

## Waste Mineralogy – Applications of Mineralogical Methods and Concepts for the Assessment of Mineral Secondary Raw Materials

Daniel Vollprecht and Roland Pomberger

Mineralogy has been defined as the science *dealing with naturally occurring elementary building blocks of the Earth that are chemically and structurally homogeneous*, but has recently broadened its scope to synthetic inorganic phases [51] whereas *waste means any substance or object which the holder discards or intends or is required to discard* [16]. Consequently, some connections between *waste* and *mineralogy* are obvious [43], especially with respect to mineral wastes. However, mineral phases do not only occur in mineral wastes, but also in landfills, contaminated sites and waste waters. About 60 to 70 % of the total mass of a landfill body constitute of fine materials [49], which are rich in mineral phases from wastes and landfill liners [18]. Mineral phases can also form within a landfill by precipitation from the leachate [3]. Contaminated soil becomes a waste by excavation, and remediation is often connected to waste management. Waste waters may contain mineral phases in their suspended matter, but mineral phases may especially form during waste water treatment by precipitation.

A scientific discipline is defined not only by its subject, but also by *a set of concepts and analytical expressions* [53]. The main concept of mineralogy is that solids are composed of mineral phases, and that these phases and their characteristic properties influence the behaviour of the solid as a whole. Despite the fact that mineral phases are ubiquitous in wastes, the concept of mineralogy is barely considered in waste management, e.g. to determine the bonding of Hg as sulphide [10]. The analytical methods used in mineralogy deliver information about the phase composition of a material as well as of the grain size and shape, the chemical composition and crystal structure and the resulting properties of the individual mineral phases. Mineralogical methods are applied to a wide range of materials like ceramics, cement and concrete [7]. Often, the products are discarded without further investigation. Although failure analyses [4] are sometimes conducted using mineralogical methods, they are barely used for other wastes. The application of concepts and methods from one discipline to a second one does not lead to the creation of a new discipline. Therefore, waste mineralogy is not a scientific discipline, but an emerging research field.

# Abfallmineralogie – Anwendung mineralogischer Methoden und Konzepte zur Bewertung mineralischer Sekundärrohstoffe

Daniel Vollprecht und Roland Pomberger

1.	Der Zielkonflikt: Schadstoffausschleusung versus Ressourceneffizienz .....	101
2.	Größenskalen von Schadstoffen: Partikel, Phase, Element .....	102
3.	Was ist Abfallmineralogie?.....	104
4.	Vom Vorsorgeprinzip zur mineralogischen Bewertung von Sekundärrohstoffen ....	107
5.	Ausblick.....	109
6.	Quellen.....	109

## 1. Der Zielkonflikt: Schadstoffausschleusung versus Ressourceneffizienz

In den vergangenen Jahren haben die Begriffe *Kreislaufwirtschaft* und *Ressourcenwirtschaft* teilweise den Begriff *Abfallwirtschaft* abgelöst [26, 12]. Die Umbenennung verdeutlicht einen Paradigmenwechsel von einer schadstoff- zu einer rohstofforientierten Sichtweise. Diese beiden Sichtweisen sind eng mit einem Zielkonflikt verbunden, einerseits *die Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern* und andererseits *den Schutz von Mensch und Umwelt [...] sicherzustellen*.

Glas und Metall wurden bereits von den Römern recycelt [15]. Die Umweltauswirkungen des Recyclings dieser Materialien sind im Vergleich zur Gewinnung aus Primärrohstoffen geringer, da die negativen Auswirkungen des Bergbaus entfallen, die Herstellung analog verläuft und die umweltrelevanten Produkteigenschaften praktisch konstant sind. Gesundheits- und umweltschädliche Bestandteile von Produkten, wie z.B. Blei, traten bereits im Römischen Reich verbreitet auf [33], allerdings gibt es keine Hinweise darauf, dass Recyclingprozesse hier im Unterschied zur Primärroute negativere Auswirkungen auf die Gesundheit gehabt hätten.

Der Konflikt zwischen beiden Zielen der Kreislaufwirtschaft (Bild 1) entstand erst in dem Moment, indem schadstoffhaltige Abfälle in einer Art recycelt wurden, bei der sie in einer anderen Form mit der Umwelt interagieren, als dies bei einer etwaigen vorigen Nutzung der Fall war – sofern es überhaupt eine vorige Nutzung ab, meistens handelt es sich um Reststoffe. So gipfelte der Einsatz schwermetallbelasteter Klärschlämme in der Landwirtschaft in der Aussage *Kreislaufwirtschaft contra Bodenschutz* [25].

