe 2

Gesamter Kohlenstoffgehalt

Der TC-Gehalt (dargestellt in Tabelle 47 und Abbildung 60) des EBS ist aufgrund des größeren Organikgehaltes erwartungsgemäß etwas höher als der des Restmülls (mit 34,9 %).

Tabelle 47: TC-Gehalt Probe 2

Gesamter Kohlenstoff (TC)							
Probennummer	TC [%]	Probennummer	TC [%]	Probennummer	TC [%]	Probennummer	TC [%]
21	59,7	26	55,9	31	60,0	36	57,4
22	55,7	27	56,4	32	55,5	37	53,5
23	57,8	28	53,0	33	49,0	38	54,1
24	57,9	29	54,5	34	53,7	39	51,6
25	57,1	30	52,5	35	51,7	40	54,6
Mittelwert = 55,1 % Standardabweichung = 5,1 %							

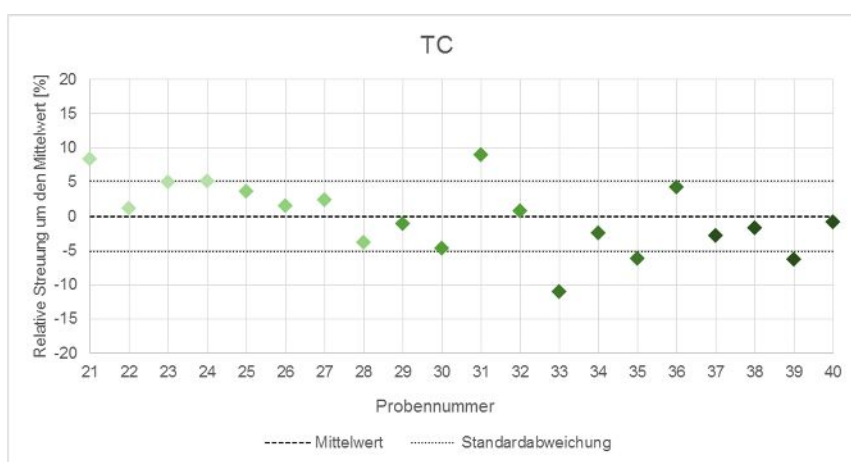


Abbildung 60: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den TC-Gehalt – Probe 2

Metallgehalt

Auch für den EBS werden die Metalle anhand ihrer relativen Standardabweichung unterteilt, beginnend mit den niedrigsten Werten zwischen 0-20 % für Tabelle 48 bis Tabelle 54 bzw. Abbildung 61 bis Abbildung 67.

Tabelle 48: Aluminiumgehalt Probe 2

Aluminium							
Probennummer	Al [mg/kg]	Probennummer	Al [mg/kg]	Probennummer	Al [mg/kg]	Probennummer	Al [mg/kg]
21	2230	26	3370	31	2520	36	4020
22	2320	27	3760	32	3000	37	3400
23	2890	28	2970	33	3840	38	3470
24	2390	29	2490	34	3770	39	3580
25	3630	30	2760	35	3700	40	2980
Mittelwert = 3160 mg/kg Standardabweichung = 18,1 %							

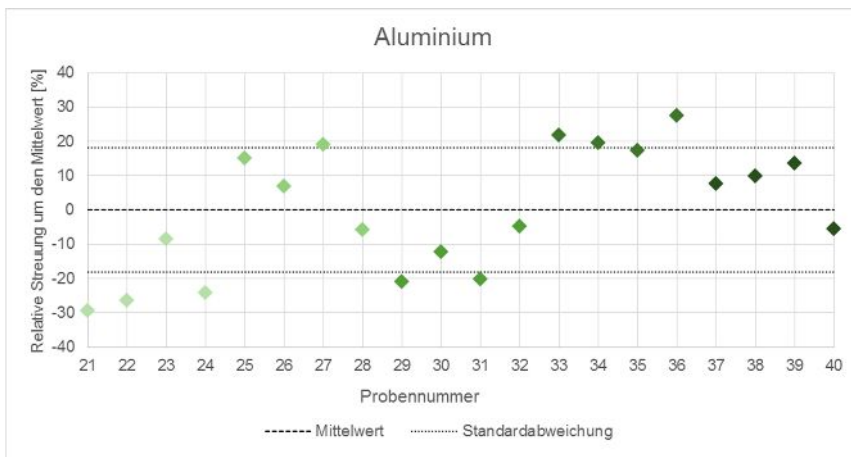


Abbildung 61: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Aluminiumgehalt – Probe 2

Tabelle 49: Arsengehalt Probe 2

Arsen							
Probennummer	As [mg/kg]	Probennummer	As [mg/kg]	Probennummer	As [mg/kg]	Probennummer	As [mg/kg]
21	5,22	26	6,73	31	5,04	36	4,24
22	4,25	27	3,81	32	5,45	37	4,92
23	4,55	28	4,27	33	6,03	38	4,74
24	4,65	29	4,07	34	6,03	39	7,62
25	5,89	30	5,70	35	4,28	40	4,97
Mittelwert = 5,12 mg/kg Standardabweichung = 19,0 %							

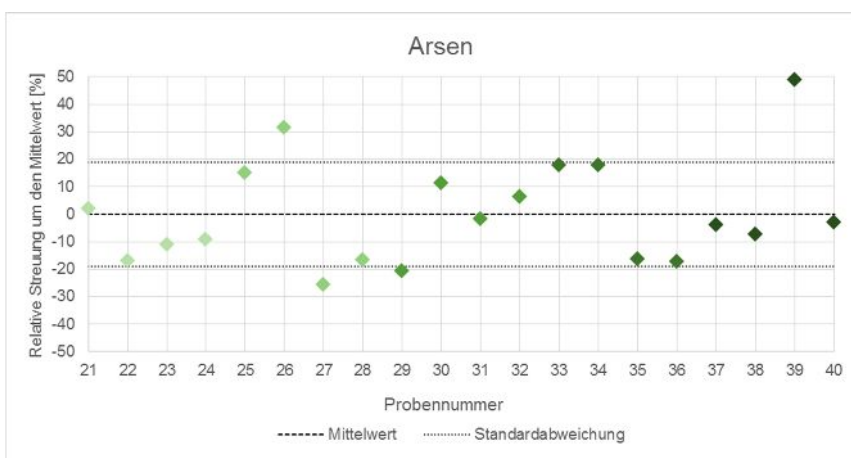


Abbildung 62: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Arsengehalt – Probe 2

Tabelle 50: Calciumgehalt Probe 2

Calcium							
Probennummer	Ca [mg/kg]	Probennummer	Ca [mg/kg]	Probennummer	Ca [mg/kg]	Probennummer	Ca [mg/kg]
21	25400	26	24500	31	29500	36	20500
22	23600	27	23600	32	30100	37	25200
23	25200	28	25800	33	21500	38	25600
24	22000	29	28700	34	21500	39	26500
25	26200	30	29000	35	21000	40	23300
Mittelwert = 24900 mg/kg Standardabweichung = 11,5 %							

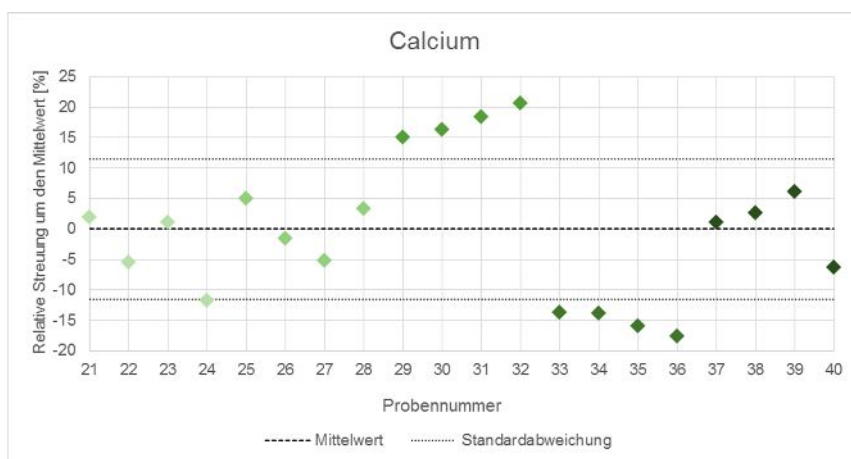


Abbildung 63: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Calciumgehalt – Probe 2

Tabelle 51: Kaliumgehalt Probe 2

Kalium							
Probennummer	K [mg/kg]	Probennummer	K [mg/kg]	Probennummer	K [mg/kg]	Probennummer	K [mg/kg]
21	970	26	1030	31	820	36	1280
22	950	27	910	32	880	37	990
23	1040	28	1060	33	1340	38	1030
24	920	29	800	34	1340	39	1030
25	1100	30	810	35	1250	40	940
Mittelwert = 1020 mg/kg Standardabweichung = 16,2 %							

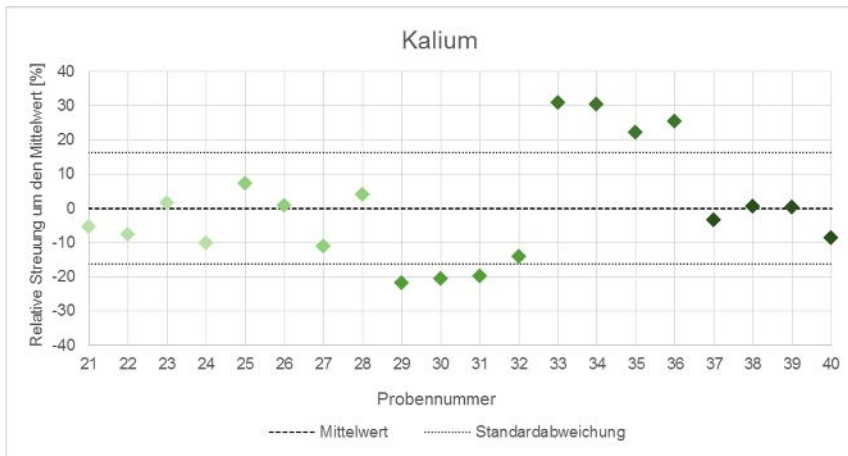


Abbildung 64: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Kaliumgehalt – Probe 2

Tabelle 52: Magnesiumgehalt Probe 2

Magnesium							
Probennummer	Mg [mg/kg]	Probennummer	Mg [mg/kg]	Probennummer	Mg [mg/kg]	Probennummer	Mg [mg/kg]
21	1140	26	1110	31	1080	36	1250
22	1180	27	960	32	1040	37	1080
23	1290	28	1040	33	1220	38	1100
24	1160	29	1070	34	1450	39	1120
25	1070	30	1010	35	1130	40	1030
Mittelwert = 1130 mg/kg Standardabweichung = 10,0 %							

