

## Umwelttechnische Aspekte des Einsatzes von Schlacken als Versatz im Bergbau

Daniel Höllen, Robert Galler, Martin Eisenberger, Roland Pomberger

### Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Höllén, Daniel, Robert Galler, Martin Eisenberger, and Roland Pomberger. 2014.  
"Umwelttechnische Aspekte des Einsatzes von Schlacken als Versatz im Bergbau." *Mining  
Report* 150 (3): 137–41. <https://doi.org/10.1002/mire.201400012>.



# Umwelttechnische Aspekte des Einsatzes von Schlacken als Versatz im Bergbau

Bergversatz ist die zur Prävention von Bergschäden erforderliche Verfüllung unterirdischer Hohlräume. Die Verfahrensrichtlinie des Bergmännischen Verbands Österreich (BVÖ) [1] legt die Anforderungen an die verwendeten Versatzmaterialien fest. Versatzmaterialien aus Sekundärrohstoffen, die aus ressourcenökonomischer Sicht eigens zu diesem Zweck abgebauten Primärrohstoffen vorzuziehen sind, sofern keine bergbaueigenen Materialien in ausreichender Menge zur Verfügung stehen, können diese Anforderungen unter gewissen Voraussetzungen erfüllen. Der Einsatz von Sekundärrohstoffen als Versatzmaterial stellt in diesem Fall eine stoffliche Verwertung im Sinne der Abfallhierarchie [2] dar. Die Zulässigkeit dieser Verwertung hängt maßgeblich von der mineralogisch-hydrogeochemischen Beurteilung der Auswirkungen des Einsatzes sekundärer Versatzmaterialien auf die Umwelt ab. Schlacken der Metallurgie, die aus felsmechanischen Gründen geeignete Versatzmaterialien darstellen, entsprechen unter gewissen Voraussetzungen auch den umweltgeochemischen Anforderungen. Anhand des Beispiels von Chrom in Stahlwerksschlacken wird gezeigt, welche Aspekte bei der Beurteilung dieser Fragestellung im individuell zu beurteilenden Einzelfall zu prüfen sind.

## Environmental aspects of the application of slags as backfill material in mines

*Backfilling of subterranean cavities is necessary to prevent subsidence damages. The guideline of the Austrian Miner's Association (German: Bergmännischer Verband Österreich, BVÖ) [1] defines the requirements for the applied backfill materials. Backfill materials from secondary resources, which should be preferred to primary resources, if the latter are extracted especially for this purpose, can fulfill these requirements under certain conditions. The application of secondary resources as backfill material represents material recycling in terms of the waste hierarchy [2]. The admissibility of this recycling depends significantly on the mineralogical and hydrogeochemical evaluation of the effects of the application of secondary backfill materials on the environment. Metallurgical slags, which represent suitable backfill materials from the point of view of rock mechanics, correspond also to the environmental requirements under certain circumstances. By means of the example of chromium in steel slags it is shown which aspects have to be considered when evaluating the application of secondary resources as backfill materials in every case which has to be judged individually.*

## 1 Einleitung

In Österreich werden die rechtliche Stellung metallurgischer Schlacken, ihre Umweltauswirkungen und ihre zu-

lässigen Einsatzfelder kontrovers diskutiert [3]. In diesem Artikel wird gezeigt, dass und unter welchen Voraussetzungen der Einsatz metallurgischer Schlacken als Bergversatz, d.h. der geotechnisch erforderlichen Verfüllung unterirdischer Hohlräume, aus umwelttechnischer Sicht sinnvoll ist. In der öffentlichen [4] und wissenschaftlichen [5] Diskussion spielt die Freisetzung von Chrom aus Stahlwerksschlacken eine große Rolle. Die Verfahrensrichtlinie des BVÖ [1] legt fest, dass die chemische Unbedenklichkeit durch Elutionsversuche des Versatzkörpers nachgewiesen werden muss [1]. Zusätzlich dienen die Gesamtgehalte als Beurteilungskriterien, wobei die Lage, Form und Größe des Versatzkörpers sowie die hydrogeologischen Rahmenbedingungen einschließlich der Permeabilität von Gebirge und Versatz zu berücksichtigen sind [1]. Dieser Artikel zeigt, wie diese Parameter mineralogisch-hydrogeochemisch erklärt und ergänzt sowie umwelttechnisch interpretiert werden können.