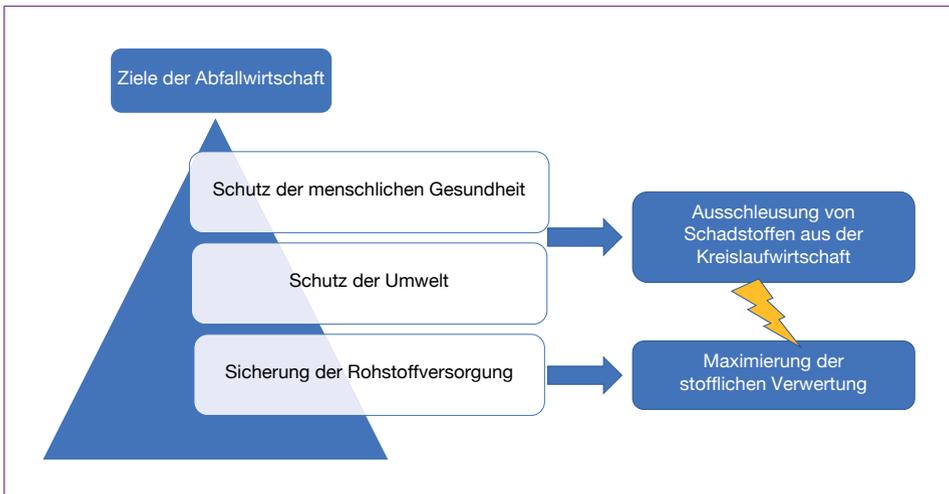


Bild 1: Zielkonflikt zwischen Schadstoffausschleusung und Ressourceneffizienz

Daher müssen Deponien als *letzte Senke* weiterhin eine zentrale Rolle in der Abfallwirtschaft haben [29]. Aus geochemischer Sicht erscheint es wahrscheinlich, dass jedes Material jedes chemische Element enthält, nur in unterschiedlicher Konzentration. Für eine vollständige Vermeidung der Schadstofffreisetzung müssten nicht nur sämtliche Abfälle deponiert werden, was den bereits problematisch hohen Rohstoffverbrauch weiter beschleunigen würde [32], sondern auch die Verwendung von Primärrohstoffen müsste kritisch reflektiert werden, da diese ebenfalls Schadstoffe enthalten [42].

Auf dieser Grundlage sind entsprechende Grenzwerte für das Recycling [9] verankert worden, um einen Kompromiss zwischen Kreislaufwirtschaft und Umweltschutz zu finden. Auch aufgrund dieser Grenzwerte werden in Österreich jährlich 1,2 Mio. Tonnen Baurestmassen, 25 Mio. Tonnen Bodenaushub, 800.000 Tonnen Aschen aus der Abfall- und Biomasseverbrennung und 90.000 Tonnen metallurgische Schlacken deponiert [11]. Dieser Ressourcenverschwendung stehen die negativen Auswirkungen gegenüber, die ein Recycling, aber auch eine nicht sachgerechte Deponierung mineralischer Abfälle haben kann [36]. Die Art der Grenzwerte (Feststoff versus Eluat) und ihre jeweilige Höhe sind Gegenstand öffentlicher Debatten insb. zwischen den Erzeugern von Primär- und Sekundärrohstoffen [24].

## 2. Größenskalen von Schadstoffen: Partikel, Phase, Element

Bestandteile von Abfällen, Altlasten und Abwässern, die als Umweltschadstoffe wirken können, können entweder einzelne chemische Elemente und ihre gelösten oder gasförmigen Spezies sein (z.B. Cr(VI) im Grundwasser [39]), Mineralphasen (z.B. Krokoid,  $\text{CaCrO}_4$ , in Rostaschen aus der Abfallverbrennung [35]) oder ganze Partikel, z.B. Kunststoffpartikel in Kultursubstraten [50], sein, d.h. der Schadstoffbegriff in der Abfallwirtschaft bezieht sich auf verschiedene Größenskalen (Bild 2).

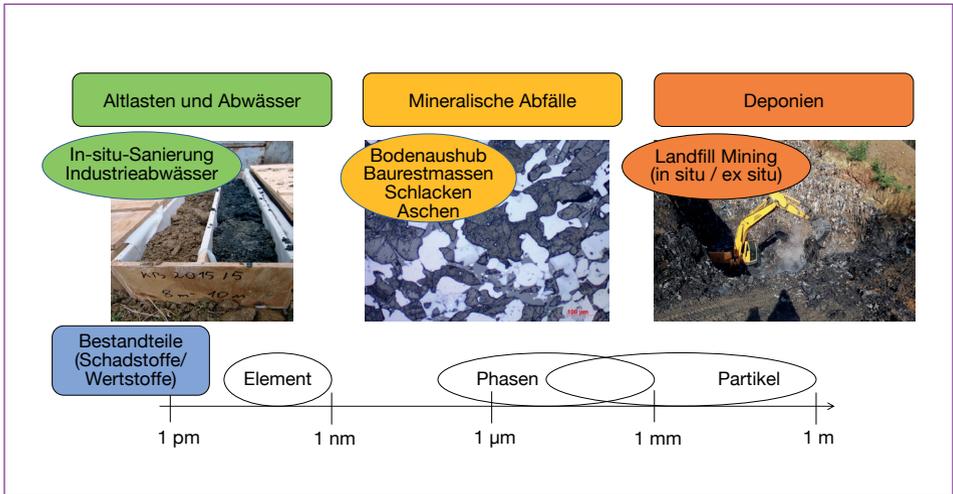


Bild 2: Größenskalen von Schadstoffen bei der Sanierung von Altlasten, der Behandlung von Abwässern und mineralischen Abfällen sowie der Rückgewinnung von Rohstoffen aus Deponien