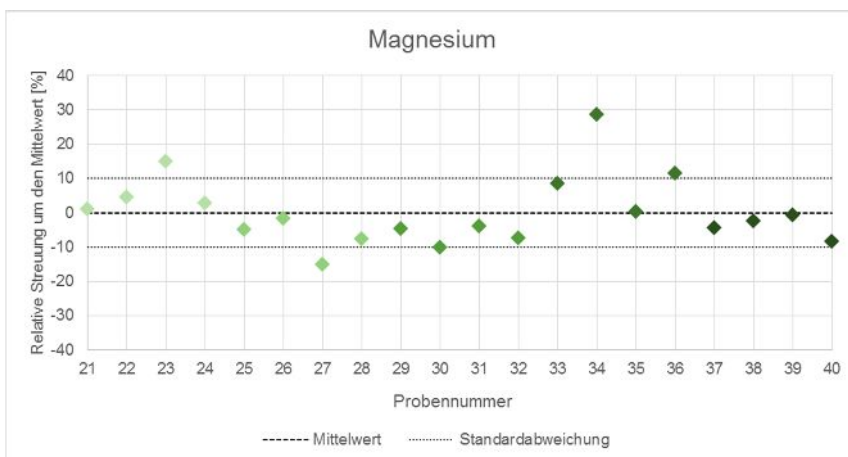


Abbildung 65: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Magnesiumgehalt – Probe 2

Tabelle 53: Phosphorgehalt Probe 2

Phosphor							
Probennummer	P [mg/kg]	Probennummer	P [mg/kg]	Probennummer	P [mg/kg]	Probennummer	P [mg/kg]
21	420	26	406	31	361	36	524
22	404	27	362	32	381	37	374
23	439	28	418	33	511	38	394
24	390	29	356	34	549	39	377
25	417	30	366	35	524	40	343
Mittelwert = 416 mg/kg Standardabweichung = 15,0 %							

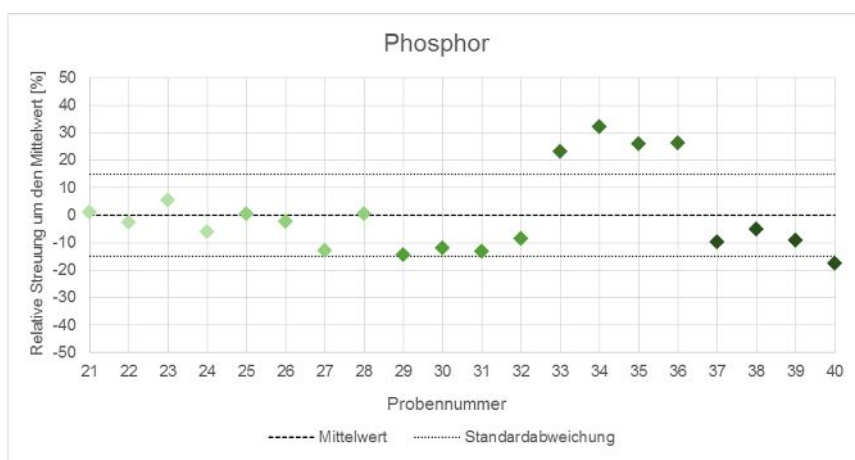


Abbildung 66: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Phosphorgehalt – Probe 2

Tabelle 54: Selengehalt Probe 2

Selen							
Probennummer	Se [mg/kg]	Probennummer	Se [mg/kg]	Probennummer	Se [mg/kg]	Probennummer	Se [mg/kg]
21	0,37	26	0,44	31	0,37	36	0,38
22	0,39	27	0,34	32	0,39	37	0,34
23	0,32	28	0,42	33	0,50	38	0,35
24	0,34	29	< 0,31	34	0,44	39	0,45
25	0,33	30	0,38	35	0,42	40	0,46
Mittelwert = 0,39 mg/kg Standardabweichung = 12,8 %							

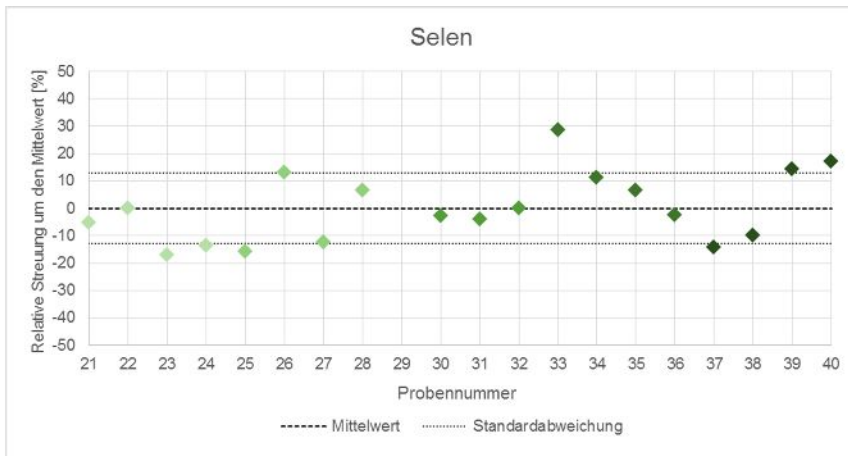


Abbildung 67: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Selengehalt – Probe 2

Es folgen die Ergebnisse für den Bereich mäßig homogen (Tabelle 55 bis Tabelle 66 bzw. Abbildung 68 bis Abbildung 79) mit einer Standardabweichung zwischen 20-100%.

Tabelle 55: Antimongehalt Probe 2

Antimon							
Probennummer	Sb [mg/kg]	Probennummer	Sb [mg/kg]	Probennummer	Sb [mg/kg]	Probennummer	Sb [mg/kg]
21	31,5	26	9,1	31	18,9	36	10,1
22	33,8	27	7,8	32	18,8	37	13,2
23	37,1	28	9,4	33	9,4	38	14,0
24	35,2	29	17,1	34	11,0	39	13,6
25	9,8	30	17,0	35	9,7	40	15,4
Mittelwert = 17,1 mg/kg Standardabweichung = 55,7 %							

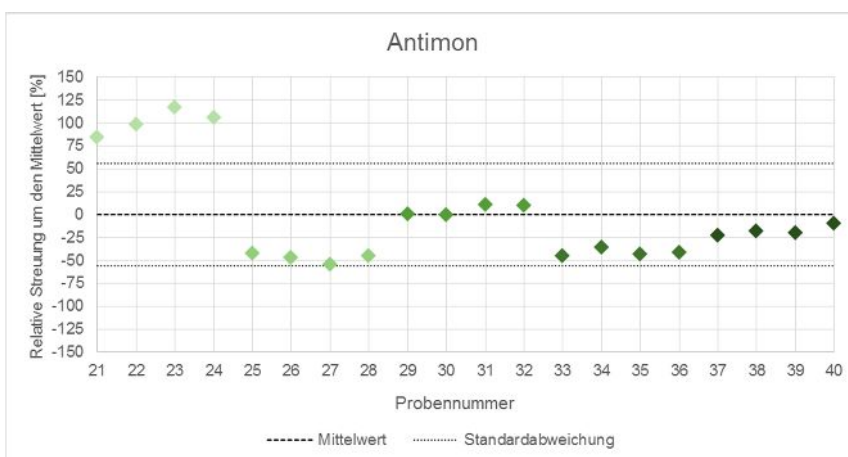


Abbildung 68: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Antimongehalt – Probe 2

Tabelle 56: Bariumgehalt Probe 2

Barium							
Probennummer	Ba [mg/kg]	Probennummer	Ba [mg/kg]	Probennummer	Ba [mg/kg]	Probennummer	Ba [mg/kg]
21	60,7	26	101,8	31	49,0	36	72,9
22	60,8	27	91,7	32	50,1	37	81,9
23	51,5	28	93,2	33	58,5	38	78,4
24	44,8	29	46,1	34	68,3	39	77,6
25	78,2	30	47,0	35	59,1	40	92,6
Mittelwert = 68,2 mg/kg Standardabweichung = 26,4 %							

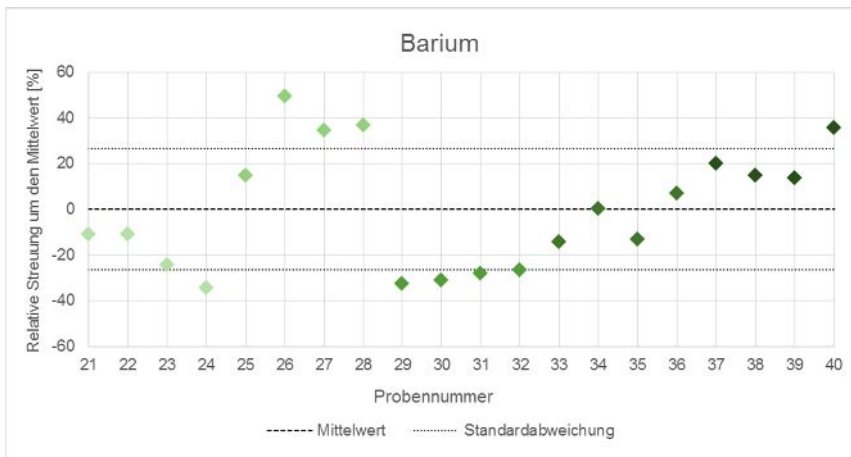


Abbildung 69: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Bariumgehalt – Probe 2

Tabelle 57: Chromgehalt Probe 2

Chrom							
Probennummer	Cr [mg/kg]	Probennummer	Cr [mg/kg]	Probennummer	Cr [mg/kg]	Probennummer	Cr [mg/kg]
21	409	26	210	31	392	36	250
22	335	27	143	32	476	37	328
23	521	28	98	33	297	38	325
24	368	29	299	34	208	39	276
25	158	30	294	35	253	40	238
Mittelwert = 294 mg/kg Standardabweichung = 36,5 %							

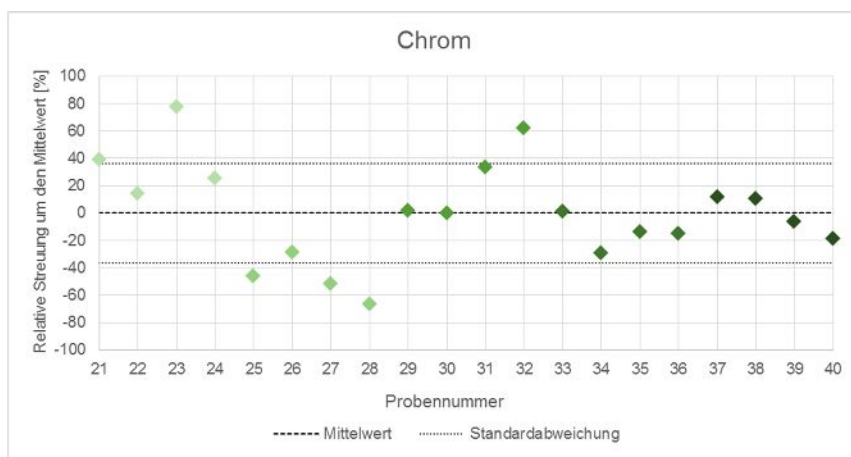


Abbildung 70: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Chromgehalt – Probe 2

Tabelle 58: Vanadiumgehalt Probe 2

Vanadium							
Probennummer	V [mg/kg]	Probennummer	V [mg/kg]	Probennummer	V [mg/kg]	Probennummer	V [mg/kg]
21	2,28	26	3,15	31	1,86	36	2,36
22	1,36	27	1,30	32	2,64	37	2,37
23	1,78	28	1,53	33	4,43	38	2,32
24	1,70	29	1,21	34	4,00	39	4,68
25	1,66	30	2,74	35	2,15	40	2,56
Mittelwert = 2,4 mg/kg Standardabweichung = 41,5 %							