## 2 Technische Notwendigkeit und Anforderungen

Die Verfüllung unterirdischer Hohlräume ist aus geomechanischen Gründen erforderlich und dient den öffentlichen Interessen in sicherheitlicher, ökologischer, ökonomischer und bergtechnischer Hinsicht [1]. Insbesondere dient Bergversatz zur Prävention von Setzungserscheinungen durch Verbruch von Stollen. So treten allein im Verantwortungsbereich der RAG AG im Ruhrgebiet jedes Jahr Bergschäden in Höhe von 300 Mio. EUR auf [6]. Zudem kann durch den Einsatz von Bergversatz die Lagerstätte besser ausgenutzt werden, da weniger Gestein zum Tragen des Gewölbes benötigt wird, wenn dieses durch Versatzmaterial ersetzt wird.

Die Anforderungen an Versatzmaterial können nicht allgemeingültig qualitativ und quantitativ definiert werden [7]. Parameter wie der E-Modul, die Kohäsion, die Tragfähigkeit und die Entwässerungseigenschaften spielen jedoch in typischen Fallbeispielen eine Rolle [7].

## 3 Umweltrechtliche Aspekte des Einsatzes

Beim Abbau von Erzlagerstätten reichen die Berge und Aufbereitungsrückstände in der Regel aus, um den entstandenen Hohlraum zu verfüllen, da das Produkt-Masse-Ausbringen gering ist. Beim Abbau von Festgesteinen (Karbonatgesteine, Gips), Salz oder Kohle ist dies jedoch

in der Regel nicht der Fall. In diesen Fällen können entweder primäre Rohstoffe aus anderen Bergwerken oder Tagebauen oder sekundäre Rohstoffe wie Nebenprodukte, Abfälle oder daraus hergestellte Versatzprodukte eingesetzt werden. Für Nebenprodukte existieren jedoch in der Regel höherwertige Anwendungen, sodass der Schwerpunkt dieses Beitrags der Einsatz von Abfällen und daraus hergestellten Produkten als Bergversatzmaterial ist.

Prinzipiell ist in den Zielen und Grundsätzen des europäischen und des daraus abgeleiteten österreichischen Abfallrechts die Ressourcenschonung und die Nachhaltigkeit festgeschrieben. Die Abfallhierarchie (AWG §1) [2] als Teil der Ziele und Grundsätze legt dabei fest, dass eine Wiederverwendung von Sachen nach der Vermeidung an oberster Stelle steht. Unmittelbar danach folgt die stoffliche Verwertung von Abfällen. Der Bergversatz mit Abfällen entspricht daher den Zielen und Grundsätzen des Abfallwirtschaftsgesetzes. Es handelt sich beim Bergversatz mit mineralischen Abfällen um eine Wiederverwendung oder um ein Recycling/eine stoffliche Verwertung, sofern die gesetzlichen Vorgaben eingehalten werden. Wird ein Abfall wiederverwendet, verliert diese Sache ihre Abfalleigenschaft mit dem Abschluss der Vorbereitung zur Wiederverwendung. Im Fall des Recyclings/der stofflichen Verwertung tritt ein Abfallende nicht automatisch ein, sondern durch einen Feststellungsbescheid der zuständigen Behörde oder durch den Einsatz des Materials für seinen bestimmungsgemäßen Zweck unter Einhaltung der gesetzlich vorgegebenen Voraussetzungen [2]. Im ersten Fall tritt das Abfallende mit der Bescheiderlassung ein, im zweiten Fall erst mit der Verwendung, also mit dem Einbringen in den Bergbau. Als gesetzliche Voraussetzungen gelten der übliche Einsatz des vorgesehenen Materials für den bestimmungsgemäßen Zweck, die Existenz eines Marktes, das Bestehen von Qualitätskriterien und die zumindest gleiche Umweltbelastung der Sekundärrohstoffe im Vergleich zu den Primärrohstoffen.