Die mechanische Abfallbehandlung (=Abfallaufbereitung) [26] ermöglicht die Entfernung von Schadstoffen, die als ganze Partikel vorhanden sind. Wenn jedoch der Schadstoff ein chemisches Element ist, dann kann sie nur Partikel abtrennen, die einen erhöhten Gehalt an diesem Element enthalten, z.B. Glas aus gemischten Abfällen, da dieses höhere Arsen-Konzentrationen enthält [46]. Dies bedeutet, dass die gesamte Fraktion eines recyclingfähigen Materials deponiert werden müsste, wenn sich auch nur geringe Schadstoffgehalte in ihr befinden. Für eine ausschließliche Entfernung der Schadstoffe, d.h. auf der Elementebene, können Waschprozesse eingesetzt werden, sofern diese nur an die Oberflächen der Partikel adsorbiert sind, z.B. für die Entfernung von Chlorid aus Müllverbrennungsrostaaschen [52]. Für Schadstoffe, die als Mineralphasen auftreten, können nach vorigem Aufschluss [44] Verfahren angewandt werden, die aus der Mineralaufbereitung bekannt sind (z.B. die Abtrennung von Kupfer aus Schlacken [8] und Aschen [6] mittels Flotation). Obwohl nassmechanische Prozesse in der Abfallwirtschaft bereits angewandt werden, wird eine Trennung auf der Phasenebene kaum eingesetzt. Die Gründe dafür sind zum einen, dass die für den mechanischen Aufschluss erforderliche Energie mit abnehmender Partikelgröße zunimmt [37, 23, 5], während der Wert mineralischer Abfälle sinkt, und zum anderen, dass der Wert mineralischer Nichterze-Rohstoffe meist geringer ist als der von Erzen, so dass die hohen Kosten nicht gerechtfertigt sind.

Chemische Verfahren wie die (selektive) Lösung und Fällung [20] oder thermochemische Behandlung [47] werden in der Abfallwirtschaft außerhalb der Abwasserbehandlung [28] selten genutzt, da sie teuer sind. Sie erlauben aber dafür die Mobilisierung und Fixierung von Schadstoffen auf der Ebene einzelner chemischer Elemente sowie in spezifischen Mineralphasen. So kann z.B. die Laugung von Flugaschen aus der Abfallverbrennung mittels Salzsäure Metalle gezielt mobilisieren, so dass sie später wieder mittels Adsorption abgetrennt werden können [41].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Phasenebene bei der Schadstoffbetrachtung sowohl für die mechanische Abfallbehandlung von Bedeutung ist, da die zugrundeliegenden Trennmerkmale teilweise charakteristische Eigenschaften der Mineralphase sind, als auch für die chemische Abfallbehandlung eine Rolle spielen, da die Löslichkeit von Mineralphasen hier eine wesentliche Rolle spielt.

### 3. Was ist Abfallmineralogie?

Mineralogie ist die Wissenschaft, die sich mit den natürlich vorkommenden Bausteinen der Erde, die chemisch und strukturell homogen sind, beschäftigt, ihren Forschungsgegenstand aber auf synthetische anorganische Phasen ausgeweitet hat [51], wohingegen Abfall *jeden Stoff oder Gegenstand, dessen sich sein Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss*, bezeichnet [16].

Einige Verbindungen zwischen *Abfall* und *Mineralogie* sind offensichtlich [43]. Dabei treten Mineralphasen nicht nur in mineralischen Abfällen, sondern auch in Deponien, Altlasten und Abwässern auf. Ungefähr 60 bis 70 % der Gesamtmasse einer Deponie bestehen aus Feinfraktionen [49], die reich an Mineralphasen unterschiedlicher Herkunft sind [18]. Mineralphasen können sich auch innerhalb eines Deponiekörpers durch Fällungsreaktionen bilden [3]. Altlasten und Abwässer sind keine Abfälle. Allerdings wird kontaminierter Boden durch den Aushub zu Abfall und die Sanierung von Altlasten ist oft mit abfallwirtschaftlichen Fragestellungen verbunden. Mineralphasen können bereits in der Suspensionsfracht von Abwässern enthalten sein, bilden sich aber auch bei der Behandlung durch Fällungsreaktionen.

Daraus ergibt sich die Frage, ob die *Abfallmineralogie* eine eigenständige wissenschaftliche Disziplin ist, die nicht nur durch ihren spezifischen Forschungsgegenstand, sondern auch durch ein spezifisches Set an Konzepten und Methoden definiert wird [53]. Das wissenschaftliche Konzept der Mineralogie besagt, dass Festkörper aus Mineralphasen zusammengesetzt sind, und dass diese Phasen und ihre charakteristischen Eigenschaften das Verhalten des Festkörpers als Ganzem beeinflussen.

