

Bestimmung der Wert- und Schadstoffpotentiale von Abbruchobjekten – Probenahme aus dem Schutt

Stefan Skutan

1.	Methoden	438
1.1.	Idee	438
1.2.	Erhebung der Partikelmassen und Zusammensetzung der Analytträger für Kupfer	440
1.3.	Berechnung der Heterogenitätsschätzung	440
2.	Resultate	441
3.	Schlussfolgerungen	444
4.	Literatur	445

Dieser Beitrag befasst sich mit dem Probenahmeaspekt der Bestimmung von Wert- und Schadstoffen in Abbruchobjekten und Baurestmassen. Die hier verwendete Methode zur Berechnung von Probenmassen ist ein Vorgriff auf die Vorstellung eines allgemeinen Ansatzes zur Quantifizierung von Heterogenitäten aus der sichtbaren Konstitution von Abfallmassen zum Zweck der Probenmassenbestimmung. Der allgemeine Ansatz wird in Kürze veröffentlicht.

Abbruchmaterialien gehören zu den mengenmäßig größten Abfallflüssen. In Österreich beträgt allein die in der Statistik erfasste Menge für mineralische Baurestmassen 3,3 Millionen Tonnen pro Jahr [1]. Dazu kommen noch die nicht mineralischen Abfälle wie Holz (behandelt und unbehandelt), Metallschrott und restmüllähnliche Abfälle, die bei Abbrucharbeiten anfallen. In Zukunft werden auch die massenmäßig geringen aber voluminösen Dämmstoffe zur Entsorgung bzw. Verwertung anstehen. Obwohl in Österreich kein Mangel an mineralischen Primärrohstoffen besteht, ist man zur Einsparung von Deponievolumen bestrebt, die mineralischen Massen zu verwerten. Gleichzeitig wäre es angebracht, die in den mineralischen Massen enthaltenen Metalle, insbesondere Buntmetalle, zu separieren. Die Abtrennung vor und während des Abbruchs ist nicht vollständig, wie jeder Blick auf Baurestmassendeponien und in Aufbereitungsanlagen zeigt. Es ist wahrscheinlich, dass z.B. für Kupfer über die mineralischen Baurestmassen – wie auch über den Restmüll – die größten Verluste an den zwischen Gebrauch und Recycling zirkulierenden Mengen (*anthropogenes Lager*) auftreten [2]. Um abschätzen zu können, mit welchen Probenmassen die Mengen an stückigen Metallen in diesen extrem heterogenen Materialien richtig bestimmt werden können, wurde versucht das Prinzip von Gy's *Heterogeneity Invariant* auf die sichtbaren kupferhaltigen Konstituenten des Schutts anzuwenden. Der Ansatz kann ebenso für stückige Schadstoffträger angewendet werden.

1. Methoden

1.1. Idee

Pierre Gy definiert in seiner Probenahmetheorie die Heterogenität eines Materials, die von der Verschiedenartigkeit unter den einzelnen Teilchen herrührt, als *Constitutional Heterogeneity* CH_L . Eine ausführliche Beschreibung von Gy's Probenahmetheorie [3] und eine anwendungsorientierte Zusammenfassung [4] sind der Literatur zu entnehmen. CH_L wird berechnet als Summe der Heterogenitätsbeiträge jedes einzelnen Teilchens. Ausgangspunkt der Berechnung ist die Differenz zwischen dem Analytgehalt des jeweiligen Teilchens und dem Durchschnittsgehalt in der Grundgesamtheit (*lot*). Diese Differenz wird mit der Teilchenmasse multipliziert:

$$(a_i - a_L) \cdot m_i$$

a_i Analytkonzentration eines einzelnen Teilchens i

a_L durchschnittliche Analytkonzentration der Grundgesamtheit

m_i Masse eines einzelnen Teilchens i

Dieses Produkt stellt eine Analytfracht dar. Es ist jene Analytfracht, die ein Teilchen von der Durchschnittskonzentration abweichen lässt, d.h. jene Fracht die man dem Teilchen zuführen oder entziehen müsste, um die Analytkonzentration des Teilchens der Durchschnittskonzentration der Grundgesamtheit anzupassen. Gy dividiert diesen Ausdruck durch die Durchschnittskonzentration und die durchschnittliche Teilchenmasse, um diese *Frachtabweichungen* dimensionslos darzustellen. CH_L ist der Mittelwert der quadrierten dimensionslosen Frachtabweichungen aller Teilchen:

$$CH_L = \frac{1}{N_u} \cdot \sum_i \left(\frac{a_i - a_L}{a_L} \cdot \frac{m_i}{\bar{m}_i} \right)^2$$