In Österreich wurden in einzelnen Gipsbergwerken, in denen sekundäre Versatzmaterialien eingesetzt werden, Abfallendebescheide erwirkt [8]. Die als Abfall anfallenden Materialien werden mit einem Bindemittel versetzt. Durch dieses Versetzen entsteht ein Produkt, das dann als Versatzmaterial im Bergbau eingesetzt wird [8]. Im zweiten Fall gibt es zwar kein bescheidmäßig festgestelltes Ende der Abfalleigenschaft, bei Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen tritt das Abfallende jedoch mit jenem Zeitpunkt, also in jener rechtlichen Sekunde ein, in der die bestimmungsgemäße Verwendung durchgeführt wird. Der Bergversatz mit Abfällen würde in Österreich eine Beitragspflicht nach dem Altlastensanierungsgesetz [9] auslösen, die sich mit bis zu 87 EUR pro verwendeter Tonne Versatzmaterial zu Buche schlagen kann. Die Erwirkung eines Feststellungsbescheids ist daher jedenfalls zu empfehlen, die Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen ist unbedingt erforderlich.

Da es sich beim Bergversatz aufgrund seiner technischen Notwendigkeit jedenfalls um eine Verwertung handelt, sollte spätestens mit dem Einbau ins Bergwerk das Abfallende eintreten. Somit handelt es beim Bergversatz selbst um keine Deponierung und beim Grubengebäude in dem der Versatz durchgeführt wird, keinesfalls um eine untertiäge Deponie. Damit kann auch die Deponiever-

ordnung [10] nicht Grundlage einer umweltrechtlichen Bewertung des Einsatzes sekundärer Rohstoffe als Bergversatz sein.

Die Frage, ob das Abfallende mit der Erzeugung eines gebundenen Versatzmaterials oder erst mit dem Einbau ins Bergwerk eintritt, ist aus Sicht des Umweltschutzes irrelevant, da in jedem Fall die Schutzgüter Wasser, Boden und Luft nicht beeinträchtigt werden dürfen. Aus umweltrechtlicher Sicht jedoch hat der Zeitpunkt des Abfallendes wesentliche Folgen für den administrativen Aufwand und damit letztlich für die ökonomische Beurteilung des ökologisch sinnvollen Einsatzes sekundärer Rohstoffe als Versatzmaterial. Für den Umweltschutz ist es entscheidend, dass unter den im Bergwerk gegenwärtig und zukünftig herrschenden Bedingungen keine Freisetzung von Schadstoffen in einem umweltschädigenden Ausmaß erfolgt. Hier kann die deutsche Versatzverordnung [11] eine Hilfe sein, um die in der Versatzrichtlinie des BVÖ [1] vorgeschriebene Prüfung der chemischen Unbedenklichkeit durchzuführen, wobei aus Sicht der Autoren mineralogische Aspekte stärker berücksichtigt werden müssen. Während die Verfahrensrichtlinie des Bergmännischen Verbands Österreich (BVÖ) im Hinblick auf die chemische Eignung bergbaufremder Materialien als Bergversatz keine Grenzwerte nennt, ist dies bei der deutschen Versatzverordnung [11] sehr wohl der Fall. Im Gegensatz zu einem Kommentar zur Richtlinie des BVÖ [7] sind die Autoren der Ansicht, dass der Vorrang der Rückgewinnung von Metallen (§3) keinen Widerspruch zur Definition von Anforderungen an das Versatzmaterial (§4) stellt und die deutsche Versatzverordnung daher sehr wohl eine Ergänzung der Richtlinie des BVÖ insofern darstellt, als in der Versatzverordnung Gesamtgehalte und Eluatkonzentrationen zur Beurteilung der chemischen Eignung genannt werden, die in der Richtlinie des BVÖ fehlen.

Aus rechtlicher Sicht sollte daher einer Bewertung von Versatzmaterialien, auch wenn das Ausgangsmaterial Abfall darstellt, als Sekundärprodukt nichts im Wege stehen, wenn die rechtlichen Voraussetzungen für ein Abfallende eingehalten werden.