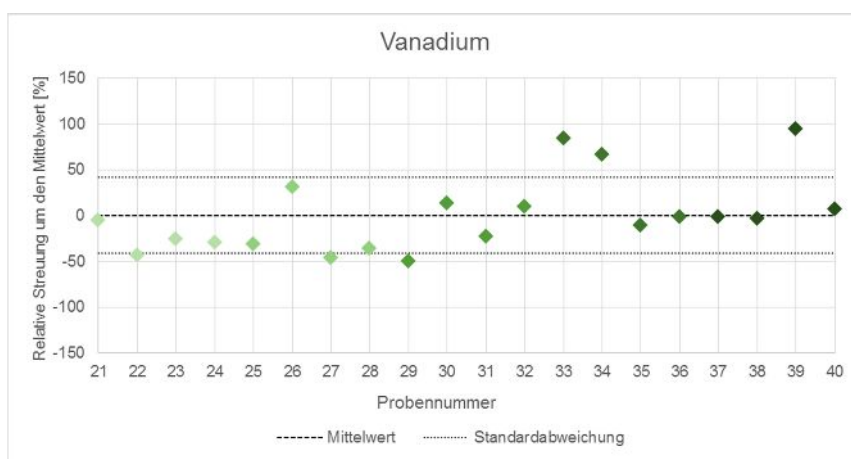


Abbildung 71: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Vanadiumgehalt – Probe 2

Tabelle 59: Titangehalt Probe 2

Titan							
Probennummer	Ti [mg/kg]	Probennummer	Ti [mg/kg]	Probennummer	Ti [mg/kg]	Probennummer	Ti [mg/kg]
21	38,8	26	35,8	31	30,7	36	48,7
22	32,5	27	28,6	32	31,3	37	39,6
23	36,1	28	29,3	33	56,1	38	36,7
24	33,7	29	30,2	34	62,0	39	41,1
25	34,7	30	30,0	35	50,1	40	36,6
Mittelwert = 38,1 mg/kg Standardabweichung = 24,3 %							

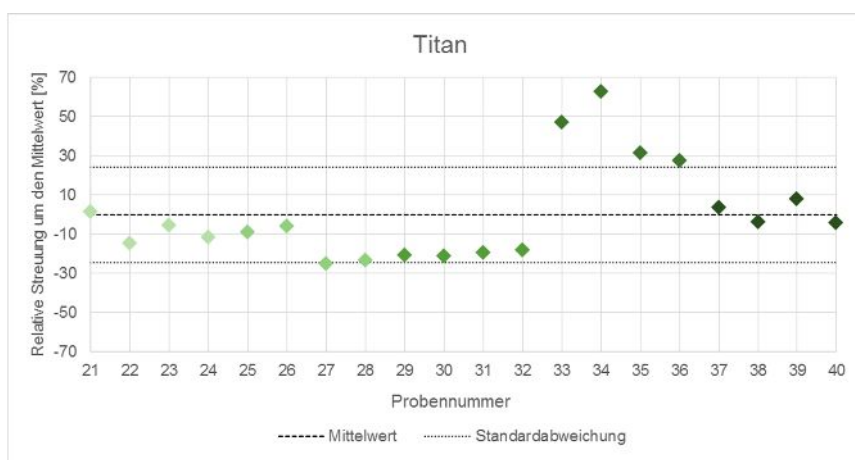


Abbildung 72: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Titangehalt – Probe 2

Tabelle 60: Cadmiumgehalt Probe 2

Cadmium							
Probennummer	Cd [mg/kg]	Probennummer	Cd [mg/kg]	Probennummer	Cd [mg/kg]	Probennummer	Cd [mg/kg]
21	0,25	26	0,23	31	0,19	36	0,50
22	0,23	27	0,17	32	0,29	37	0,20
23	0,28	28	0,20	33	0,59	38	0,20
24	0,32	29	0,19	34	0,44	39	0,22
25	0,24	30	0,21	35	0,52	40	0,19
Mittelwert = 0,28 mg/kg Standardabweichung = 44,7 %							

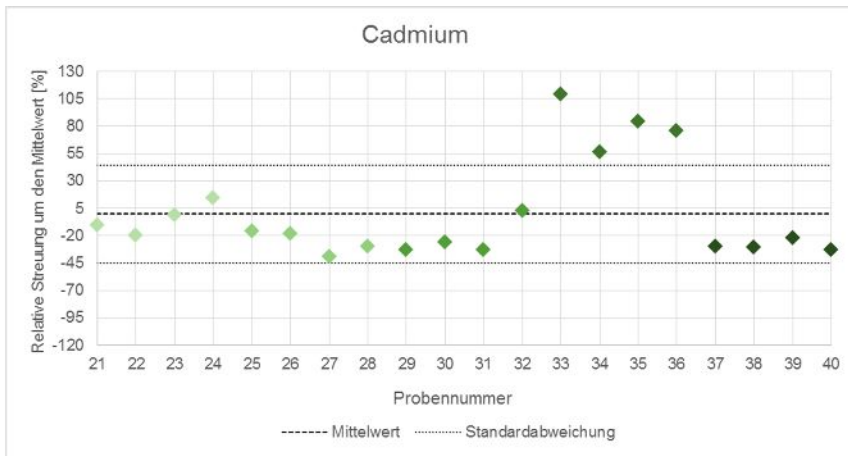


Abbildung 73: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Cadmiumgehalt – Probe 2

Tabelle 61: Cobaltgehalt Probe 2

Cobalt							
Probennummer	Co [mg/kg]	Probennummer	Co [mg/kg]	Probennummer	Co [mg/kg]	Probennummer	Co [mg/kg]
21	4,64	26	2,48	31	3,58	36	3,33
22	4,81	27	1,98	32	5,39	37	3,34
23	5,71	28	1,68	33	4,21	38	3,34
24	4,10	29	3,92	34	3,72	39	2,94
25	2,16	30	2,77	35	3,93	40	2,39
Mittelwert = 3,52 mg/kg Standardabweichung = 31,5 %							

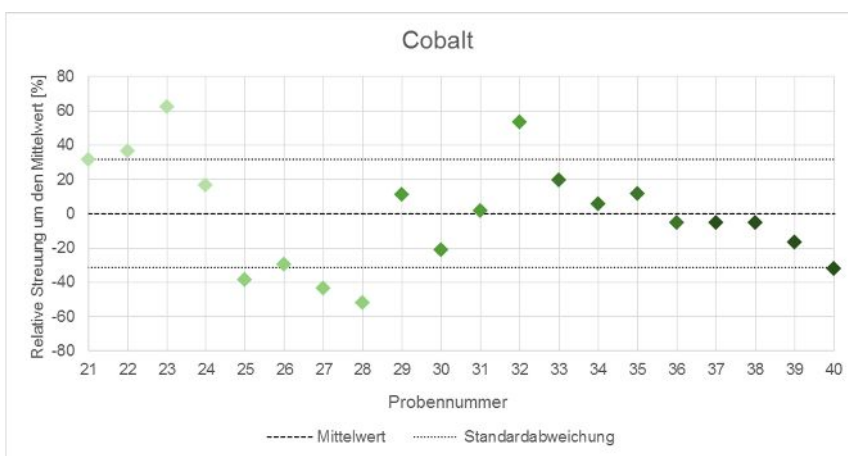


Abbildung 74: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Cobaltgehalt – Probe 2

Tabelle 62: Eisengehalt Probe 2

Eisen							
Probennummer	Fe [mg/kg]	Probennummer	Fe [mg/kg]	Probennummer	Fe [mg/kg]	Probennummer	Fe [mg/kg]
21	1550	26	1590	31	1750	36	2190
22	1350	27	2670	32	1980	37	1110
23	1850	28	1450	33	2050	38	1110
24	1290	29	1340	34	2400	39	1050
25	2770	30	1070	35	1880	40	850
Mittelwert = 1670 mg/kg Standardabweichung = 33,2 %							

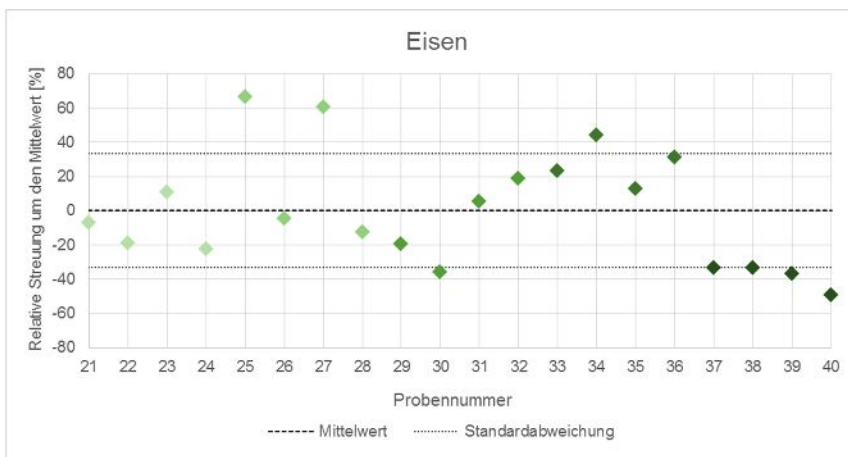


Abbildung 75: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Eisengehalt – Probe 2

Tabelle 63: Mangangehalt Probe 2

Mangan							
Probennummer	Mn [mg/kg]	Probennummer	Mn [mg/kg]	Probennummer	Mn [mg/kg]	Probennummer	Mn [mg/kg]
21	59,0	26	63,7	31	77,3	36	128,3
22	54,1	27	67,7	32	87,9	37	59,8
23	69,8	28	74,3	33	97,8	38	62,9
24	54,0	29	74,3	34	99,3	39	64,7
25	68,1	30	69,8	35	87,0	40	54,0
Mittelwert = 73,3 mg/kg Standardabweichung = 25,3 %							

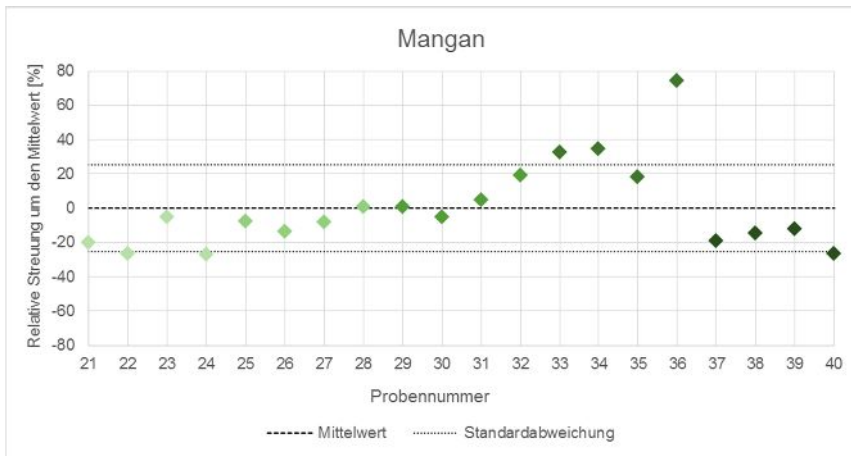


Abbildung 76: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Mangangehalt – Probe 2