CH_L *Constitutional Heterogeneity* nach Gy

N_u Anzahl der Partikel in der Grundgesamtheit

\bar{m}_i durchschnittliche Teilchenmasse aller Teilchen der Grundgesamtheit

CH_L hat den Charakter einer Varianz (mittlere quadratische Abweichung). Die Berechnung von CH_L ist nur möglich, wenn die Teilchenzahl der Grundgesamtheit bekannt ist. Gy hat, um dieses Manko zu beheben, die Gleichung durch die mittlere Teilchenmasse dividiert und gelangt zur *Heterogeneity Invariant* HI_L .

$$HI_L = \frac{1}{M_L} \cdot \sum_i \left[\frac{a_i - a_L}{a_L} \cdot m_i \right]^2$$

HI_L *Heterogeneity Invariant* nach Gy

M_L Masse der Grundgesamtheit

Bei der HI_L ist die Summe der quadratischen Frachtabweichungen nicht mehr dimensionslos, sondern besitzt wieder die Dimension einer Masse (Analytfracht). Die Quadratsumme der Frachtabweichungen ist nunmehr auf die Masse der Grundgesamtheit und nicht mehr auf die Teilchenzahl bezogen. HI_L kann daher interpretiert werden als die mittlere Varianz der Analytfracht, die in einer Masseneinheit des Materials steckt. Die relative Probenahmevarianz in Abhängigkeit der Probenmasse errechnet sich daraus wie folgt:

$$CSE = \left[\frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right] \cdot HI_L$$

CSE *Correct sampling error*, Fundamentalfehler der Probenahme

M_S Probenmasse

Correct sampling error CSE ist eine in der Probenahmetheorie gebräuchliche Bezeichnung des *Fundamentalfehlers* (fundamental sampling error), der sich bei der Probenahme aus einer Menge zufallsverteilter Partikel ergibt. Die Bezeichnung bringt zum Ausdruck, dass es sich um den unvermeidbaren Fehler (Streuung) bei einer korrekt ausgeführten Probenahme handelt. Wenn die Probenmassen einen nur unbedeutenden Anteil an der Grundgesamtheit ausmachen, kann in der Berechnung des erwarteten Fehlers bzw. der notwendigen Probenmasse die Subtraktion des Kehrwerts der Masse der Grundgesamtheit unterbleiben. Für einen gewünschten durchschnittlichen Variationskoeffizienten (RSD) ergibt sich somit:

$$M_S \cong \frac{HI_L}{(rsd_{\text{sampling}} \cdot 0,01)^2}$$

rsd_{sampling} durchschnittlicher Variationskoeffizient der Analytgehalte der gezogenen Proben

In der Anwendung auf mineralische Rohstoffe (Erze) wird HI_L aus den physischen Eigenschaften des Materials – Korngröße, Kornform, Aufschlussgrad usw. – abgeschätzt. In der Anwendung auf Abfälle schlägt diese Methode meist fehl, weil die analytreichen Konstituenten uneinheitliche, zum Teil extreme Kornformen aufweisen, beispielsweise meterlange Kabelstücke in gebrochenem Bauschutt. Anders als für mineralische Rohstoffe gilt aber für Abfälle, dass Analytträger – oder zumindest *Verdächtige* – in aller Regel visuell identifiziert werden können. Analytträger sind solche Partikel, die gegenüber dem Durchschnitt – oder dem Hintergrundgehalt – überhöhte Gehalte aufweisen, z.B. Kabel als Analytträger für Kupfer oder Bocken mit Teeranstrich als Träger für polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Aufgrund der Möglichkeit im Bauschutt Metallteile zu identifizieren, sie daraus zu separieren und einzeln zu verwiegen, können nach Gy's Definition der HI_L auch die Beiträge zur Heterogenität berechnet werden.