#### **4 Sekundäre Versatzmaterialien**

Für viele Sekundärmaterialien existieren bereits Verwertungsschienen, die meist auch höherwertig sind als der Einsatz als Bergversatz. Daher kommen v.a. Rückstände thermischer Prozesse als mögliche sekundäre Versatzmaterialien in Betracht, die in der Metallurgie (Schlacken) und in der Thermoprozesstechnik (Rückstände der Rauchgasreinigung, z.B. REA-Gips, sowie Rückstände der Verbrennung selbst) anfallen. Dabei stellt monomineralischer REA-Gips ein synthetisches Analogon natürlicher Gipsgesteine dar und nimmt daher eine Sonderstellung ein. Es ist einleuchtend, dass ein aus REA-Gips erzeugtes Versatzprodukt in einem Gipsbergwerk ohne Bedenken als Bergversatz eingesetzt werden kann [8].

Andere Prozessrückstände sind in der Regel durch einen komplexen Phasenbestand gekennzeichnet, der sich so in natürlichen Gesteinen nicht findet. Zu den Verbrennungsrückständen zählen die Aschen fossiler und nachwachsender Rohstoffe, z.B. Holz- bzw. Kohleaschen, die beide bereits als Versatzmaterialien eingesetzt werden



[12]. Beim Einsatz metallurgischer Schlacken als Versatzmaterial muss berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Schlackentypen existieren, von denen einige, z.B. bestimmte Elektroofenschlacken aus der Baustahlerzeugung, eine konstante Zusammensetzung aufweisen [13], weil sie aus der Erzeugung einer einzigen Legierung stammen, während andere, z.B. bestimmte Edelstahlschlacken, eine stark schwankende Zusammensetzung besitzen [14].

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass die Eignung von sekundären Rohstoffen als Versatzmaterial stets im Einzelfall beurteilt werden muss. Dennoch sind gewisse Aspekte im Hinblick auf den Umweltschutz von grundsätzlicher Bedeutung und werden im Folgenden vorgestellt.

## 5 Bergversatz und Umweltschutz

### 5.1 Ressourceneffizienz und Bergversatz

In Bergwerken mit einem hohen Produkt-Masse-Ausbringen (z.B. Magnesit-, Kalk- oder Gipsbergwerke) reichen die Berge sowie die Rückstände der Aufbereitung nicht aus, um alle durch den Bergbau entstandenen Hohlräume zu verfüllen. In diesen Fällen ist es aus Gründen der Ressourceneffizienz sinnvoller, Sekundärrohstoffe als Versatzmaterial zu verwenden, als in einem Steinbruch eigens Primärmaterial zu diesem Zweck abzubauen. Der Verzicht auf den Abbau von Versatzmaterial eigens zu diesem Zweck verringert zudem die bergbaubedingten Eingriffe in das Landschaftsbild, Emissionen von Staub und Lärm durch Bohrungen und Sprengungen sowie den Einsatz von Sprengstoffen mit den damit verbundenen Rückständen im Gestein und in der Umwelt.

### 5.2 Abgrenzung des Umweltbegriffs gegen die Lithosphäre

Für eine Diskussion der Umweltauswirkungen von Sekundärrohstoffen muss der Umweltbegriff definiert werden: Unter Umwelt versteht man die Lebensumgebung von Organismen. Sie umfasst somit die Kompartimente Wasser, Boden und Luft. In der öffentlichen Diskussion wird zuweilen der Begriff „Boden“ fälschlich im Sinne von „Untergrund“ verwendet. Tatsächlich ist das im Bergwerk anstehende Gestein kein Boden und damit kein Bestandteil der Umwelt, da die Wechselwirkungen des Gesteins mit der Biosphäre nur marginal sind und somit keine signifikante Akkumulation organischer Substanz stattfindet, was die Bodendefinition nach ÖNORM L1050 ist. Bergversatz befindet sich somit außerhalb der Umwelt.