Trotz des Fakts, dass Mineralphasen in Abfällen allgegenwärtig sind, wird das Konzept der Mineralogie in der Abfallwirtschaft kaum beachtet. Es gibt nur sehr wenige Fälle, in denen mineralogische Daten in der Abfallwirtschaft benötigt werden, z.B. für den Nachweis der sulfidischen Bindungsform von Quecksilber [10]. Die analytischen Methoden, die in der Mineralogie verwendet werden, liefern Informationen über den Phasenbestand des Materials [2] sowie über die Korngröße und -form, die chemische Zusammensetzung und Kristallstruktur sowie die daraus resultierenden Eigenschaften individueller Mineralphasen. Mineralogische Methoden werden für eine große Bandbreite an Materialien wie Keramiken, Zement und Beton [7] eingesetzt. Am Ende ihres Lebenszyklus werden solche Produkte oft ohne weitere Untersuchung entsorgt. Obwohl im Rahmen von Schadensanalysen mineralogische Methoden eingesetzt werden [4], ist deren Anwendung in der Abfallwirtschaft noch die Ausnahme.



# Test- und Entwicklungszentrum auf dem neusten Stand der Technik: Bewertung und Optimierung Ihres Sortierprozesses.

Stellen Sie sicher, dass Ihre Anlage die gewünschten Ergebnisse liefert: führen Sie selbst Tests an den einzelnen Maschinen durch, oder simulieren Sie Ihren gesamten geplanten Sortierprozess mit Hilfe von Bypass-Konstruktionen im STADLER Testzentrum.

Im Hinblick auf Nachhaltigkeit und die zukunftsorientierte Technik ist das STADLER Test- und Entwicklungszentrum eine perfekte Möglichkeit für Innovationen der Forschungsprojekte, die zu einer sauberen Welt beitragen.

Möchten Sie Ihren Sortierprozess optimieren?  
**Dann kontaktieren sie uns!**

**STADLER Anlagenbau GmbH**

+49 7584 9226-0  
info@w-stadler.de  
www.w-stadler.de

**STADLER®**  
Technik von ihrer besten Seite

# Aschen • Schlacken • Stäube Mineralische Nebenprodukte und Abfälle

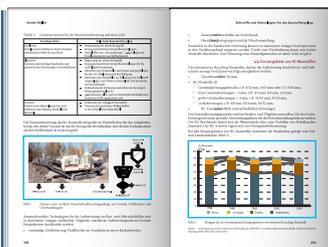


2013: <b>Aschen • Schlacken • Stäube</b> – aus Abfallverbrennung und Metallurgie –	ISBN: 978-3-935317-99-3	<b>25,00 EUR</b>
2014: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-11-4	<b>25,00 EUR</b>
2015: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-21-3	<b>25,00 EUR</b>
2016: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-28-2	<b>35,00 EUR</b>
2017: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 4</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-35-0	<b>35,00 EUR</b>
2018: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-41-1	<b>50,00 EUR</b>
2019: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 6</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-47-3	<b>50,00 EUR</b>
2020: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 7</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-53-4	<b>60,00 EUR</b>
2021: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 8</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-54-1	<b>75,00 EUR</b>
2022: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 9</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-58-9	<b>75,00 EUR</b>

Bestellen Sie direkt beim TK Verlag  
oder unter [books.vivis.de](http://books.vivis.de)

## Paketpreis

**225,00 EUR**  
statt 310,00 EUR



Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51  
16816 Nietwerder-Neuruppin  
Tel. +49 3391-45 45-0  
E-Mail: [order@vivis.de](mailto:order@vivis.de)

**TK Verlag**

Für die Frage, ob die *Abfallmineralogie* eine wissenschaftliche Disziplin darstellt, ist festzuhalten, dass die Anwendung von Konzepten und Methoden aus einer Disziplin auf eine andere noch nicht zur Entstehung einer neuen Disziplin führt. Daher ist Abfallmineralogie keine wissenschaftliche Disziplin, sondern eher ein *Forschungsfeld*. Im Unterschied zur Abfallmineralogie haben sich in der Abfallwirtschaft in den letzten Jahren eigenständige Methoden wie z.B. die Stoffflussanalyse [1] oder die Lebenszyklusanalyse [13] herausgebildet, die diese Einstufung eher rechtfertigen. Die wissenschaftliche Einordnung der Abfallmineralogie zeigt Bild 3.

