

Mineralogie und Auslaugbarkeit von Stahlwerksschlacken

Daniel Höllen und Roland Pomberger

1.	Mineralogie und Auslaugbarkeit.....	378
2.	Mineralogie und Auslaugbarkeit spezieller Mineralgruppen	379
2.1.	Silikate	379
2.2.	Oxide.....	380
2.3.	Aluminate.....	380
2.4.	Spinelle	380
2.5.	Ferrite.....	381
2.6.	Fluoride	382
3.	Sekundärbildungen an Oberflächen.....	382
4.	Modifizierung von Stahlwerksschlacken	383
5.	Zusammenfassung und Ausblick.....	383
6.	Literatur	384

Stahlwerksschlacken sind synthetische Gesteine [11], die als Sekundärrohstoffe im Bauwesen weite Verwendung finden. In diesem Zusammenhang spielt das Auslaugverhalten von Stahlwerksschlacken im Hinblick auf die Umweltauswirkungen eine große Rolle. Gegenwärtig wird in Österreich neben dem Gehalt im Eluat der Gesamtgehalt an bestimmten Elementen als Maß für die Umweltauswirkungen von Stahlwerksschlacken herangezogen. Die zugrunde liegende Annahme lautet, dass der Gesamtgehalt die maximal freisetzbare Stoffmenge darstellt. Tatsächlich ist diese Annahme jedoch unrealistisch hoch, da eine vollständige Auflösung der Schlacke unter Einsatzbedingungen im Bauwesen aufgrund der Mineralogie von Stahlwerksschlacken weder empirisch zu beobachten noch physikalisch-chemisch möglich ist. Die tatsächlich maximal freisetzbaren Stoffmengen und Konzentrationen ergeben sich vielmehr aufgrund der Mineralogie von Stahlwerksschlacken, welche die Auslaugbarkeit maßgeblich beeinflusst, wie in diesem Beitrag dargestellt wird.

1. Mineralogie und Auslaubarkeit

Im thermodynamischen Gleichgewicht einer Stahlwerksschlacke mit einer wässrigen Lösung stellt sich eine Gleichgewichtskonzentration aller im System vorhandenen chemischen Elemente in der Lösung ein. Bei der Auflösung von Mineralphasen kann die Gleichgewichtskonzentration in der Lösung nicht überschritten werden. Jedoch kann durch Abfluss der gesättigten Lösung und Zufluss einer untersättigten Lösung ein größerer Anteil der Mineralphasen in Lösung gehen, als sich aus der Berechnung der gelösten Stoffmenge aus der Gleichgewichtskonzentration in der Lösung ergibt. Durch die Auflösung einer Mineralphase kann sich andererseits die Übersättigung einer anderen Phase ergeben, was zur Ausfällung dieser Phase führen kann, so dass die Gleichgewichtskonzentration eines gelösten Elements bezüglich der Primärphase unterschritten wird. Diese Sekundärphasen, die sich an den Grenzflächen zwischen Primärphasen und wässriger Lösung bilden, bestimmen maßgeblich das Auslaugverhalten von Stahlwerksschlacken. Die Löslichkeit von primären und sekundären Schlackephase hängt vom pH-Wert, dem Redoxpotential sowie von der Gesamtheit der in der Lösung vorhandenen Elemente ab. Die initiale Zusammensetzung der Lösung vor der Reaktion mit Stahlwerksschlacken verändert sich durch diese Reaktion, so dass die Auflösung von Schlackephase als Funktion des Reaktionsweges und der Reaktionszeit in der Schlacke gesehen werden muss. Bei der Einstellung eines Gleichgewichts mit Stahlwerksschlacken stellen sich im Allgemeinen hoch alkalische Bedingungen ein. Natürliche Oberflächen-, Grund- und Bergwässer haben in der Regel einen geringeren pH-Wert. Somit kommt es mit zunehmender Interaktion zwischen wässriger Lösung und Stahlwerksschlacke zu einer Zunahme des pH-Wertes. Wie sich anhand des Beispiels des Einsatzes von Schlacken im Bergversatz zeigen lässt [16]. Da die Löslichkeit vieler Mineralphasen in Stahlwerksschlacken mit steigendem pH-Wert abnimmt, ist selbst im Falle einer anfänglichen Mobilisierung mit einer späteren Re-Fixierung in Mineralneubildungen zu rechnen.