### 5.3 Freisetzung von Schadstoffen in die Umwelt

Dennoch kann es zu einer Freisetzung von Schadstoffen aus Bergversatzmaterial in die Umwelt auf indirektem Wege über das Grubenwasser kommen, sodass für den Einsatz schadstoffbelasteter Versatzmaterialien solche Gesteinsformationen geeigneter erscheinen, in denen der Wasserzutritt gering ist. Dies ist insbesondere in folgenden Umgebungen der Fall:

- Geologische Formationen, die nachweislich über geologische Zeiträume hinweg weitestgehend trocken gewesen sein müssen, z.B. Salzstöcke ohne Subrosionerscheinungen,

- Tektonische Einheiten, die über geologische Zeiträume hinweg nur wenig Deformation erfahren haben und daher kaum zerklüftet sind, z.B. Kratone,
- Lithologien, die auf mechanische Beanspruchung plastisch reagieren, z.B. Tone und Salze.

Anhaltspunkte für Gefahren eines Wassereintruchs sind hingegen:

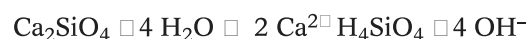
- Lösungserscheinungen, z.B. Verkarstung,
- Tektonisch aktive Bereiche, z.B. Subduktionszonen, Transformstörungen, Kollisionszonen,
- Starke Klüftung des Gesteins,
- Lithologien, die auf mechanische Beanspruchung spröde reagieren, z.B. Schiefer.

### 5.4 Fallbeispiel: Freisetzung von Chrom aus Stahlwerksschlacken

Stahlwerksschlacken sind aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften, ihrer großen Produktionsmenge und ihrer geringen Löslichkeit qualitativ hochwertige Baustoffe [15] und damit auch potenzielle Versatzmaterialien. Dennoch wird die Freisetzung einiger Legierungselemente aus Schlacken in Österreich kontrovers diskutiert [4], obwohl umfassende Studien gezeigt haben, dass die Freisetzung dieser Elemente selbst aus den als besonders kritisch geltenden Edelstahlschlacken gering ist [14].

Im Fokus steht dabei das Chrom, das in Stahlwerksschlacken in der Regel in Form von Spinellen gebunden ist [16]. Spinelle sind Mineralphasen mit der allgemeinen Formel  $AB_2O_4$ , die im kubischen Kristallsystem in der Raumgruppe  $Fd\bar{3}m$  kristallisieren. Es existieren zwei bedeutsame Chrom-Spinelle: Chromit,  $FeCr(III)_2O_4$ , und Magnesiochromit,  $MgCr(III)_2O_4$ . Die Löslichkeit von Chromit ist unter den meisten geologischen Bedingungen sehr gering [17]. Nur  $H_2O_2$  und  $Mn(III)$ - und  $Mn(IV)$ -Verbindungen können signifikante Mengen an Chromit lösen und das freierwerdende  $Cr(III)$  in wässriger Lösung zu  $Cr(VI)$  oxidieren [18]. Diesem Aspekt ist es zu verdanken, dass in einer vergleichenden Studie an einer Vielzahl von Edelstahlschlacken die Konzentration an  $Cr(VI)$  im Eluat stets  $\leq 0,01$  mg/L bzw.  $\leq 0,1$  mg/kg Trockensubstanz betrug [14].

Diese geringe Löslichkeit ist darauf zurückzuführen, dass sich im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Edelstahlschlacke, wie es durch Elutionsversuche mit destilliertem Wasser simuliert wird, ein pH-Wert von rund 12 einstellt [16]. Dies lässt sich dadurch erklären, dass Stahlwerksschlacken oft beachtliche Gehalte an Calcio-Olivin oder Larnit ( $\square$  bzw.  $\square-Ca_2SiO_4$ ) enthalten [14], bei dessen Auflösung Hydroxidionen freierwerden, sodass der pH-Wert steigt [19]:



Die Löslichkeit von Chromit nimmt im alkalischen Bereich mit sinkendem pH-Wert ab [20] und Grubenwässer besitzen in der Regel einen pH-Wert  $\leq 12$ . Daher ist die zeitliche Abfolge, in der die Prozesse der Auslaugung von Chrom durch das Grubenwasser einerseits und die Erhöhung seines pH-Werts durch die Reaktion mit  $Ca_2SiO_4$  andererseits ablaufen, von zentraler Bedeutung. Die Freisetzung von Chrom wird dann stärker gehemmt, wenn sich

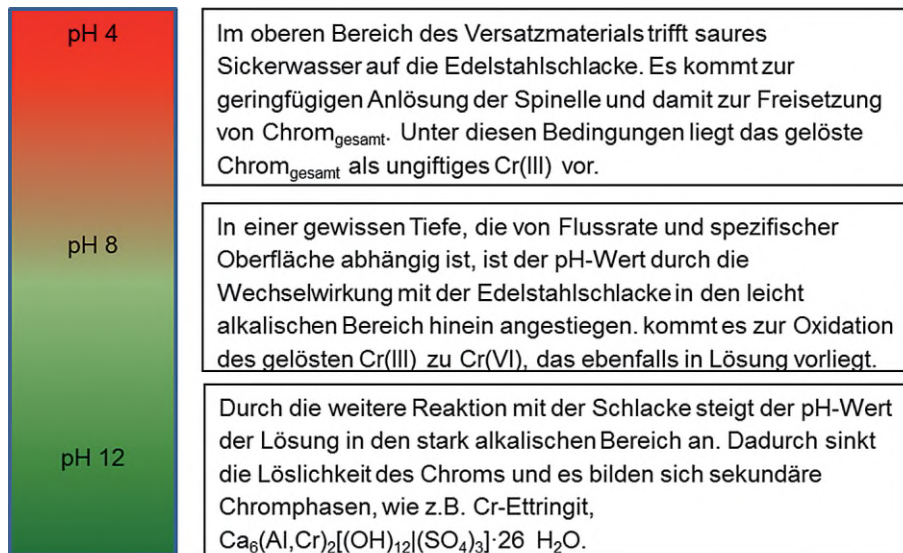


Bild 1. Modell der Entwicklung des Grubenwassers in einer Säule aus Versatzmaterial und Auswirkungen auf den pH-Wert der Lösung

der pH-Wert schneller in den hoch alkalischen Bereich bewegt als sich das Chrom aus den Spinellen, in denen es gebunden ist, herauslöst. Wenn das Grubenwasser über einen langen Zeitraum hinweg im Versatzmaterial steht und mit diesem wechselwirkt, wird sich ein hoch alkalischer pH-Wert einstellen, sodass Chrom, selbst wenn es sich teilweise bei Beginn des Kontakts gelöst haben sollte, wieder fixiert wird. Wenn hingegen das Grubenwasser die Schlacke schnell durchströmt, dann reicht die Verweilzeit zur Einstellung des hoch alkalischen Gleichgewichts-pH-Werts nicht aus und es kommt zur Auslaugung von Chrom durch das stetig nachlaufende Grubenwasser. Grundsätzlich lassen sich die Wechselwirkungen zwischen Grubenwasser und Cr-haltigem Versatzmaterial gut in einem Säulenmodell (Bild 1) darstellen. Dabei wird deutlich, dass es je nach Durchströmungsgeschwindigkeit, pH- und Eh-Wert des Grubenwassers zu einer partiellen Verlagerung des Chroms innerhalb des Versatzes kommt, jedoch nicht zu einer Freisetzung aus dem Versatz heraus.

Ferner ist zu beachten, dass die Einstellung eines hochalkalischen pH-Werts im Versatzmaterial durch eine teilweise Auflösung desselben hervorgerufen wird. Es ist jedoch zu erwarten, dass die bei der Auflösung der Calciumsilikate freigesetzten  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen und  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ -Moleküle wiederum in Sekundärphasen wie Calcit oder amorphem  $\text{SiO}_2$  fixiert werden, sodass keine Wegsamkeiten im Versatzmaterial entstehen sollten. Zudem ist der Relativanteil des sich lösenden Materials dermaßen gering, dass die im Säulenprozess dargestellten Vorgänge auch über geologische Zeiträume hinweg wirksam sind und die Freisetzung von  $\text{Chrom}_{\text{gesamt}}$  und  $\text{Cr(VI)}$  hemmen.