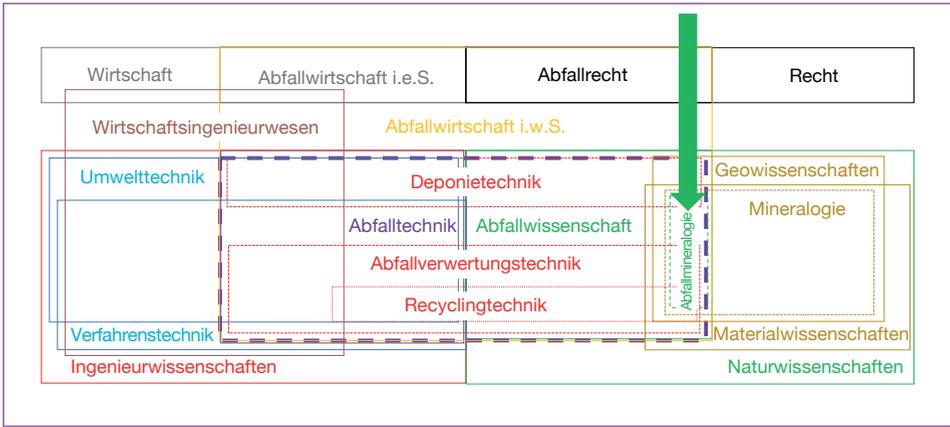


Bild 3: Wissenschaftliche Einordnung der Abfallmineralogie

#### 4. Vom Vorsorgeprinzip zur mineralogischen Bewertung von Sekundärrohstoffen

Die Abfallwirtschaft wird durch den Konflikt zwischen Ressourceneffizienz und Schadstoffausschleusung gekennzeichnet. Das Vorsorgeprinzip besagt nun, dass für komplexe Systeme vorsorgliche Maßnahmen getroffen werden sollen [27, 45]. Dies bedeutet, dass bei Zweifeln, ob das Recycling eines Abfalls schaden könnte, der Deponierung der Vorzug zu geben ist, was einen enormen Ressourcenverlust darstellt. Diese Ressourcen müssen stattdessen im Bergbau gewonnen werden, was mit negativen Auswirkungen auf die Umwelt wie z.B. Staub [38], Grundwasserbelastung [14] und Verlust der Biodiversität [22] verbunden ist.

Das Vorsorgeprinzip ist aber zu überprüfen, wenn neue wissenschaftliche Daten vorliegen [17]. Die Mineralogie liefert diese Daten, die es erlauben, Abfälle zu recyceln, die andernfalls deponiert werden müssten. Aktuell haben mehrere europäische Staaten Grenzwerte für Gesamtgehalte an Schadstoffen festgelegt, um das Recycling von Abfällen zu regulieren [9]. Die Verwendung von Konzepten und Methoden der Mineralogie in der Abfallwirtschaft kann die mineralogische Bindungsform dieser Schadstoffe aufklären und ihre Freisetzung vorhersagen.

Das Konzept, das es erlaubt, dieses Verhalten vorherzusagen, ist das eines lokalen Gleichgewichts, bei dem die Auslaugung von Schadstoffen durch die Löslichkeit und/oder Adsorptionskapazität spezifischer Mineralphasen kontrolliert wird (Bild 4). Dies bedeutet, dass die gelöste Konzentration im Wasser, das mit dem Abfall wechselwirkt, niemals die Gleichgewichtskonzentration mit den koexistierenden Phasen und den adsorbierten Spezies überschreiten kann.

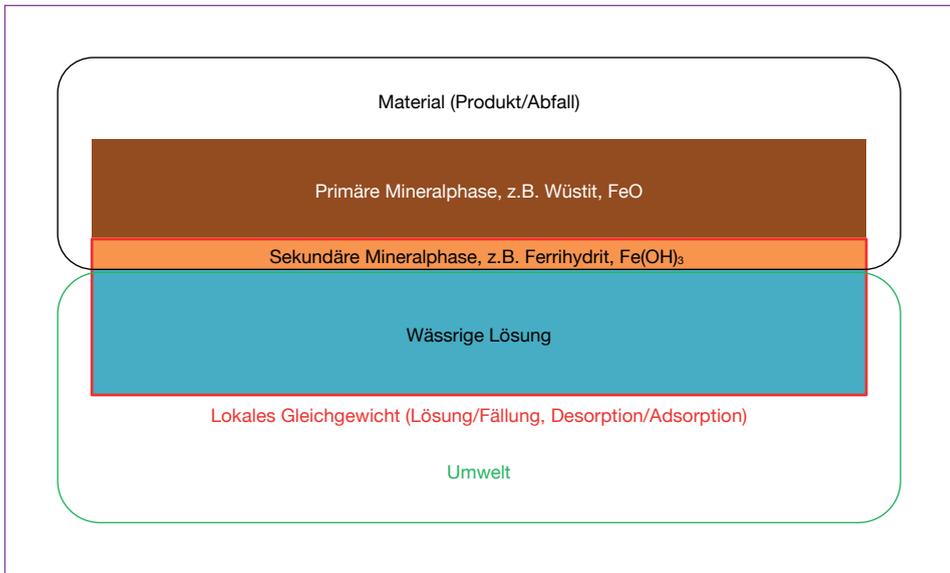


Bild 4: Konzept des lokalen Gleichgewichts zwischen Abfall und wässrigen Lösungen

Modifiziert nach: Höllen, D.; Neuhold, S.; Mudersbach, D.; Schüler, S.; Sommerauer, H.; Griessacher, T.; Dijkstra, J.; van Zomeren, A.; Presoly, P.; Schenk, J.; Pomberger, R.: Möglichkeiten und Grenzen von Modellen zur Vorhersage der Auslaugbarkeit von Stahlschlacken. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 4, S. 205 – 222, 2017.

Erste Arbeiten in diese Richtung [40, 34, 30] zeigen, dass die Auslaugung von Schadstoffen aus rezyklierten mineralischen Abfällen im Straßenbau gering ist, und legen nahe, dass viel mehr mineralische Abfälle recycelt werden könnten als heute, wenn mineralogische Methoden und Konzepte für deren Umweltbewertung angewandt würden. Dies wird durch die Beobachtung unterstützt, dass Umweltverschmutzungen durch das legale Recycling mineralischer Abfälle sehr selten sind, während die Umweltauswirkungen des Bergbaus [19] und der Deponierung [31], die das Alternativszenario darstellen, offensichtlich sind.