Es ist offensichtlich, dass die Geschwindigkeit, mit der sich der Gleichgewichts-pH-Wert einstellt, d.h. die Reaktionskinetik, eine entscheidende Rolle spielt. Die Kinetik der Auflösung von Mineralphasen hängt von der spezifischen Oberfläche bzw. der Grenzfläche zwischen Schlackenphasen und wässriger Lösung statt. Somit kommt der Schlackeaufbereitung eine große Bedeutung zu, da eine intensive Zerkleinerung zu einer Erhöhung der spezifischen Oberfläche führt. Hingegen ist der Einsatz in gebundenen Tragschichten auch deshalb vorteilhaft, weil dieser mit einer Verringerung der spezifischen Oberfläche verbunden ist. Die Reaktionskinetik hängt auch von der Fließgeschwindigkeit der perkolierenden Lösung ab. Bei einer geringen Flussrate, bleibt die Lösung länger im Kontakt mit einem spezifischen Schlackekorn, so dass sich der pH-Wert eher hebt, bevor anfänglich gelöste Ionen abtransportiert werden können. Dies führt zu einer Wiederausfällung von Sekundärphasen in tieferen Bereichen eines hinreichend mächtigen Schlackekörpers und verhindert damit eine Mobilisierung der entsprechenden Elemente (Bild 1).

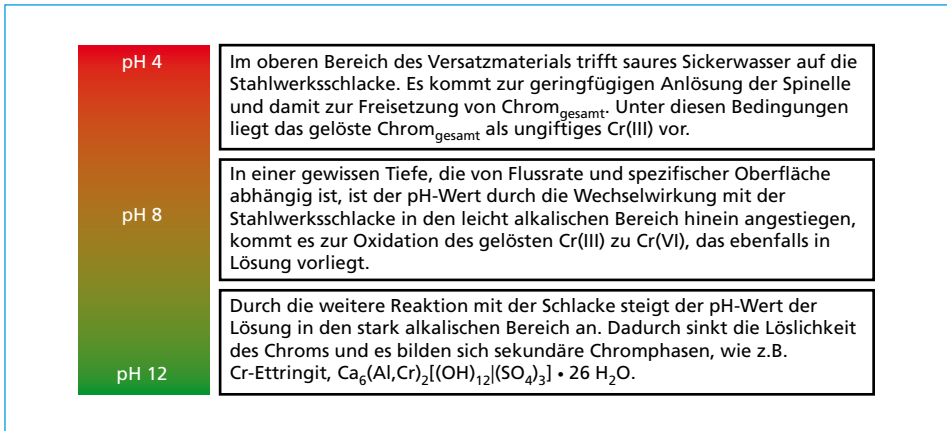


Bild 1: Mobilisierung und Refixierung von Chrom in einem säulenförmigen Schlackekörper