Aus umwelttechnischer Sicht ist der Eh-Wert noch bedeutsamer als der pH-Wert. Liegen nämlich in wässrigen Lösungen oxidierende Bedingungen vor, so kann es zur Bildung von toxischem  $\text{Cr(VI)}$  kommen, während Chrom unter reduzierenden Bedingungen als unschädliches Chrom (III) vorliegt [21]. Daher wirkt es sich günstig aus, dass es nach der Schließung des Bergwerkes durch die Beendigung der künstlichen Bewetterung zu einer Verarmung der Grubenluft an Sauerstoff kommen kann, sodass

das Redoxpotenzial und damit das Risiko der Bildung von  $\text{Cr(VI)}$  unter Tage im Allgemeinen geringer ist als über Tage. Somit ist die stoffliche Verwertung von Stahlwerksschlacken unter Luftabschluss in einem vollständig verfüllten und wassergesättigten Hohlraum unter Tage der Deposition über Tage aus Umweltschutzgesichtspunkten vorzuziehen.

## 6 Zusammenfassung

Angeichts der technischen Notwendigkeit des Bergversatzes und unter Berücksichtigung der Ressourceneffizienz ist der Einsatz von Sekundärrohstoffen als Bergversatz umwelttechnisch sinnvoll. Der Einsatz von sekundären Rohstoffen als Bergversatz sollte in Gesteinsformationen ähnlicher mineralogischer Zusammensetzung, in denen der Grubenwasserfluss gering ist, erfolgen. Stahlwerksschlacken stellen geeignete Versatzmaterialien dar, wobei der Einsatz in gebundener Form erfolgen sollte, um eine Freisetzung von Schadstoffen zu vermeiden. Der Einsatz in ungebundener Form erfordert strengere Kriterien, ist aber unter geeigneten Bedingungen ebenfalls vertretbar. Beim Einsatz von Stahlwerksschlacken sollten große Volumina eingesetzt werden, um eine Einstellung des pH-Werts des Grubenwassers in einem für die Freisetzung von  $\text{Chrom}_{\text{gesamt}}$  unbedenklichen hochalkalischen Bereich zu ermöglichen. Gerade unter dem Gesichtspunkt der Bildung von  $\text{Cr(VI)}$  unter oxidierenden Bedingungen ist eine stoffliche Verwertung chromhaltiger Sekundärrohstoffe als Bergversatz einer Deposition über Tage vorzuziehen, weil in einem vollständig verfüllten und wassergesättigten Hohlraum stärker reduzierende Bedingungen herrschen als bei einer der Atmosphäre ausgesetzten obertägigen Ablagerung. Auch im Hinblick auf die Langzeitstabilität ist die stoffliche Verwertung von Sekundärrohstoffen mit signifikanten Schadstoffgehalten als Bergversatz einer Deposition über Tage vorzuziehen, weil Deponien über geologische Zeiträume hinweg weit schneller durch exogene Kräfte zerstört werden können als ein Bergwerk, in dem überwiegend endogene Kräfte wirken.