Durch die Anwendung mineralogischer Konzepte und Methoden kann die Abfallgesetzgebung auf Grenzwerte für Feststoffgehalte von Schadstoffen verzichten, sich auf die Eluatkonzentrationen und mineralogische Analysen beschränken und damit eine höhere Recyclingquote mineralischer Abfälle ermöglichen.

Eine Zusammenfassung der Anwendung mineralogischer Methoden in der Abfallwirtschaft liefert Tabelle 1:

Tabelle 1: Mineralogische Methoden und ihre Anwendung in der Abfallwirtschaft

Mineralogische Methode	Ergebnis	Abfallwirtschaftliche Anwendung
Röntgendiffraktometrie	Phasenbestand	Entwicklung von Aufbereitungsschemata aufgrund der mineralspezifischen Trennmerkmale
Polarisationsmikroskopie	Gefüge, Phasenbestand	Ableitung des erforderlichen Zerkleinerungsgrades aufgrund der Größe der einzelnen Phasen
Elektronenstrahl-mikrosonde	Chemische Zusammensetzung einzelner Mineralphasen	Mineralogische Bindungsform von Wert- und Schadstoffen
Röntgennahkanten-absorptionsspektroskopie	Wertigkeit von Cr, As und V	Bewertung der Mobilität und Toxizität potentieller Schadstoffe
Sekundärionenmassen-spektroskopie	Elementverteilung von Ultrapurelementen	Mineralogische Bindungsform von Wert- und Schadstoffen

## 5. Ausblick

Die Bedeutung der Abfallmineralogie ist in den letzten Jahren zunehmend erkannt worden [43]. Eine wesentliche Aussage hierbei ist der Zusammenhang zwischen den Hochtemperaturprozessen der Abfallverbrennung und der Metallurgie, in denen der Phasenbestand mineralischer Nebenprodukte und Abfälle entsteht, und den Wechselwirkungen dieser Materialien mit wässrigen Lösungen bei Umgebungstemperatur. Während mineralische Primärrohstoffe über geologische Zeiträume hinweg entstanden sind und ihre Umweltauswirkungen nicht mehr beeinflusst werden können, werden mineralische Sekundärrohstoffe Tag für Tag neu produziert. Dies eröffnet die Chance, diese Materialien im Sinne eines *Ökodesign mineralischer Nebenprodukte und Abfälle* bereits in ihrem Entstehungsprozess gezielt zu konditionieren, Schadstoffe nachhaltig zu immobilisieren und somit den Zielkonflikt zwischen Ressourceneffizienz und Schadstoffausschleusung aufzulösen [48].

## 6. Quellen

- [1] Allesch, A.; Brunner, P.: Material Flow Analysis as a Decision Support Tool for Waste Management: A Literature Review. In: Journal of Industrial Ecology 19 (5), S. 753 – 764, 2015.
- [2] Allmann, R.: Röntgen-Pulverdiffraktometrie. Berlin, Heidelberg, Springer, 2003.
- [3] Baun, D.; Christensen, T.: Speciation of Heavy Metals in Landfill Leachate: A Review. In Waste Management & Research 22 (1), S. 3 – 23, 2004.
- [4] Bennett, J.; Kwong, K.-S.: Failure Mechanisms in High Chrome Oxide Gasifier Refractories. In: Metallurgical and Materials Transactions A 42 (4), S. 888 – 904, 2011.
- [5] Bond, F.: Third Theory of Comminution. In Mining Engineering 4, S. 484. 1952.
- [6] Breitenstein, B.; Elwert, T.; Goldmann, D.; Haas, A.; Schirmer, T.; Vogt, V.: Froth Flotation of Copper and Copper Compounds from Fine Fractions of Waste Incineration Bottom Ashes. In Chemie Ingenieur Technik 89 (1 – 2), S. 97 – 107, 2017.
- [7] Broekmans, M.; Pöllmann, H.: Applied Mineralogy of Cement & Concrete: De Gruyter. 2018.
- [8] Bulut, G.; Perek, K.; Gül, A.; Arslan, F.; Önal, G.: Recovery of Metal Values from Copper Slags by Flotation and Roasting with Pyrite. In Mining, Metallurgy & Exploration 24 (1), S. 13 – 18. 2007.
- [9] BMLFUW (2015): Recycling-Baustoffverordnung.