Tabelle 64: Molybdängehalt Probe 2

Molybdän							
Probennummer	Mo [mg/kg]	Probennummer	Mo [mg/kg]	Probennummer	Mo [mg/kg]	Probennummer	Mo [mg/kg]
21	2,49	26	1,44	31	2,93	36	2,80
22	1,85	27	2,09	32	5,63	37	3,07
23	3,75	28	1,53	33	4,15	38	1,86
24	1,71	29	2,10	34	3,57	39	1,44
25	0,85	30	3,77	35	2,95	40	1,38
Mittelwert = 2,57 mg/kg Standardabweichung = 46,0 %							

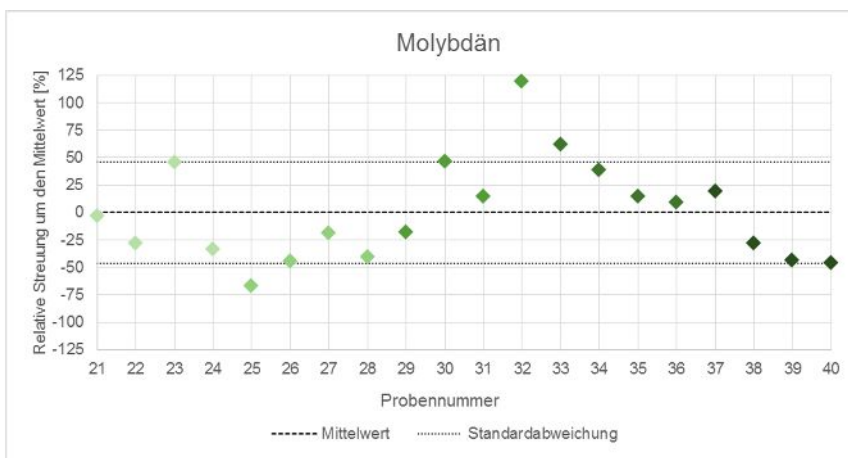


Abbildung 77: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Molybdängehalt – Probe 2

Tabelle 65: Natriumgehalt Probe 2

Natrium							
Proben-nummer	Na [mg/kg]	Proben-nummer	Na [mg/kg]	Proben-nummer	Na [mg/kg]	Proben-nummer	Na [mg/kg]
21	4110	26	2450	31	2110	36	2590
22	4250	27	2180	32	2310	37	3740
23	4320	28	2490	33	2840	38	3040
24	4010	29	2090	34	2760	39	3320
25	2470	30	2220	35	2470	40	4370
Mittelwert = 3010 mg/kg Standardabweichung = 27,4 %							

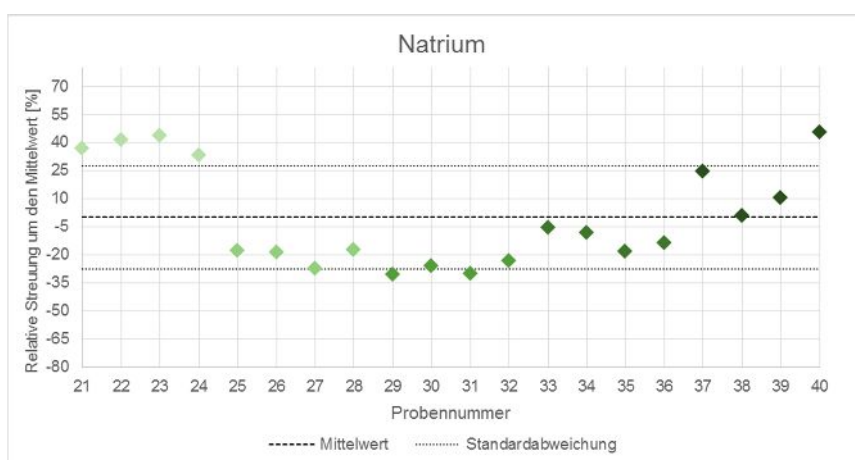


Abbildung 78: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Natriumgehalt – Probe 2

Tabelle 66: Quecksilbergehalt Probe 2

Quecksilber							
Proben-nummer	Hg [mg/kg]	Proben-nummer	Hg [mg/kg]	Proben-nummer	Hg [mg/kg]	Proben-nummer	Hg [mg/kg]
21	0,08	26	0,25	31	0,04	36	0,17
22	0,08	27	0,06	32	0,05	37	0,05
23	0,09	28	0,07	33	0,21	38	0,06
24	0,07	29	0,05	34	0,22	39	0,06
25	0,05	30	0,05	35	0,19	40	0,06
Mittelwert = 0,10 mg/kg Standardabweichung = 69,6 %							

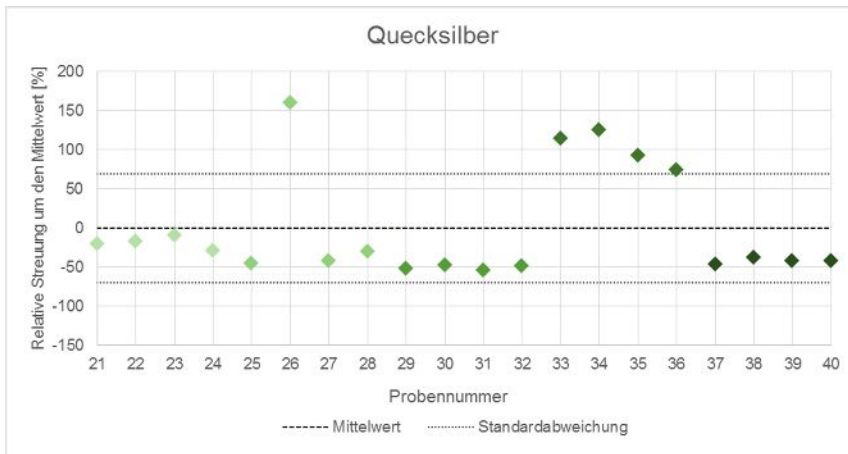


Abbildung 79: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Quecksilbergehalt – Probe 2

Bei den Metallbestimmungen allgemein sind immer wieder Heterogenitäten der Probe erkennbar, die sich durch eine ausgeprägte Schwankung bei den Wiederholanalysen aus ein und derselben Probe äußern. Vereinzelt kommt es auch zum Auftreten sogenannter Ausreißer, bei denen der Messwert deutlich über dem durchschnittlichen Gehalt liegt (vgl. Tabelle 67 bis Tabelle 70). Ursache dafür sind wahrscheinlich metallische Partikel in der Probe, die ungleichmäßig verteilt sind. [28, S,10-11]

In Abbildung 80 bis Abbildung 83 sind einige Fälle solcher Ausreißer dargestellt, wobei der in fast allen Fällen deutlich erhöhte Wert der Probe mit der Nummer 34 hervorzuheben ist.

Tabelle 67: Bleigehalt Probe 2

Blei							
Probennummer	Pb [mg/kg]	Probennummer	Pb [mg/kg]	Probennummer	Pb [mg/kg]	Probennummer	Pb [mg/kg]
21	15,4	26	15,8	31	14,9	36	32,5
22	14,0	27	12,7	32	14,7	37	21,1
23	16,6	28	12,4	33	55,1	38	22,4
24	13,4	29	14,0	34	56,5	39	18,5
25	14,6	30	14,7	35	33,8	40	27,3
Mittelwert = 22,0 mg/kg Standardabweichung = 59,6 %							

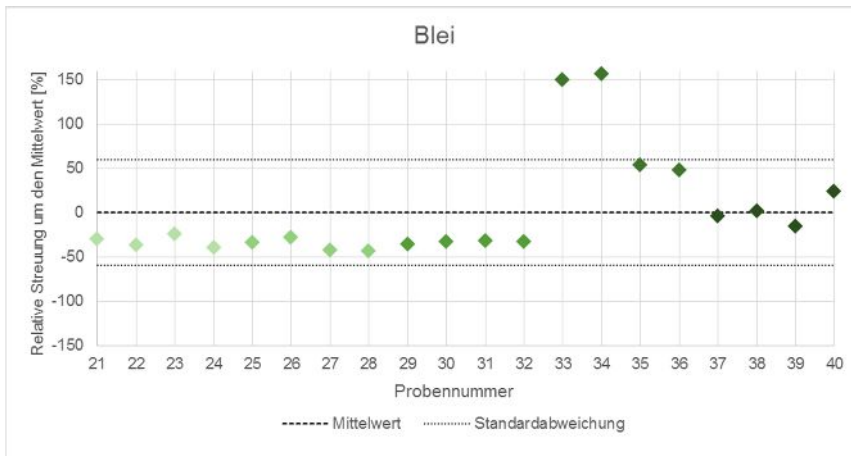


Abbildung 80: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Bleigehalt – Probe 2

Tabelle 68: Kupfergehalt Probe 2

Kupfer							
Probennummer	Cu [mg/kg]	Probennummer	Cu [mg/kg]	Probennummer	Cu [mg/kg]	Probennummer	Cu [mg/kg]
21	602	26	29	31	26	36	542
22	610	27	24	32	26	37	62
23	425	28	23	33	393	38	31
24	104	29	21	34	2355	39	28
25	32	30	20	35	220	40	23
Mittelwert = 280 mg/kg Standardabweichung = 190,8 %							

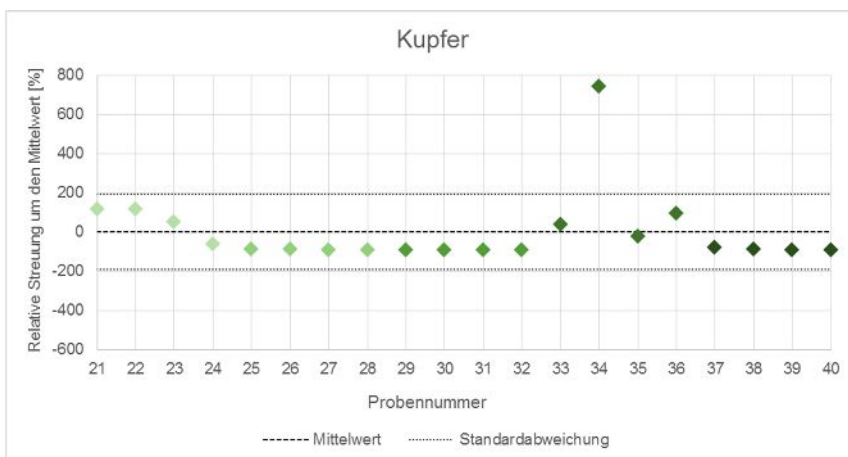


Abbildung 81: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Kupfergehalt – Probe 2

Tabelle 69: Zinkgehalt Probe 2

Zink							
Probennummer	Zn [mg/kg]	Probennummer	Zn [mg/kg]	Probennummer	Zn [mg/kg]	Probennummer	Zn [mg/kg]
21	230	26	333	31	283	36	225
22	246	27	252	32	305	37	220
23	276	28	331	33	214	38	196
24	314	29	283	34	401	39	187
25	390	30	274	35	196	40	191
Mittelwert = 267 mg/kg Standardabweichung = 28,8 %							