1.2. Erhebung der Partikelmassen und Zusammensetzung der Analyträger für Kupfer

Diese Information wird üblicherweise aus der Analyse von Stichproben gewonnen. In diesem Fall wurde allerdings die gesamte Schuttmenge eines Abbruchs untersucht. Das Abbruchobjekt war ein einstöckiges Wohnhaus mit ausgebauter Mansarde, Baujahr 1870. Im Zuge der Aufbereitung des Schutts wurden die Kabel und sonstige kupferhaltige Teile mit einem Rechen vom Abwurf der mobilen Aufbereitungsanlage weg separiert. Die Kabel wurden gereinigt, vermessen und gewogen. Der Kupfergehalt wurde bestimmt, indem Querschnitt und Länge der einzelnen Adern vermessen wurden bzw. bei Litzendrähten jeweils 10 cm Draht abisoliert und gewogen wurden. Zum Teil wurden Kabel inklusive der Einziehröhre oder Schläuche gefunden. Bei diesen Stücken wurden Masse und Kupfergehalt des jeweiligen gesamten Verbunds bestimmt. Jeder ganze zusammenhängende Verbund ist als ein Partikel anzusehen. Für Teile aus Messing wurde ein Kupfergehalt von 60 % angenommen; das entspricht dem Kupfergehalt der gängigsten Messingwerkstoffe. Bei Kabeln mit aufgeklebten Lüsterklemmen aus Messing wurde die Kupferfracht des Messings in die Kupferfracht des jeweiligen Analyträgerpartikels einbezogen.

1.3. Berechnung der Heterogenitätsschätzung

Die Berechnung wird mit den aus der Sortieranalyse bestimmten Einzelwerten der Stückmassen und Kupfergehalte der Analyträgererteile – hauptsächlich Kabelstücke – durchgeführt. Um zu verdeutlichen, dass es sich beim Ergebnis um einen Schätzer für HI_L handelt, der aus einer Probe ermittelt wird, ist das Symbol mit einem Stern gekennzeichnet und trägt den Index S (sample) statt L (lot):

$$HI^*_s = \frac{1}{M_s} \cdot \sum_i \left[\frac{a_i - a_s}{a_s} \cdot m_i \right]^2$$

Als Schätzer wird diese Größe deshalb bezeichnet, weil bei dieser Art von Berechnung die Heterogenitätsbeiträge der massenmäßigen Hauptkomponenten des Bauschutts – mineralische Partikel – nicht berücksichtigt werden und die Heterogenität damit systematisch unterschätzt wird. Wegen der großen Differenz im Analytgehalt zwischen Metallpartikeln und Mittelwert – z.B. Differenz Kupfergehalt eines Kabels zu Durchschnitt Schutt etwa 500.000 mg/kg – verursachen die Analyträger aber den weitaus größten Teil der Heterogenität (siehe Abschätzung bei den Ergebnissen). Die praktische Berechnung findet im Tabellenkalkulationsprogramm statt. Für jeden Analyträgerpartikel wird eine Zeile angelegt, in der Masse und Kupfergehalt eingetragen und der Heterogenitätsbeitrag berechnet werden. Die Heterogenitätsbeiträge werden über alle Zeilen aufaddiert.

Im gegenständlichen Fall wird die Schuttmenge des Abbruchobjekts als Stichprobe aus der Grundgesamtheit *Schutt von Häusern mit gleicher Nutzung und ähnlichen Baujahrs* betrachtet. Würde der Schutt dieses Hauses als Grundgesamtheit angesehen, aus welcher Proben gezogen werden könnten, so wäre der Index L zu verwenden.

2. Resultate

Bei den Analysen wurden aus insgesamt 1.070 Tonnen Schutt 297 kupferhaltige Teile separiert, davon 291 Kabelstücke. Die Verteilung der Kabellängen ist in Bild 1 dargestellt. Die Gesamtmasse aller Trägerpartikel betrug 17,3 kg. Die Stückmassenverteilung der Trägerpartikel ist in Bild 2 wiedergegeben, die Verteilung der Kupfergehalte je Trägerpartikel in Bild 3. Die Gesamtfracht von Kupfer in den Kupferträgerpartikeln betrug 6,9 kg. Bild 4 zeigt die Verteilung der Frachten auf die Trägerpartikel. Die durchschnittliche Konzentration metallischen Kupfers – Kupfermetall und Kupfer in Legierungen – im Schutt beträgt 6,5 mg/kg. Die Konzentration in den Trägern ist um vier bis fünf Zehnerpotenzen höher. Die in Bild 4 eingetragenen Frachten können daher näherungsweise als die, die Heterogenität verursachenden, absoluten Frachtabweichungen $(a_i - a_s) \cdot m_i$ angesehen werden. In Bild 5 ist die Summenkurve der berechneten relativen HI*-Beiträge dargestellt. In absoluten Zahlen ist die Summe 15.000 kg. Die Darstellung zeigt, dass etwa neunzig Prozent der Heterogenität von zehn Prozent der (größten) Frachträger verursacht wird. In Bild 6 ist der Zusammenhang zwischen Frachtanteil und Heterogenitätsanteil für die einzelnen Teilchen dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass die Hälfte der Fracht, die von den mittleren bis großen Teilchen gebildet wird, etwa neunzig Prozent der Heterogenität verursacht.