- [10] BMLFUW: Deponieverordnung 2008.
- [11] BMNT: Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2019.
- [12] Bundesrepublik Deutschland: Kreislaufwirtschaftsgesetz, 2012.
- [13] Cherubini, F.; Bargigli, S.; Ulgiati, S.: Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. In: *Energy* 34 (12), S. 2116 – 2123, 2009.
- [14] Darwish, T.; Khater, C.; Jomaa, I.; Stehouwer, R.; Shaban, A.; Hamzé, M.: Environmental Impact of Quarries on Natural Resources in Lebanon. In *Land Degradation & Development* 22 (3), S. 345 – 358, 2011.
- [15] Duckworth, C.; Wilson, A.: *Recycling and Reuse in the Roman Economy*. Oxford University Press, 2020. 496
- [16] Europäisches Parlament und Rat: Richtlinie 2008/98/EC.
- [17] Europäische Kommission: Communication on the Precautionary Principle. COM/2000/0001. 2000.
- [18] Fluet Jr, J.; Badu-Tweneboah, K.; Khatamil, A.: A Review of Geosynthetic Liner System Technology. In *Waste Management & Research* 10 (1), S. 47 – 65. 1992.
- [19] Fugiel, A.; Burchart-Korol, D.; Czaplicka-Kolarz, K.; Smoliński, A.: Environmental Impact and Damage Categories Caused by Air Pollution Emissions from Mining and Quarrying Sectors of European Countries. In *Journal of Cleaner Production* 143, S. 159 – 168. 2017.
- [20] Höllen, D.; Berneder, I.; Capo Tous, F.; Stöllner, M.; Sedlazeck, K.P.; Schwarz, T.; Aldrian, A.; Lehner, M.: Stepwise Treatment of Ashes and Slags by Dissolution, Precipitation of Iron Phases and Carbonate Precipitation for Production of Raw Materials for Industrial Applications. In *Waste Management* 78, S. 750 – 762, 2018.
- [21] Höllen, D.; Neuhold, S.; Mudersbach, D.; Schüler, S.; Sommerauer, H.; Griessacher, T.; Dijkstra, J.; van Zomeren, A.; Presoly, P.; Schenk, J.; Pomberger, R.: Möglichkeiten und Grenzen von Modellen zur Vorhersage der Auslaugbarkeit von Stahlwerksschlacken. In *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle* 4, S. 205 – 222, 2017.
- [22] Khater, C.; Martin, A. (2007): Application of Restoration Ecology Principles to the Practice of Limestone Quarry Rehabilitation in Lebanon. In *Lebanese Science Journal* 8 (1), S. 19 – 29. 2007.
- [23] Kick, F.: *Das Gesetz der proportionalen Widerstände und seine Anwendungen*. 1885. Arthur Felix, Leipzig.
- [24] Kleedorfer, R.: Schotter-Lobby macht im Schlacke-Streit gegen voestalpine mobil. In: <https://kurier.at/wirtschaft/schotter-lobby-macht-im-schlacke-streit-gegen-voestalpine-mobil/51.674.526> [Zugriff am 03.09.2020].
- [25] Kloke, A.: Kreislaufwirtschaft contra Bodenschutz. In *Bodenschutz* (2), S. 47 – 52. 1999.
- [26] Kranert, M.: *Einführung in die Kreislaufwirtschaft*. Wiesbaden, Springer Vieweg, 2017.
- [27] Kriebel, D.; Tickner, J.; Epstein, P.; Lemons, J.; Levins, R.; Loechler, E.; Quinn, M.; Rudel, R.; Schettler, T.; Stoto, M.: The Precautionary Principle in Environmental Science. In *Environmental Health Perspectives* 109 (9), S. 871 – 876. 2011.
- [28] Kurniawan, T.; Chan, G.; Lo, W.-H.; Babel, S.: Physico-chemical Treatment Techniques for Wastewater Laden with Heavy Metals. In *Chemical Engineering Journal* 118 (1), S. 83 – 98, 2006.
- [29] Laner, D.: *Understanding and Evaluating Long-term Environmental Risks from Landfills*. Dissertation. TU Wien, 2011, in: <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/nachhaltigkeit/pdf/laner.pdf> [Zugriff am 16.04.2023].
- [30] Lidelöw, S.; Mácsik, J.; Carabante, I.; Kumpieni, J.: Leaching Behaviour of Copper slag, Construction and Demolition Waste and Crushed Rock Used in a Full-scale Road Construction. In *Journal of Environmental Management* 204 (1), S. 695 – 703, 2017.
- [31] Marzouk, M.; Azab, S. (2014): Environmental and Economic Impact Assessment of Construction and Demolition Waste Disposal Using System Dynamics. In *Resources, Conservation and Recycling* 82, S. 41 – 49, 2014.
- [32] Meadows, D.H.; Meadows, D. L.; Randers, J.; Behrens, W.: *The Limits to Growth*: Potomac Associates, 1972.
- [33] Moore, J.; Filipek, K.; Kalenderian, V.; Gowland, R.; Hamilton, E.; Evans, J.; Montgomery, J.: Death metal: Evidence for the impact of lead poisoning on childhood health within the Roman Empire. In: *International Journal of Osteoarchaeology*. 31 (5), S. 846 – 856. 2021.