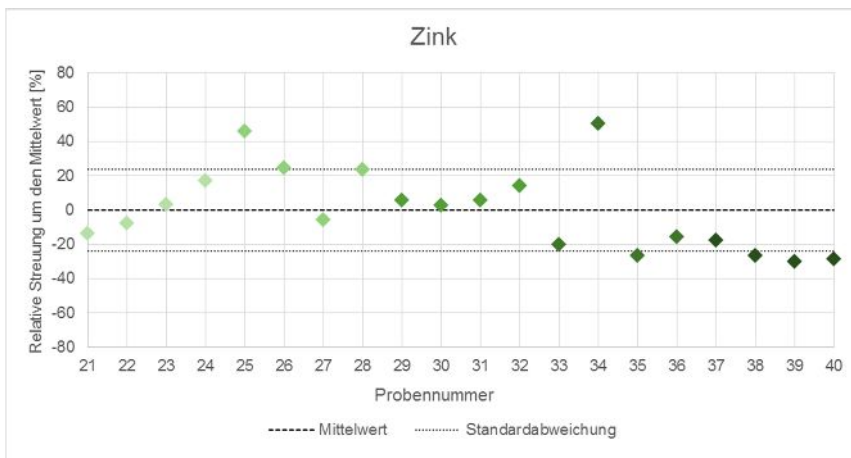


Abbildung 82: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Zinkgehalt – Probe 2

Tabelle 70: Zinngehalt Probe 2

Zinn							
Probennummer	Sn [mg/kg]	Probennummer	Sn [mg/kg]	Probennummer	Sn [mg/kg]	Probennummer	Sn [mg/kg]
21	69,8	26	25,0	31	23,0	36	74,5
22	69,2	27	26,1	32	22,9	37	19,3
23	52,4	28	23,5	33	56,7	38	23,2
24	20,0	29	22,1	34	251,2	39	18,7
25	24,7	30	21,6	35	42,5	40	19,9
Mittelwert = 45,3 mg/kg Standardabweichung = 115,0 %							

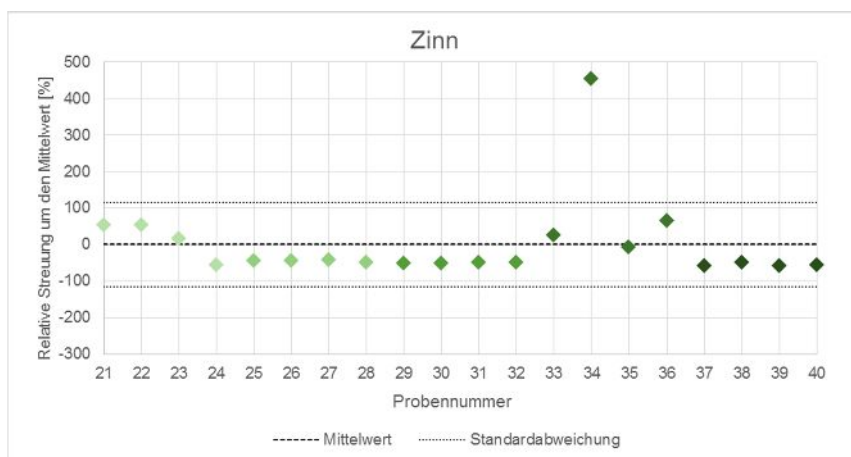


Abbildung 83: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Zinngehalt – Probe 2

Bei folgenden Metallen lag der gemessene Wert jeweils unter der Bestimmungsgrenze (siehe Tabelle 71 bis Tabelle 73)

Tabelle 71: Ergebnis für Beryllium

Beryllium							
Probennummer	Be [mg/kg]	Probennummer	Be [mg/kg]	Probennummer	Be [mg/kg]	Probennummer	Be [mg/kg]
21	< 0,625	26	< 0,625	31	< 0,625	36	< 0,625
22	< 0,625	27	< 0,625	32	< 0,625	37	< 0,625
23	< 0,625	28	< 0,625	33	< 0,625	38	< 0,625
24	< 0,625	29	< 0,625	34	< 0,625	39	< 0,625
25	< 0,625	30	< 0,625	35	< 0,625	40	< 0,625

Tabelle 72: Ergebnis für Nickel

Nickel							
Probennummer	Ni [mg/kg]	Probennummer	Ni [mg/kg]	Probennummer	Ni [mg/kg]	Probennummer	Ni [mg/kg]
21	5,43	26	9,84	31	82,68	36	8,81
22	< 0,31	27	3,47	32	112,82	37	< 0,31
23	27,79	28	< 0,31	33	12,30	38	< 0,31
24	< 0,31	29	40,89	34	< 0,31	39	< 0,31
25	< 0,31	30	17,71	35	< 0,31	40	< 0,31

Tabelle 73: Ergebnis für Thallium

Thallium							
Proben- nummer	Tl [mg/kg]	Proben- nummer	Tl [mg/kg]	Proben- nummer	Tl [mg/kg]	Proben- nummer	Tl [mg/kg]
21	< 0,03	26	< 0,03	31	< 0,03	36	< 0,03
22	< 0,03	27	< 0,03	32	< 0,03	37	< 0,03
23	< 0,03	28	< 0,03	33	< 0,03	38	< 0,03
24	< 0,03	29	< 0,03	34	< 0,03	39	< 0,03
25	< 0,03	30	< 0,03	35	< 0,03	40	< 0,03

Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse für Probe 1 und Probe 2:

Bei der direkten Gegenüberstellung der erhaltenen Ergebnisse lässt sich erkennen, dass die Standardabweichung der Messwerte für die Metallgehalte bei beiden Proben deutlich höher ist als der durchschnittliche Wert bei den anderen Parametern (z.B. Heizwert, Aschegehalt, Glühverlust). Wie bei der Einteilung der Parameter nach dem Ausmaß ihrer relativen Streuung (vergleiche Tabelle 6 bzw. Tabelle 40 zu Beginn des Kapitels 4.1 bzw. 4.2) festzustellen ist, liegt die Standardabweichung bei den Metallen ca. zwischen 10-100 %, währenddessen die Werte der übrigen Parameter hauptsächlich zwischen 10-20 % liegen. Eine Erklärung für den höheren Wert der Standardabweichung kann einerseits im zusätzlichen Aufbereitungsschritt des Königswasserausschlusses gefunden werden, andererseits lässt er sich aufgrund der inhomogenen Verteilung der Metallteilchen in der Probe erklären. Der Einfluss des zusätzlichen Aufbereitungsschrittes bestätigt sich auch bei der Streuung der Werte für Chlor und Schwefel, die größtmäßig zwischen jenen der Metalle und der übrigen Parametern liegen.

5 Messunsicherheit

Eine Abschätzung der Messunsicherheit für sämtliche, im Zuge der vorliegenden Masterarbeit analysierten Parameter war aufgrund der großen Datenmengen nicht möglich, da es den Rahmen der Arbeit sprengen würde. Aus diesem Grund wurde die Abschätzung der Messunsicherheit beispielhaft an den Elementen Magnesium und Chrom vorgenommen. Bevor man die Messunsicherheit eines konkreten Analyseverfahrens bestimmen kann, müssen die einzelnen Quellen der Unsicherheit identifiziert werden (vgl. Abbildung 84). Einflussfaktoren sind unter anderem sämtliche verwendeten Utensilien (z.B. Messunsicherheit von Waage, Pipette, Konzentration der Stammlösung) als auch die jeweiligen Durchführungen (z.B. Aufschluss, Verdünnungen, etc.). [29, S. 11,12]

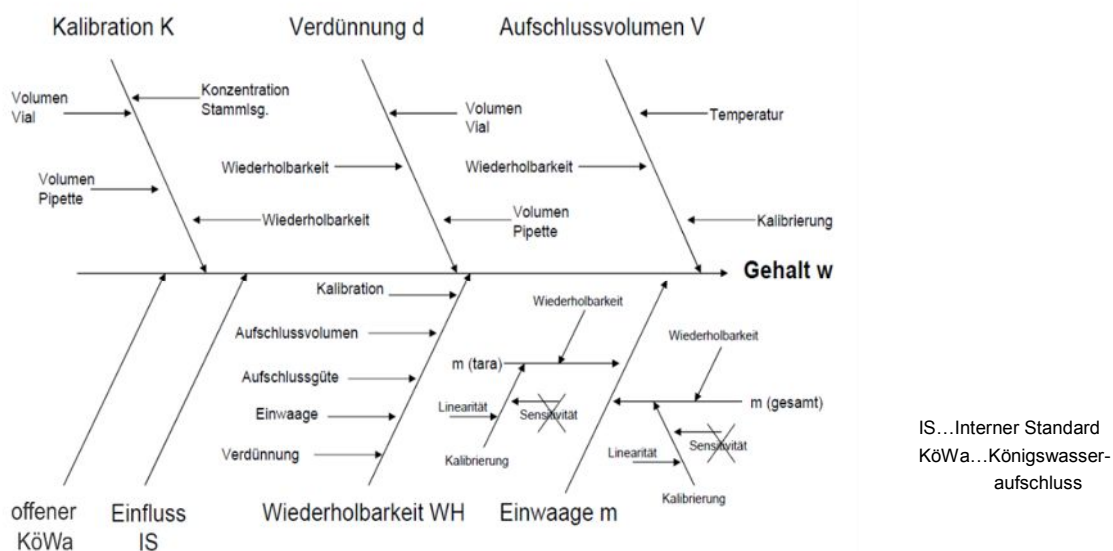


Abbildung 84: Relevante Unsicherheitsquellen, dargestellt in einem Ursache-Wirkungs-Diagramm, nach [29, S. 12]

Als Grundlage der Berechnung wurden Daten verwendet, die am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW) an der Montanuniversität Leoben erhoben wurden. Die einzelnen Unsicherheitsbeiträge wurden aufgelistet, berechnet bzw. aus vorhandenen Daten abgeleitet. [29, S. 2-25]

Um die Auswirkung der Probenaufbereitung in die Messunsicherheit miteinzubeziehen, wurden die im Zuge dieser Masterarbeit erhaltenen Analyseergebnisse verwendet. Hierzu wurde die relative Standardabweichung für Magnesium und Chrom berechnet und diese als Wiederholbarkeit in das Berechnungsblatt eingesetzt. [29, S. 2-25]

Magnesium

Die genauen Ergebnisse für die Bestimmung der Messunsicherheit von Magnesium sind in Tabelle 74 dargestellt.

Tabelle 74: Übersicht der Daten von Magnesium

Messergebnisse Magnesium				
Probennummer	Mittelwert [mg/kg]	Relative Standardabweichung [%]	Relative Messunsicherheit	Berechnete Messunsicherheit [%]
1-20	6950	18	0,18346	49
21-40	1130	10	0,09969	38

In Tabelle 75 sind die unterschiedlichen Messunsicherheiten bezogen auf die Art der Probe dargestellt. Die Unsicherheitsbeiträge für flüssige Proben und für flüssige Proben nach Königswasseraufschluss wurden aus den bereits vorhandenen Daten des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft entnommen, während die Beiträge inklusive Probenaufbereitung mithilfe der erhaltenen Daten mittels Berechnungsblatt bestimmt wurden. [29, S. 2-25] Sie ist erwartungsgemäß für Proben mit mehreren Aufbereitungsschritten höher.