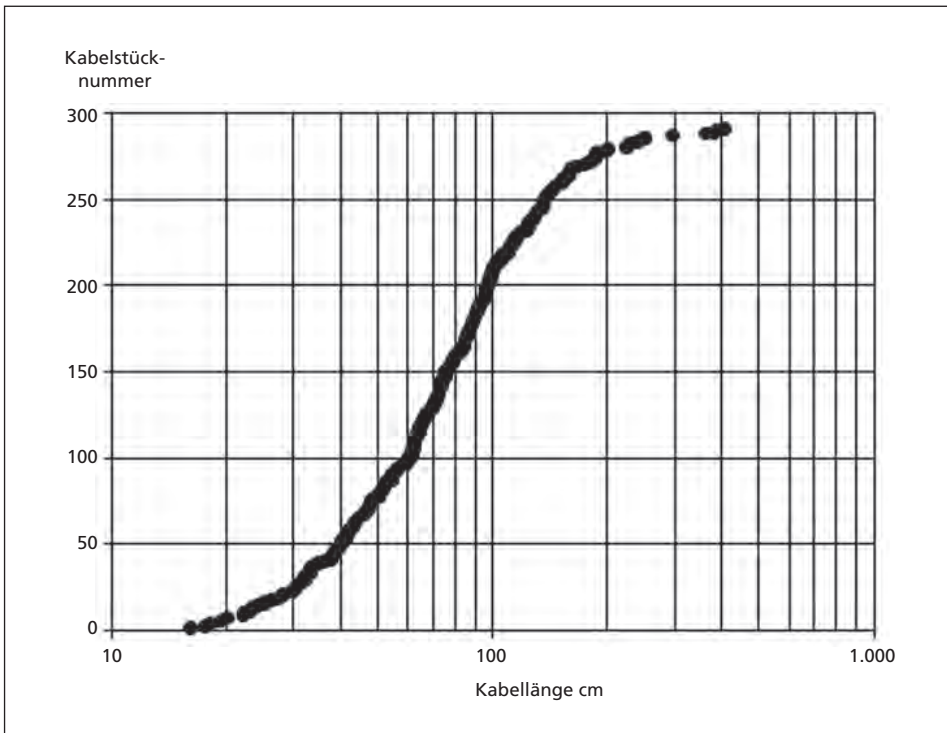


Bild 1: Längenverteilung der aus dem gebrochenen Schutt separierten Kabel

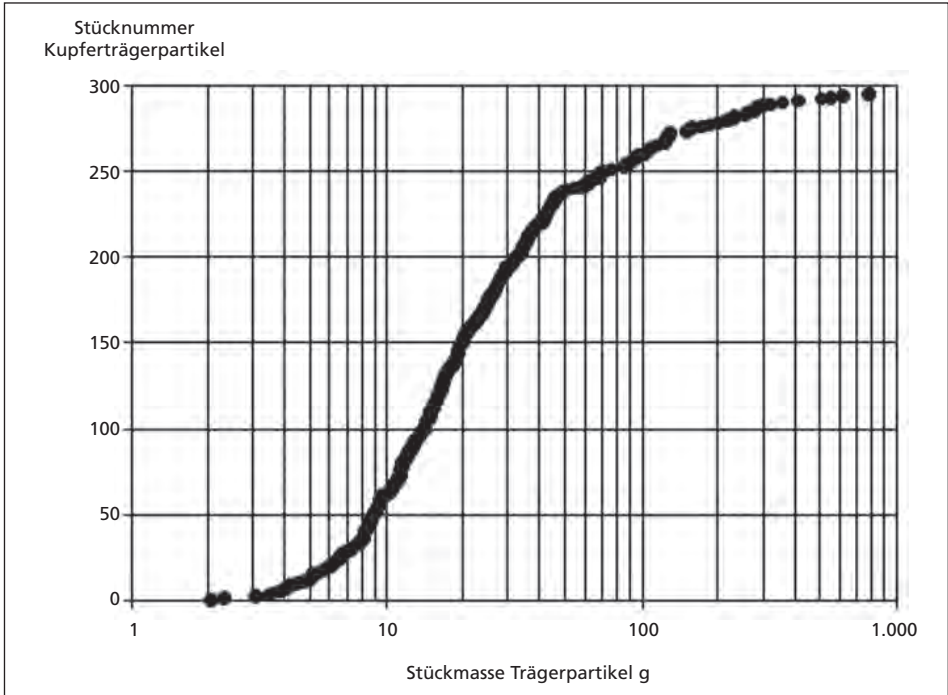


Bild 2: Stückmassenverteilung der Kupferträgerpartikel

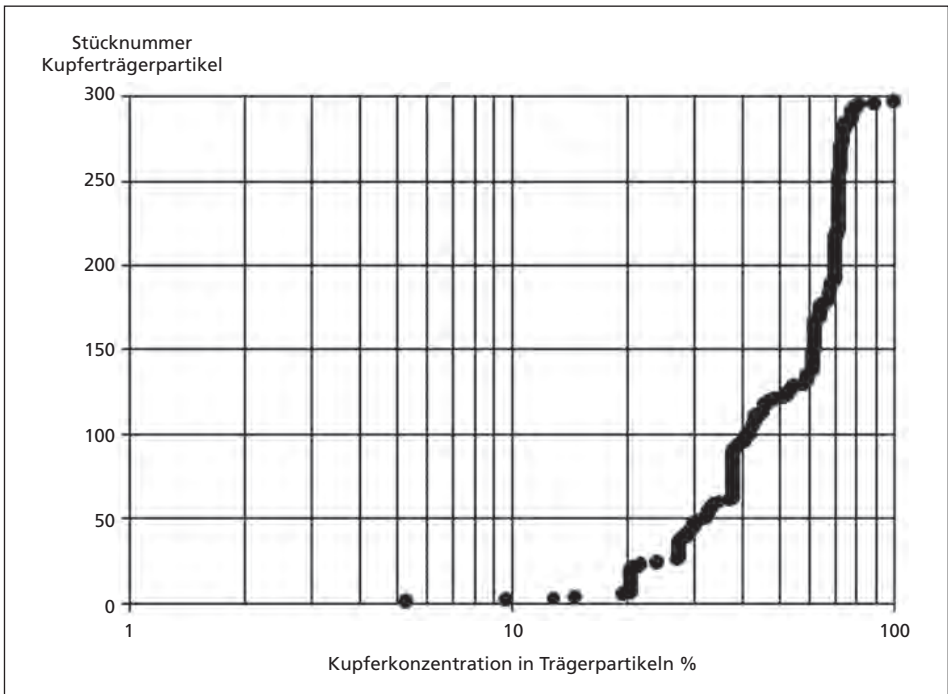


Bild 3: Verteilung der Kupferkonzentrationen in den Kupferträgerpartikeln

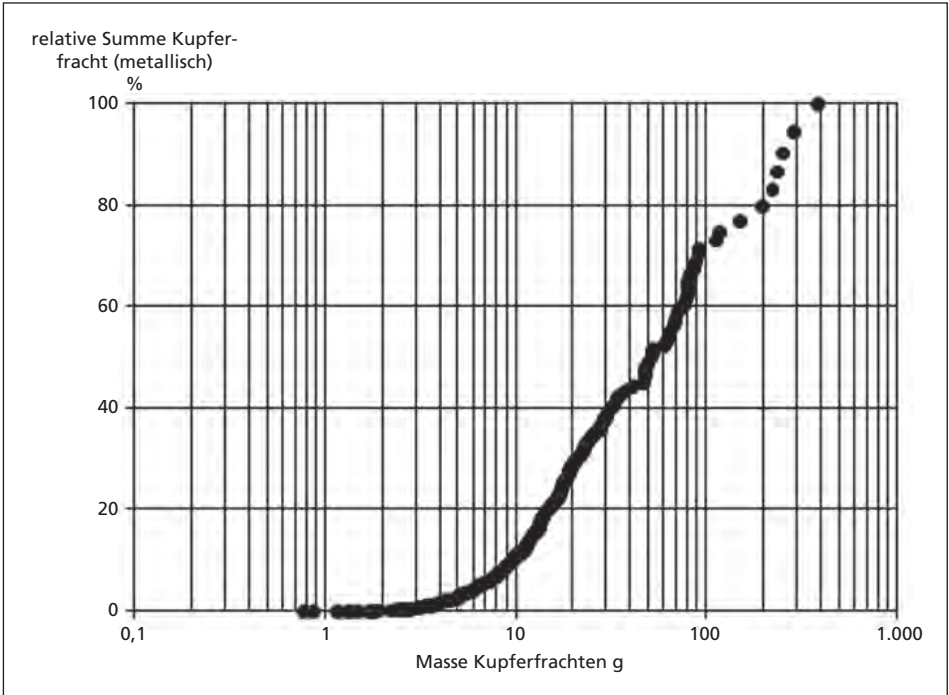


Bild 4: Verteilung der Kupferfrachten auf die Trägerpartikel

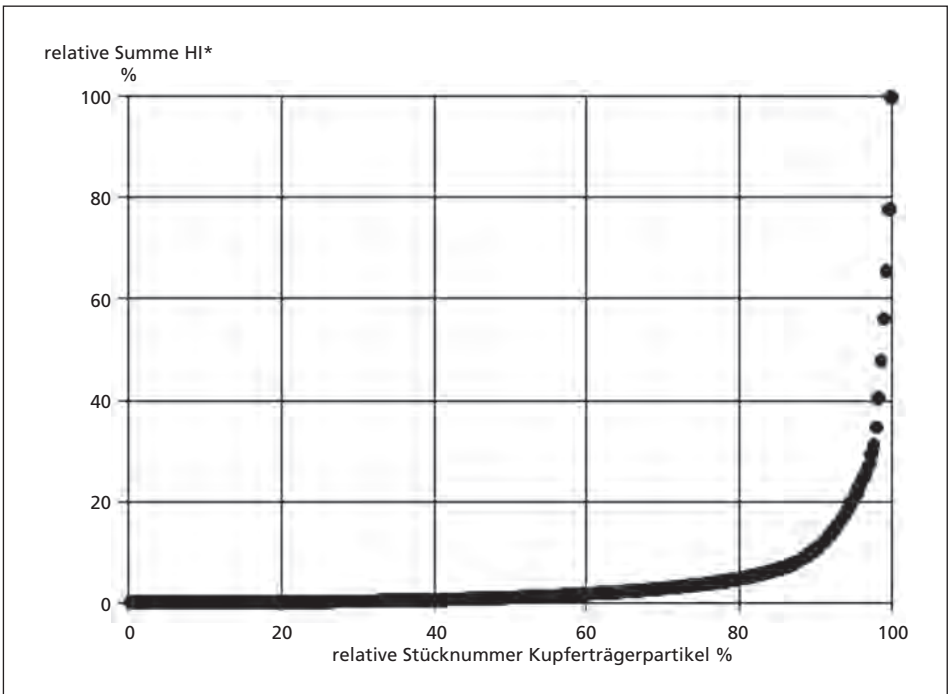


Bild 5: Verteilung der relativen HI*-Beiträge auf die Trägerpartikel

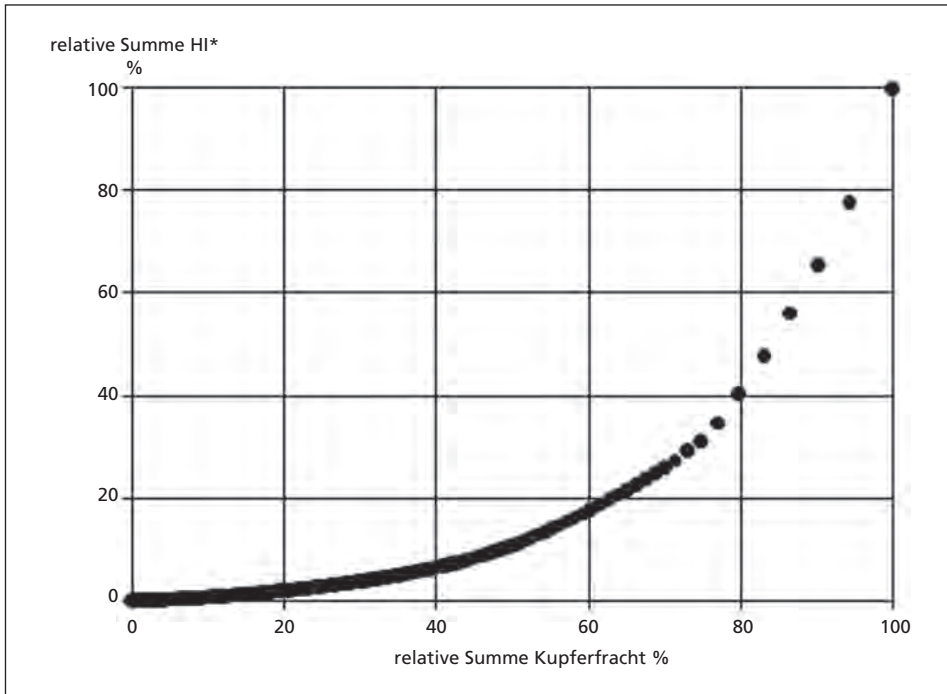


Bild 6: Fracht- versus Heterogenitätsbeiträge der einzelnen Kupferträgerpartikel

Der Einfluss der mineralischen Massen auf die Heterogenität bezüglich des Gehalts an metallischem Kupfer wurde mit einer Sensitivitätsanalyse abgeschätzt. Es wurde dazu angenommen, dass sich die mineralische Masse aus gleichartigen Brocken zusammensetzt. Für die Berechnung wurde die Kupferkonzentration