- [34] Nicolae, M.; Vilciu, I.; Zaman, F.: X-ray Diffraction Analysis of Steel Slag and Blast Furnace Slag Viewing their Use for Road Construction. In *Scientific Bulletin - University Politehnica of Bucharest, Series B* 69 (2), S. 99 – 108. 2007.
- [35] Piantone, P.; Bodéan, F.; Chatelet-Snidaro, L.: Mineralogical Study of Secondary Mineral Phases from Weathered MSWI Bottom Ash: Implications for the Modelling and Trapping of Heavy Metals. In *Applied Geochemistry* 19 (12), S. 1891 – 1904, 2004.
- [36] Piatak, N.; Parsons, M.; Seal, R.: Characteristics and Environmental Aspects of Slag: A Review. In *Applied Geochemistry* 57, S. 236 – 266. 2015.
- [37] Rittinger, P. (1867): *Lehrbuch der Aufbereitungskunde in ihrer neuesten Entwicklung und Ausbildung systematisch dargestellt*. Berlin: Ernst & Korn.
- [38] Sairanen, M.; Rinne, M.; Selonen, O.: A Review of Dust Emission Dispersions in Rock Aggregate and Natural Stone Quarries. In *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 32 (3), S. 196 – 220, 2018.
- [39] Sedlazeck, K. P.; Vollprecht, D.; Müller, P.; Mischitz, R.; Gieré, R.: Impact of an In-situ Cr(VI)-contaminated Site Remediation on the Groundwater. In *Environmental Science and Pollution Research* 27, S. 14465 – 14475. 2020.
- [40] Suer, P.; Lindqvist, J. E.; Arm, M.; Frogner-Kockum, P.: Reproducing Ten Years of Road Ageing—Accelerated Carbonation and Leaching of EAF Steel Slag. In *Science of the Total Environment* 407 (18), S. 5110 – 5118. 2009.
- [41] Tang, J.; Su, M.; Wu, Q.; Wei, L.; Wang, N.; Xiao, E.; Zhang, H.; Wie, Y.; Liu, Y.; Ekberg, C.; Steenari, B.-M.; Xiao, T.: Highly Efficient Recovery and Clean-up of Four Heavy Metals from MSWI Fly Ash by Integrating Leaching, Selective Extraction and Adsorption. In *Journal of Cleaner Production* 234, S. 139 – 149, 2019.
- [42] Tossavainen, M.; Forsberg, E.: The Potential Leachability from Natural Road Construction Materials. In *Science of the Total Environment* 239 (1), S. 31 – 47. 1999.
- [43] Tribaudino, M.; Vollprecht, D.; Pavese, A. *Minerals and Waste*. Cham, Springer, 2023, S. 300
- [44] Tschugg, J.; Öfner, W.; Flachberger, H.: Comparative Laboratory Studies of Conventional and Electrodynamic Fragmentation of an Industrial Mineral. In *BHM* 162 (8), S. 319 – 325, 2017.
- [45] United Nations: *Rio Declaration on Environment and Development*.
- [46] Viczek, S.; Aldrian, A.; Pomberger, R.; Sarc, R.: Origins and carriers of Sb, As, Cd, Cl, Cr, Co, Pb, Hg, and Ni in mixed solid waste – A literature-based evaluation. In *Waste Management* 103, S. 87 – 112. 2020.
- [47] Vogel, C.; Exner, R.; Adam, C.: Heavy Metal Removal from Sewage Sludge Ash by Thermochemical Treatment with Polyvinylchloride. In *Environmental Science & Technology* 47 (1), S. 563 – 567, 2013.
- [48] Vollprecht, D.; Pomberger, R.: Ökodesign von Stahlwerksschlacken durch thermochemische Behandlung zur Erhöhung der Recyclingfähigkeit. In *BHM* 166 (3-3), S. 137 – 143, 2021.
- [49] Wanka, S.; Münnich, K.; Fricke, K.: Landfill Mining - Wet mechanical Treatment of Fine MSW with a Wet Jigger. In *Waste Management* 59, S. 316 – 323, 2017.
- [50] Wellacher, M.; Kunter, A.: Störstoffmanagement in biogenen Abfällen. In *Waste-to-Resources* 7, S. 626 – 640. 2017.
- [51] Wenk, H. R.; Bulach, A. G.: *Minerals*. Cambridge University Press, 2016.
- [52] Yang, R.; Liao, W.; Wu, P. (2012): Basic Characteristics of Leachate Produced by Various Washing Processes for MSWI Ashes in Taiwan. In *Journal of Environmental Management* 104, S. 67 – 76. 2012.
- [53] Yovits, M.: Information Science: Toward the Development of a True Scientific Discipline. In *American Documentation* 20 (4), S. 369 – 376, 1969.

## Ansprechpartner



**Professor Dr. Daniel Vollprecht**

Universität Augsburg

Lehrstuhlleiter Resource and Chemical Engineering

Institut für Materials Resource Management

Am Innovationszentrum 8

86159 Augsburg, Deutschland

+49 821 598 69130

[daniel.vollprecht@uni-a.de](mailto:daniel.vollprecht@uni-a.de)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky,  
Dieter Georg Senk, Hermann Wotruba,  
Helmut Antrekowitsch, Roland Pomberger (Hrsg.):

**Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 10**

– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN 978-3-94431 0-72-5 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2023  
Redaktion: Dr.-Ing. Stephanie Thiel  
Erfassung und Layout: Martin Graß, Carolin Pawel, Claudia Naumann-Deppe, Cordula Müller,  
Roland Richter, Janin Burbott-Seidel, Lena Stucke

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.