## Literatur

- [1] BVÖ: Verfahrensrichtlinie – Versatzsysteme im untertägigen Bergbau. Bergmännischer Verband Österreich, Fachausschuss für Untertagebergbau, 2013.
- [2] Bundesrepublik Österreich: Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz). 2002.
- [3] N.N.: Baustoffe: Es geht um viel Schotter. Die Presse. 18.01.2014, 2014.
- [4] David-Freihsl, R.: Schlappe mit ungiftiger Schlacke. Der Standard, 6.9.2013.
- [5] Föhlman, A.M.: Leaching of chromium and barium from steel slag in laboratory and field tests – a solubility controlled process. *Waste Management* 20 (2000), S. 149–154.
- [6] Meinke, U.: 300 Millionen Euro für Bergschäden. *Westdeutsche Allgemeine Zeitung*, 25.5.2013.
- [7] Hohl, W., Frömmer, T.: Die Versatzrichtlinie des BVÖ: ein Leitfaden für die zeitgemäße Planung eines Versatzmaterials. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 158 (2013), S. 410–423.
- [8] Bezirkshauptmannschaft Baden: Feststellungsbescheid BNW2-AW-0624. 20. 12 2006.
- [9] Bundesrepublik Österreich: Altlastensanierungsgesetz BGBl I 299/1989 idF BGBl / 103/2013. 1989.
- [10] Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Deponieverordnung. 2008.
- [11] Bundesrepublik Deutschland: Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage (Versatzverordnung – VersatzV). *Bundesgesetzblatt I* S. 2833. 24. 7 2002.
- [12] Peyronnard, O., Benzaazoua, M.: Alternative by-product based binders for cemented lime backfill: Recipes optimisation using Taguchi method. *Minerals Engineering* 29 (2012), S. 28–38.
- [13] Aldrian, A., Raith, J., Sarc, R., Czyzykiewicz, P., Höllen, D., Pomberger, R.: Assessment of the Mobility of Chromium in a Quality Assured Electric Arc Furnace Slag. *Athen. ATINER's Conference Paper Series ENV2013-0604* (2013), S. 18.
- [14] Drissen, P., Mudersbach, D.: Entwicklung von Baustoffen aus Edelstahlschlacken für Flächensanierung und Deponiebau. *FEhS – Institut für Baustoffforschung* 19 (2012), S. 1–6.
- [15] Motz, H., Geiseler, J.: Products of steel slags as an opportunity to save natural resources. *Waste Management* 21 (2001), S. 285–293.
- [16] Schubernig, M., Höllen, D.: Produktorientierte Schlackenverwertung, Auftragsprojekt der Harsco Minerals Austria GmbH, 2013.
- [17] Ball, J., Nordstrom, D.: Critical evaluation and selection of standard state thermodynamic properties for chromium metal and its aqueous ions, hydrolysis species, oxides, and hydroxides. *J. Chem. Eng. Data*. 43 (1998), S. 895–918.
- [18] Oze, C., Bird, D., Fendorf, S.: Genesis of hexavalent chromium from natural sources in soil and groundwater. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104 (2007) S. 6544–6549.
- [19] Nicoleau, L., Nonat, A., Perrey, D.: The di- and tricalcium silicate dissolutions. *Cement and Concrete Research* 47 (2013), S. 14–30.
- [20] Geelhoed, J., Meeussen, J., Hillier, S., Lumsdon, D., Thomas, R., Farmer, J., Paterson, E.: Identification and geochemical modeling of processes controlling leaching of Cr(VI) and other major elements from chromite ore processing residue. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 66 (2002), S. 3927–2942.
- [21] Gómez, V., Callao, M.P.: Chromium determination and speciation since 2000. *Trends in Analytical Chemistry* 25 (2006), S. 1006–1015.
- [22] Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Recycling-Baustoffverordnung (Entwurf vom 22.11.2013 zur internen Verwendung). 22. 11 2013.
- [23] Farooque, K.N., Yeasmin, Z., Alam, S., Alam, A.M.S., Zaman, M.: Pozzolanic Activity of Fly Ash. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research* 45 (2010), S. 303–308.
- [24] Johnson, D., Hallberg, K.: Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the Total Environment* 338 (2005), S. 3–14.

## Autoren

Mag. Dr. jur. Martin Eisenberger LL.M.  
Eisenberger Umweltrechtsconsulting  
Hilmgasse 10  
8010 Graz  
Österreich  
kanzlei@umweltrecht.at

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler  
Lehrstuhl für Subsurface Engineering  
Montanuniversität Leoben  
Erzherzog-Johann-Straße 3/III  
8700 Leoben  
Österreich  
robert.galler@unileoben.ac.at

Dipl.-Min. Dr. rer. nat. Daniel Höllen  
daniel.hoellen@unileoben.ac.at  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Roland Pomberger  
roland.pomberger@unileoben.ac.at  
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft  
Montanuniversität Leoben  
Franz-Josef-Straße 18  
8700 Leoben  
Österreich