Tabelle 75: Vergleich der Messunsicherheiten für Magnesium

Messunsicherheiten für Magnesium		
Parameter	Messunsicherheit [%]	Art der Probe
Mg	17 [29, S. 25]	Flüssige Probe
	32 [29, S. 25]	Flüssige Probe nach Königswasseraufschluss
	49	Flüssige Probe nach Aufschluss und Aufbereitung Probe 1-20
	38	Flüssige Probe nach Aufschluss und Aufbereitung Probe 21-40

In Abbildung 85 sind die Anteile der jeweiligen Schritte zur gesamten Messunsicherheit grafisch veranschaulicht. Hier zeigt sich der Einfluss der Probenaufbereitung deutlich.

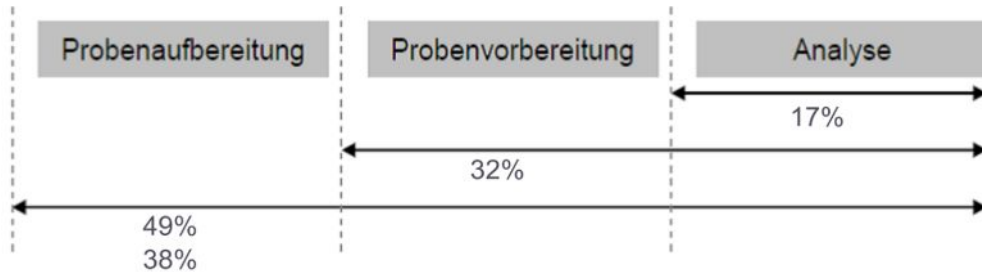


Abbildung 85: Messunsicherheiten der verschiedenen Stadien des Analyseverfahrens für Magnesium

Chrom

Die Ergebnisse für das Element Chrom sind in Tabelle 76 aufgelistet.

Tabelle 76: Übersicht der Daten von Chrom

Messergebnisse Chrom				
Probennummer	Mittelwert [mg/kg]	Relative Standardabweichung [%]	Relative Messunsicherheit	Berechnete Messunsicherheit [%]
1-20	88,6	91	0,90882	185
21-40	294	37	0,36472	80

Tabelle 77 zeigt, inwiefern sich eine höher relative Standardabweichung auf die Messunsicherheit auswirkt. Die Werte sind um einiges höher als jene für Magnesium.

Tabelle 77: Vergleich der Messunsicherheiten für Chrom

Messunsicherheiten für Chrom		
Parameter	Messunsicherheit [%]	Art der Probe
Cr	14 [29, S. 25]	Flüssige Probe
	32 [29, S. 25]	Flüssige Probe nach Königswasseraufschluss
	185	Flüssige Probe nach Aufschluss und Aufbereitung Probe 1-20
	80	Flüssige Probe nach Aufschluss und Aufbereitung Probe 21-40

In Abbildung 86 werden die Ergebnisse aus Tabelle 77 grafisch veranschaulicht. Die Probenaufbereitung liefert erwartungsgemäß den größten Beitrag zur gesamten Messunsicherheit.

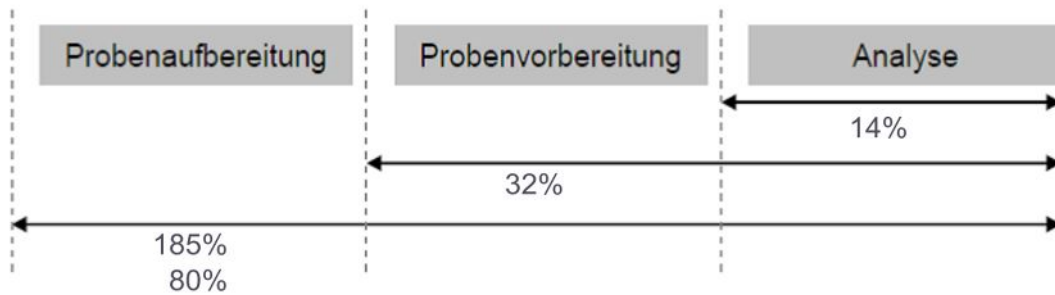


Abbildung 86: Messunsicherheiten der verschiedenen Stadien des Analyseverfahrens für Chrom

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Masterarbeit sollte das Ausmaß der Beeinflussung der Probenaufbereitung auf die Messunsicherheit von Analyseergebnissen abgeschätzt werden. Im ersten Schritt wurden hierfür zwei reale Proben (ein Restmüll sowie ein Ersatzbrennstoff) von der Original- bis zur Analyseprobe hin aufbereitet, anschließend wurden verschiedene umweltrelevante Parameter bestimmt (siehe Abbildung 87).

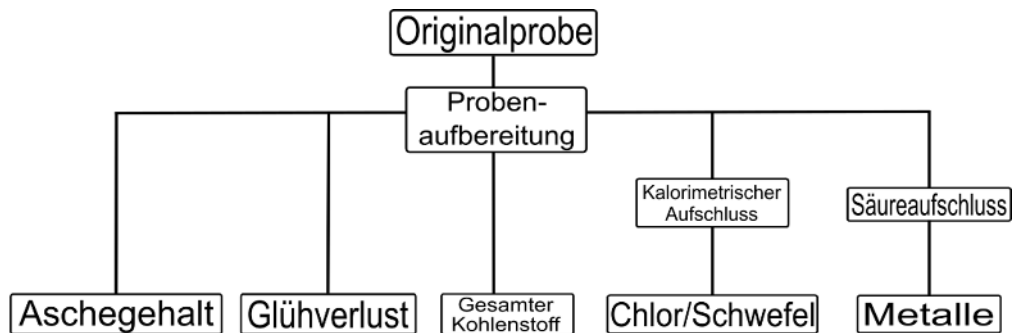


Abbildung 87: Die bei der Analyse bestimmten Parameter

Es wurden einerseits Parameter gewählt, die nach der Probenaufbereitung direkt bestimmt werden können (Aschegehalt, Heizwert, Glühverlust, gesamter Kohlenstoff). Andererseits wurden Parameter bestimmt, bei denen eine weitere Probenvorbereitung notwendig war (kalorimetrischer Aufschluss für Chlor- und Schwefelgehalt und Königswasseraufschluss für Metallgehaltbestimmung). Folgende Metalle wurden hierbei bestimmt: Al, Sb, As, Ba, Be, Pb, Cd, Ca, Cr, Co, Fe, K, Cu, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Hg, Se, Tl, Ti, V, Zn und Sn.

Je reale Probe wurden 20 Analyseproben gewonnen – der Probenaufbereitungsplan für Probe 1 ist in Abbildung 88 beispielhaft zu sehen.

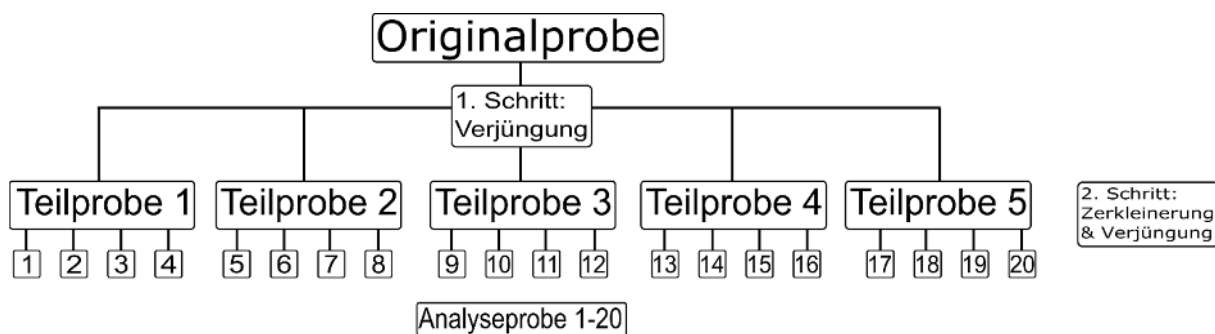


Abbildung 88: Probenaufbereitungsplan für die Gewinnung der 20 Analyseproben – Probe 1

Eine Einteilung der Messergebnisse der einzelnen Parameter nach der Höhe ihrer Standardabweichung hat gezeigt, dass diese bei den meisten Metallen deutlich höher ist als zum Beispiel beim Aschegehalt oder Heizwert. Es kann daraus geschlossen werden, dass der zusätzliche Aufbereitungsschritt durch den Königswasseraufschluss zu einer Erhöhung der Messunsicherheit führt. Hierbei spielt jedoch gewiss auch die grundsätzlich heterogenere

Verteilung der Metallpartikel in der Probe eine Rolle, denn so sind z.B. Ausreißer nur bei der Metallgehaltbestimmung aufgetreten.

Bei der näheren Betrachtung der Diagramme sind oftmals deutliche Gruppierungen festgestellt worden, die die starke Beeinflussung der Probenteilung und -aufbereitung zeigen. In Abbildung 89 sind zwei Diagramme dargestellt, bei denen die angesprochenen Gruppierungen mit einem Kreis markiert wurden. Der Einfluss der Probenteilung zu fünf Teilproben (mit der anschließenden Entnahme der jeweils vier Analyseproben) ist in diesem Fall besonders gut ersichtlich.

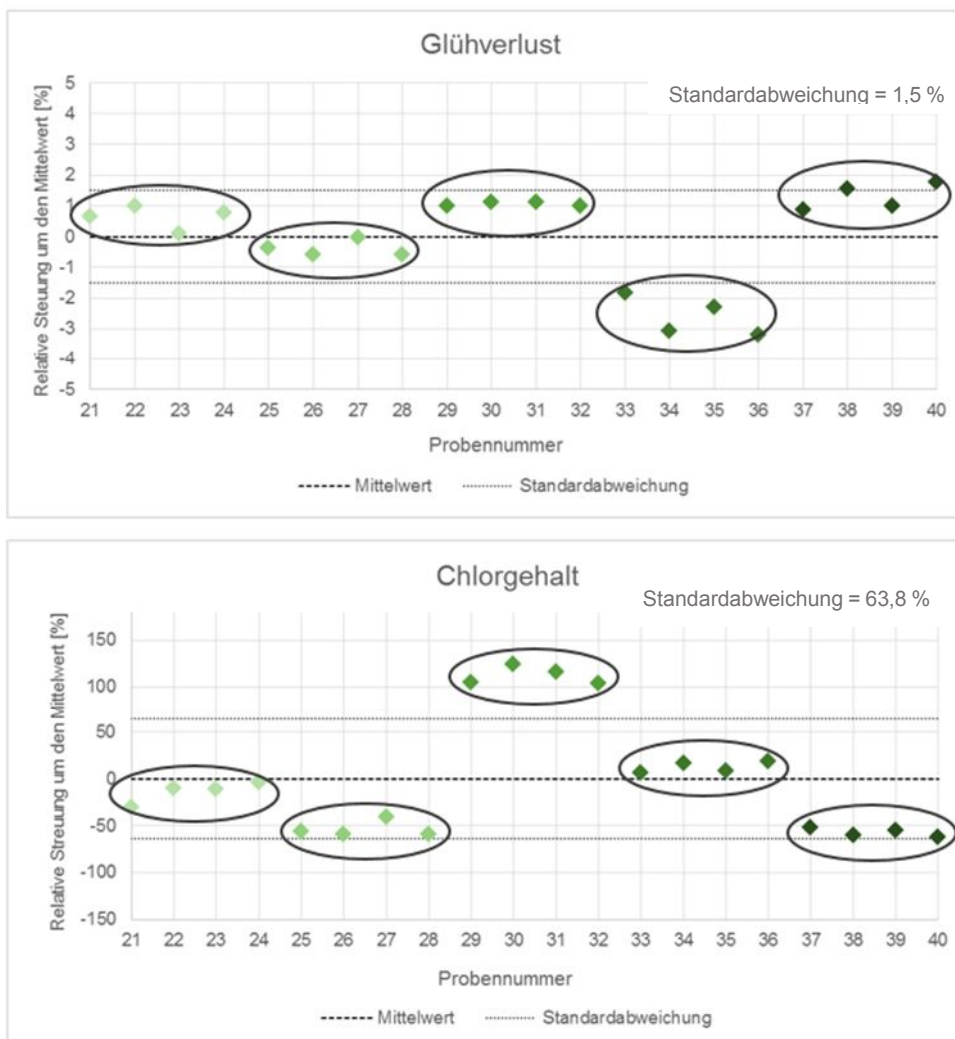


Abbildung 89: Deutliche erkennbare Gruppierung der Messwerte der fünf Teilproben

In einem zweiten Schritt sollten die gewonnenen Ergebnisse für eine Abschätzung der Messunsicherheit eines konkreten Analyseverfahrens verwendet werden. Da es den Rahmen der Masterarbeit sprengen würde, konnte die Berechnung der Messunsicherheit nicht für alle Parameter vorgenommen werden. Grundsätzlich wurde die Datengrundlage für alle Parameter geschaffen, sodass auch für diese die jeweilige Messunsicherheit berechnet werden könnte.