der Brocken gleich Null gesetzt. Selbst bei der Annahme von 100 kg schweren mineralischen Brocken – ohne jeglichen Feinanteil – beträgt der Anteil an der gesamten Heterogenität unter 0,7 %.

3. Schlussfolgerungen

Aus der *sichtbaren Heterogenität* von Bauschutt lassen sich Werte von Gy's Heterogeneity Invariant abschätzen, die einen großen Teil der aus der Konstitution des Schutts resultierenden Heterogenität abdecken. Der für den betrachteten Schutt berechnete Heterogenitätswert bezüglich metallischen Kupfers ist mit 15.000 kg extrem hoch. Selbst die Heterogenität schwierig zu beprobender Erze, z.B. Golderze (HI_L etwa 20 kg [3]), wird noch bei Weitem übertroffen. Der Großteil der Heterogenität kommt dabei von (den wenigen sehr großen) Stücken, die mit einer Abundanz von etwa einem Stück pro hundert Tonnen Schutt auftreten. Die mit der errechneten Heterogenität korrespondierende Probenmasse für eine Bestimmung mit durchschnittlich zehn Prozent Abweichung bewegt sich im Bereich von 1.500 Tonnen. Freilich ist die Menge von 6,9 kg Kupfer niedrig und spiegelt den niedrigen Stand der Haustechnik im Abbruchobjekt wider: keine

Zentralheizung, wenige Wasseranschlüsse, wenige und schwache Stromleitungen. Eine größere Menge – Anzahl an Trägern pro Tonne Schutt – reduzierte die Heterogenität. Doch selbst eine Verdreifachung der Anzahl bei gleicher Stückigkeit würde die Heterogenität nur auf etwa 5.000 kg senken. Eine *Probenahme* an solchen Materialien zum Zweck der Bestimmung von metallischem Kupfer ist daher nicht möglich. Die Bestimmung dieser Werte kann zeit- und kostensparend nur durch maschinelle mechanische Separation, d.h. Güterbilanzierung von Aufbereitungsprozessen, vorgenommen werden.

4. Literatur

- [1] Umweltbundesamt: Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich – Statusbericht 2008. In: Bundesabfallwirtschaftsplan. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2009. verfügbar im www: <http://www.bundesabfallwirtschaftsplan.at/filemanager/download/43020>
- [2] Daxbeck, H.; Stockinger, M.; Brandt, B.: Beitrag der Abfallwirtschaft zum Kupferhaushalt Österreichs. Wien: Ressourcen Management Agentur, 2006
- [3] Gy, P. M.: Sampling of Heterogeneous and Dynamic Material Systems. Amsterdam, London, New York, Tokyo: Elsevier, 1992
- [4] Gy, P. M.: Sampling for Analytical Purposes. Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: John Wiley & Sons, 1998

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Recycling und Rohstoffe – Band 2

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009

ISBN 978-3-935317-40-5

ISBN 978-3-935317-40-5 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky

Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2009

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky und

Dr.-Ing. Stephanie Thiel

Erfassung und Layout: Petra Dittmann, Martina Ringgenberg und Andreas Schulz

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.