Für die Abschätzung der Messunsicherheit wurde ein bereits vorhandenes Berechnungsschema (für die Bestimmung von Metallen mittels ICP-MS) des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft an der Montanuniversität Leoben verwendet. Jener Anteil der Messunsicherheit, der durch die Probenaufbereitung hinzukommt, wurde durch den sogenannten Beitrag der Wiederholbarkeit miteinbezogen. Dieser Beitrag wurde durch die relative Standardabweichung der Messreihe ausgedrückt.

Ziel war es, den Einfluss der Probenaufbereitung auf die Messunsicherheit zu bestimmen. Dieser wird anhand zweier Beispiele nachfolgend in Abbildung 90 und Abbildung 91 grafisch dargestellt. Für eine höhere Anschaulichkeit der Auswirkungen der relativen Standardabweichung der jeweiligen Messreihe wurde ein Parameter mit niedriger (Mg) und einer mit hoher Standardabweichung (Cr) ausgewählt. Die relative Standardabweichung für Magnesium betrug 18 % bzw. 10 % und für Chrom 90 % bzw. 36 %.

Beide Abbildungen zeigen, dass sich die gesamte Messunsicherheit pro weiterem einbezogenen Schritt des Analyseverfahrens deutlich erhöht. Die Erwartung, dass die Probenaufbereitung jener Schritt mit dem größten Einfluss auf das Analyseergebnis ist, hat sich bestätigt.

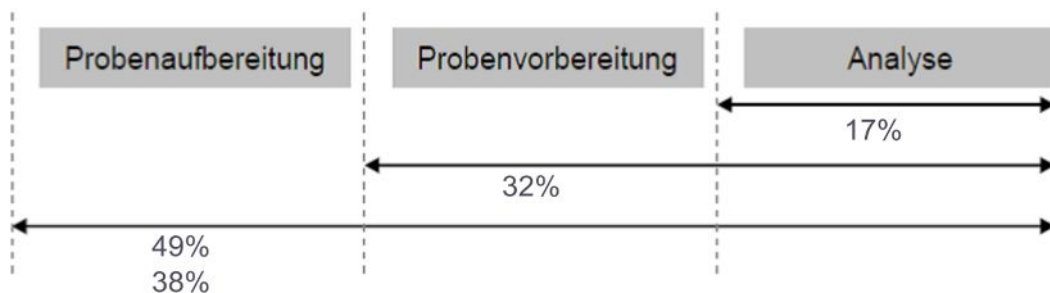


Abbildung 90: Messunsicherheiten der verschiedenen Stadien des Analyseverfahrens für Magnesium

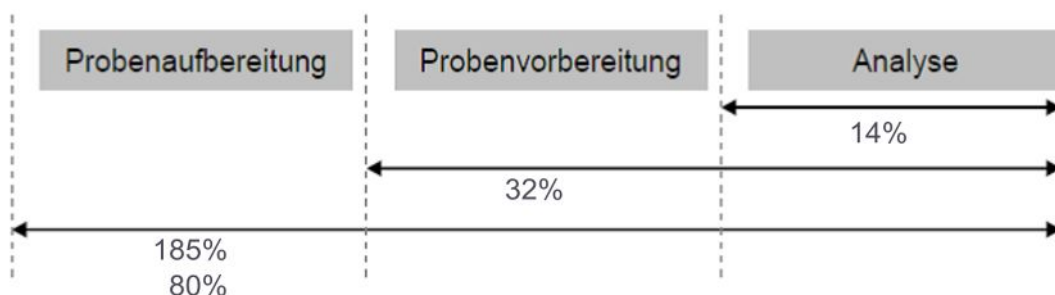


Abbildung 91: Messunsicherheiten der verschiedenen Stadien des Analyseverfahrens für Chrom

7 Verzeichnisse

7.1 Literatur

- [1] Ellison S., Rosslein M., Williams A.: Ermittlung der Messunsicherheit bei analytischen Messungen, EURACHEM/CITAC Guide , 2003.
- [2] Aldrian A., Wellacher M., Pomberger R.: Development and validation of a new direct sampling method for coarse mono- and mixed waste fractions bound in bales, International Journal of Environmental Analytical Chemistry, Vol. 95, Iss. 15, 2015.
- [3] Pomberger R., Aldrian A., Sarc R.: Grenzwerte – Technische Sicherheit zur rechtlichen Notwendigkeit, 2015.
- [4] Gressner A, Arndt T.: Lexikon der Medizinischen Laboratoriumsdiagnostik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 2013.
- [5] Ramsey M., Ellison S.: Measurement uncertainty arising from sampling: A guide to methods and approaches, Eurachem/EUROLAB/CITAC/Nordtest/AMC Guide, 2007.
- [6] ÖNORM EN 15002: Charakterisierung von Abfällen – Herstellung von Prüfmengen aus der Laboratoriumsprobe, Europäisches Komitee für Normung (CEN), 2006.
- [7] ÖNORM EN 15443: Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Herstellung von Laboratoriumsproben, Europäisches Komitee für Normung (CEN), 2011.
- [8] Lorber K.: Skriptum zur Lehrveranstaltung Angewandte Umweltanalytik, Montanuniversität Leoben, WS 2009/10.
- [9] ÖNORM EN 15413: Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Herstellung der Versuchsprobe aus der Laboratoriumsprobe, Europäisches Komitee für Normung (CEN), 2011.
- [10] Schwister K.: Taschenbuch der Verfahrenstechnik, Carl Hanser Verlag München, 2010.
- [11] Prochaska M. et al.: Heizwertreiche Abfallfraktion aus der mechanischen Abfallbehandlung (MA) und der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBV), Endbericht, BWLFUW, 2004.
- [12] Zappa M.: Messtechnische Begriffe und ihre Bedeutung im Laboralltag, Teil 1: Richtigkeit, Präzision und Genauigkeit, userCom, 1/2009.
- [13] DIN 51900-1: Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe – Bestimmung des Brennwertes mit dem Bombenkalorimeter und Berechnung des Heizwertes, Deutsches Institut für Normung (DIN), 2000.

- [14] ÖNORM EN 14582: Charakterisierung von Abfällen – Halogen- und Schwefelgehalt – Sauerstoffverbrennung in geschlossenen Systemen und Bestimmungsmethoden, Europäisches Komitee für Normung (CEN), 2007.
- [15] DIN 51719: Bestimmung des Aschegehaltes – Prüfung fester Brennstoffe, Deutsches Institut für Normung, 1997.
- [16] Cord-Langwehr K.: Einführung in die Abfalltechnik, Verlag B. G. Teubner, 2002.
- [17] ÖNORM EN 15169: Charakterisierung von Abfällen – Bestimmung des Glühverlustes in Abfall, Schlamm und Sedimenten, Europäisches Komitee für Normung (CEN), 2007.
- [18] ÖNORM EN 13137: Charakterisierung von Abfall – Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) in Abfall, Schlämmen und Sedimenten, Europäisches Komitee für Normung (CEN), 2001.
- [19] ÖNORM EN 13657: Charakterisierung von Abfällen – Aufschluss zur anschließenden Bestimmung des in Königswasser löslichen Anteils an Elementen in Abfällen, Europäisches Komitee für Normung (CEN), 2002.
- [20] Hein H., Kunze W.: Umweltanalytik mit Spektrometrie und Chromatographie, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004.
- [21] Schu R., Niestroj J.: Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, Optimierung der Abfallverbrennung, EcoEnergy Gesellschaft für Energie- und Umwelttechnik mbH, 31.01. – 01.02.2007.
- [22] Müller C.: Thermische Abfallbehandlung: Verhalten von Schwefel und dessen Einfluss auf die Produktqualität, Universität Innsbruck, 2005.
- [23] Richly W.: Meß- und Analyseverfahren für feste Abfallstoffe, für Schadstoffe in Abwasser und Abgasen, Vogel Verlag und Druck KG, 1992.
- [24] Rennenberger G.: Deponierückbau als Alternative zur Sanierung?, Fachhochschule Trier, 2002.
- [25] Wiener Umweltschutzabteilung (Magistratsabteilung 22) (Hrsg.): Entwicklung der Schwermetalle im Wiener Restmüll, 2006.
- [26] Waste & Resources Action Programme – WRAP (Hrsg.): A classification scheme to define the quality of waste derived fuels, 2012.
- [27] Lorber K., Sarc R., Pomberger R.: Österreichische Erfahrungen zum Einsatz verschiedener Abfälle als Ersatzbrennstoffe (EBS) und mögliche Anwendungsprobleme, 2010.

- [28] Denner M., Kügler I.: Erarbeitung eines Beprobungskonzeptes für Ersatzbrennstoffe, Projekt ERSA Endbericht, Umweltbundesamt, 2006.
- [29] Aldrian A.: Bestimmung der Messunsicherheit ICP-MS, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW), Montanuniversität Leoben, 2013.

7.2 Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
°C	Grad Celsius
EBS	Ersatzbrennstoff
etc.	et cetera
v.a.	vor allem
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

7.3 Tabellen

Tabelle 1: Auflistung der möglichen Einflussquellen auf die Messunsicherheit.....	3
Tabelle 2: Übersicht der Eigenschaften von Probe 1	15
Tabelle 3: Summe der aussortierten Störstoffe bei Probe 1.....	16
Tabelle 4: Übersicht der Eigenschaften von Probe 2	17
Tabelle 5: Summe der aussortierten Störstoffe bei Probe 2.....	19
Tabelle 6: Einteilung der Parameter nach dem Ausmaß ihrer relativen Streuung.....	24
Tabelle 7: Chlorgehalt Probe 1	25
Tabelle 8: Schwefelgehalt Probe 1	25
Tabelle 9: Aschegehalt Probe 1.....	26
Tabelle 10: Ergebnisse der Heizwertbestimmung Probe 1	27
Tabelle 11: Ergebnisse der Brennwertbestimmung Probe 1	28
Tabelle 12: Glühverlust Probe 1	29
Tabelle 13: TC-Gehalt von Probe 1	29
Tabelle 14: Arsengehalt Probe 1	31
Tabelle 15: Kaliumgehalt Probe 1.....	31
Tabelle 16: Mangangehalt Probe 1.....	32
Tabelle 17: Molybdängehalt Probe 1	33
Tabelle 18: Natriumgehalt Probe 1	33
Tabelle 19: Quecksilbergehalt Probe 1.....	34

Tabelle 20: Titangehalt Probe 1.....	35
Tabelle 21: Vanadiumgehalt Probe 1.....	35
Tabelle 22: Aluminiumgehalt Probe 1.....	36
Tabelle 23: Calciumgehalt Probe 1.....	37
Tabelle 24: Eisengehalt Probe 1.....	37
Tabelle 25: Magnesiumgehalt Probe 1.....	38
Tabelle 26: Antimongehalt Probe 1.....	39
Tabelle 27: Bariumgehalt Probe 1.....	39
Tabelle 28: Bleigehalt Probe 1.....	40
Tabelle 29: Cadmiumgehalt Probe 1.....	41
Tabelle 30: Chromgehalt Probe 1.....	41
Tabelle 31: Cobaltgehalt Probe 1.....	42
Tabelle 32: Kupfergehalt Probe 1.....	43
Tabelle 33: Nickelgehalt Probe 1.....	43
Tabelle 34: Phosphorgehalt Probe 1.....	44
Tabelle 35: Selengehalt Probe 1.....	45
Tabelle 36: Thalliumgehalt Probe 1.....	45
Tabelle 37: Zinkgehalt Probe 1.....	46
Tabelle 38: Zinngehalt Probe 1.....	47
Tabelle 39: Ergebnis für Beryllium.....	47
Tabelle 40: Einteilung der Parameter nach der Höhe ihrer relativen Streuung.....	48
Tabelle 41: Chlorgehalt Probe 2.....	48
Tabelle 42: Schwefelgehalt Probe 2.....	50
Tabelle 43: Aschegehalt Probe 2.....	51
Tabelle 44: Heizwert Probe 2.....	52
Tabelle 45: Brennwert Probe 2.....	52
Tabelle 46: Glühverlust Probe 2.....	53
Tabelle 47: TC-Gehalt Probe 2.....	54
Tabelle 48: Aluminiumgehalt Probe 2.....	54
Tabelle 49: Arsengehalt Probe 2.....	55
Tabelle 50: Calciumgehalt Probe 2.....	56

Tabelle 51: Kaliumgehalt Probe 2.....	56
Tabelle 52: Magnesiumgehalt Probe 2.....	57
Tabelle 53: Phosphorgehalt Probe 2.....	58
Tabelle 54: Selengehalt Probe 2.....	58
Tabelle 55: Antimongehalt Probe 2.....	59
Tabelle 56: Bariumgehalt Probe 2.....	60
Tabelle 57: Chromgehalt Probe 2.....	60
Tabelle 58: Vanadiumgehalt Probe 2.....	61
Tabelle 59: Titangehalt Probe 2.....	62
Tabelle 60: Cadmiumgehalt Probe 2.....	62
Tabelle 61: Cobaltgehalt Probe 2.....	63
Tabelle 62: Eisengehalt Probe 2.....	64
Tabelle 63: Mangangehalt Probe 2.....	64
Tabelle 64: Molybdängehalt Probe 2.....	65
Tabelle 65: Natriumgehalt Probe 2.....	66
Tabelle 66: Quecksilbergehalt Probe 2.....	66
Tabelle 67: Bleige halt Probe 2.....	67
Tabelle 68: Kupfergehalt Probe 2.....	68
Tabelle 69: Zinkgehalt Probe 2.....	69
Tabelle 70: Zinngehalt Probe 2.....	69
Tabelle 71: Ergebnis für Beryllium.....	70
Tabelle 72: Ergebnis für Nickel.....	70
Tabelle 73: Ergebnis für Thallium.....	71
Tabelle 74: Übersicht der Daten von Magnesium.....	73
Tabelle 75: Vergleich der Messunsicherheiten für Magnesium.....	73
Tabelle 76: Übersicht der Daten von Chrom.....	74
Tabelle 77: Vergleich der Messunsicherheiten für Chrom.....	74

7.4 Abbildungen

Abbildung 1: Einfluss der unterschiedlichen Schritte auf die Messunsicherheit.....	3
Abbildung 2: Ablaufschema von der Probenahme bis zur Auswertung der Ergebnisse für indirekte und direkte Verfahren.....	5

Abbildung 3: Fließdiagramm zur Entscheidungsfindung für die Gewinnung einer repräsentativen Prüfmenge aus einer Laboratoriumsprobe	6
Abbildung 4: Doppelwellenzerkleinerer zur Vorzerkleinerung des Materials	7
Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer Schneidmühle.....	8
Abbildung 6: Durchführungsschema der Probenverjüngung.....	8
Abbildung 7: Vergleich der Mengen der ursprünglichen Probe bis zur Analyseprobe	10
Abbildung 8: Höhere Genauigkeit durch höhere Richtigkeit und Präzision	11
Abbildung 9: Schematischer Ablauf der Berechnung der Messunsicherheit	12
Abbildung 10: Die bei der Analyse bestimmten Parameter	14
Abbildung 11: Probenaufbereitungsplan für die Gewinnung der 20 Analyseproben – Probe 1	15
Abbildung 12: Probe 1 im unveränderten Zustand.....	15
Abbildung 13: Schneidmühle.....	16
Abbildung 14: Probe nach der Feinzerkleinerung	16
Abbildung 15: Probenaufbereitungsplan für Probe 2	17
Abbildung 16: Probe 2 vor der Grobzerkleinerung.....	18
Abbildung 17: Probe 2 nach der Vorzerkleinerung mit einem Doppelwellenzerkleinerer.....	18
Abbildung 18: Probe 2 nach der Vorzerkleinerung und Probenteilung.....	18
Abbildung 19: Aussortierung der Störstoffe und händische Zerkleinerung.....	19
Abbildung 20: Probe nach der Feinzerkleinerung	19
Abbildung 21: Aufbau einer kalorischen Bombe	20
Abbildung 22: thermischer Aufschluss im Rückflusssystem.....	23
Abbildung 23: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Chlorgehalt – Probe 1.....	25
Abbildung 24: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Schwefelgehalt – Probe 1.....	26
Abbildung 25: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Aschegehalt – Probe 1	27
Abbildung 26: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Brennwert / Heizwert – Probe 1	28
Abbildung 27: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Glühverlust – Probe 1.....	29
Abbildung 28: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den TC-Gehalt – Probe 1	30

Abbildung 29: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Arsengehalt – Probe 1	31
Abbildung 30: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Kaliumgehalt – Probe 1	32
Abbildung 31: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Mangangehalt – Probe 1	32
Abbildung 32: Diagramm Molybdän Probe 1	33
Abbildung 33: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Natriumgehalt – Probe 1	34
Abbildung 34: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Quecksilbergehalt – Probe 1	34
Abbildung 35: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Titangehalt – Probe 1	35
Abbildung 36: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Vanadiumgehalt – Probe 1	36
Abbildung 37: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Aluminiumgehalt – Probe 1.....	36
Abbildung 38: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Calciumgehalt – Probe 1	37
Abbildung 39: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Eisengehalt – Probe 1	38
Abbildung 40: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Magnesiumgehalt – Probe 1	38
Abbildung 41: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Antimongehalt – Probe 1	39
Abbildung 42: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Bariumgehalt – Probe 1	40
Abbildung 43: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Bleigehalt – Probe 1	40
Abbildung 44: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Cadmiumgehalt – Probe 1	41
Abbildung 45: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Chromgehalt – Probe 1	42
Abbildung 46: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Cobaltgehalt – Probe 1	42

Abbildung 47: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Kupfergehalt – Probe 1.....	43
Abbildung 48: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Nickelgehalt – Probe 1	44
Abbildung 49: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Phosphorgehalt – Probe 1	44
Abbildung 50: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Selengehalt – Probe 1	45
Abbildung 51: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Thalliumgehalt – Probe 1.....	46
Abbildung 52: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Zinkgehalt – Probe 1	46
Abbildung 53: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Zinngehalt – Probe 1	47
Abbildung 54: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Chlorgehalt – Probe 2.....	49
Abbildung 55: Vergleich der Zusammensetzungen von Probe 1 (links) und Probe 2 (rechts)	49
Abbildung 56: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Schwefelgehalt – Probe 2.....	50
Abbildung 57: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Aschegehalt – Probe 2	51
Abbildung 58: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Brenn- und Heizwert – Probe 2	52
Abbildung 59: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Glühverlust – Probe 2.....	53
Abbildung 60: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den TC-Gehalt – Probe 2	54
Abbildung 61: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Aluminiumgehalt – Probe 2.....	55
Abbildung 62: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Arsengehalt – Probe 2.....	55
Abbildung 63: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Calciumgehalt – Probe 2	56
Abbildung 64: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Kaliumgehalt – Probe 2	57

Abbildung 65: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Magnesiumgehalt – Probe 2.....	57
Abbildung 66: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Phosphorgehalt – Probe 2.....	58
Abbildung 67: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Selengehalt – Probe 2.....	59
Abbildung 68: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Antimongehalt – Probe 2.....	59
Abbildung 69: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Bariumgehalt – Probe 2.....	60
Abbildung 70: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Chromgehalt – Probe 2.....	61
Abbildung 71: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Vanadiumgehalt – Probe 2.....	61
Abbildung 72: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Titangehalt – Probe 2.....	62
Abbildung 73: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Cadmiumgehalt – Probe 2.....	63
Abbildung 74: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Cobaltgehalt – Probe 2.....	63
Abbildung 75: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Eisengehalt – Probe 2.....	64
Abbildung 76: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Mangangehalt – Probe 2.....	65
Abbildung 77: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Molybdängehalt – Probe 2.....	65
Abbildung 78: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Natriumgehalt – Probe 2.....	66
Abbildung 79: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Quecksilbergehalt – Probe 2.....	67
Abbildung 80: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Bleigehalt – Probe 2.....	68
Abbildung 81: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Kupfergehalt – Probe 2.....	68
Abbildung 82: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Zinkgehalt – Probe 2.....	69

Abbildung 83: Relative, auf den Mittelwert bezogene Abweichung einzelner Analysewerte für den Zinngehalt – Probe 2	70
Abbildung 84: Relevante Unsicherheitsquellen, dargestellt in einem Ursache-Wirkungs-Diagramm	72
Abbildung 85: Messunsicherheiten der verschiedenen Stadien des Analyseverfahrens für Magnesium	74
Abbildung 86: Messunsicherheiten der verschiedenen Stadien des Analyseverfahrens für Chrom	75
Abbildung 87: Die bei der Analyse bestimmten Parameter	76
Abbildung 88: Probenaufbereitungsplan für die Gewinnung der 20 Analyseproben – Probe 1	76
Abbildung 89: Deutliche erkennbare Gruppierung der Messwerte der fünf Teilproben	77
Abbildung 90: Messunsicherheiten der verschiedenen Stadien des Analyseverfahrens für Magnesium	78
Abbildung 91: Messunsicherheiten der verschiedenen Stadien des Analyseverfahrens für Chrom	78