2. Mineralogie und Auslaubarkeit spezieller Mineralgruppen

2.1. Silikate

Silikatminerale stellen die Hauptphasen in Stahlwerksschlacken dar. Obwohl es sich stöchiometrisch um Ca-, Mg- und Al-Silikate, im Falle des Cuspidins ($\text{Ca}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{F}_{0,75}(\text{OH})_{0,25})_2$) auch um Fluorosilikate handelt, können sie als diadochen Ersatz für die formelwirksamen Elemente auch geringe Gehalte an Vanadium enthalten. So kann z.B. Larnit ($\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$) die Hauptquelle für die Freisetzung von Vanadium in Stahlwerksschlacken sein [21]. Da es sich um eine ingruente Auflösung handelt, ist die Löslichkeit von Larnit aber nicht der entscheidende Faktor, zumal die Freisetzung von Larnit-gebundenem Vanadium aus Stahlwerksschlacken stark durch die Carbonatisierung beeinflusst wird [21]. Bei der Einbindung von Vanadium in Larnit ist auch zu beachten, dass dieser bei der hydraulischen Abbinde-reaktion zu Calciumsilikathydraten reagiert, die Vanadium in ihre (Kristall)Struktur aufnehmen können [14], während dies nicht immer der Fall sein muss [10]. Messungen mittels Röntgennahkantenspektroskopie zeigen, dass es bei der Alterung von Stahlwerksschlacken zu einer Oxidation des Vanadiums vom vierwertigen in den umweltschädlicheren fünfwertigen Zustand kommt [7]. In anderen Schlacken enthalten die Calciumdisilikate hingegen gar kein Vanadium, während dieses im Merwinit ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$) gebunden ist [15]. Die Auflösungskinetik von Merwinit bei einem pH-Wert von 10 ist im Vergleich zu der von Calcio-Olivin, welcher neben Larnit die zweite wichtige Ca_2SiO_4 -Modifikation darstellt, deutlich langsamer, wie am geringeren Säureverbrauch zur Aufrechterhaltung eines konstanten pH-Wertes ersichtlich ist [13]. Sollte dies auch im Vergleich zu Larnit der Fall sein, wäre die Einbindung in Merwinit eine gute Option zur Verringerung der Freisetzung von Vanadium, mit dem positiven Nebeneffekt, dass der bautechnisch ungünstige Effekt des Zerfalls der Schlacke durch die Umwandlung von Larnit in Calcio-Olivin gehemmt wird [12].

2.2. Oxide

Wüstit (FeO) und Periklas (MgO) bilden eine Mischkristallreihe, die oft Hauptphasen in Stahlwerksschlacken darstellen [11]. In diesen Oxidphasen können anstelle von Fe und Mg auch andere Elemente wie Cr gebunden sein [15]. Messungen mittels Röntgenkantenabsorptionsspektroskopie (XANES) zeigen, dass es sich bei in Wüstitstrukturen gebundenem Chrom in Stahlwerksschlacken um dreiwertiges, oktaedrisch koordiniertes Chrom handelt, woran sich auch bei der Auslaugung und Alterung nichts ändert, so dass insgesamt < 0,02 Prozent des gesamten Chroms in Lösung gehen [7]. Damit stellt in Wüstitphasen gebundenes Chrom eine ökologisch vorteilhafte mineralogische Form der Chromeinbindung in Stahlwerksschlacken dar.

2.3. Aluminate

Mayenit ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$) ist eine verbreitete Phase in Stahlwerksschlacken und kann signifikante Konzentrationen an Fluor in seine Kristallstruktur einbauen [17]. In der Kristallstruktur des Mayenits, der sich in Stahlschmelzen bei geringeren Sauerstoffpartialdrücken bildet, ist Fluor weniger fest gebunden als in der des Fluorits (CaF_2), der sich in Paragenese mit Brownmillerit ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$) bei höheren Sauerstoffpartialdrücken bildet, so dass die Auslaugbarkeit von Fluor im ersten Fall höher ist als im zweiten [17]. Dies kann auf einer grundlegenden kristallographischen Ebene dadurch erklärt werden, dass es sich im ersten Fall um die Substitution des größeren O^{2-} -Ions (140 pm) durch das kleinere F-Ion (133 pm), im zweiten Fall um die Kristallisation einer idealen Struktur handelt, so dass im ersten Fall zu einer lockereren Bindung als im zweiten Fall kommt. Eigene Studien zeigen, dass es auch zu einer Paragenese von Fluorit mit Fluoro-Mayenit und anderen F-führenden Phasen kommen kann [15].

2.4. Spinelle

Spinelle sind in Stahlwerksschlacken die Hauptträger des Chroms [3]. Spinelle sind Mineralphasen mit der allgemeinen Formel AB_2O_4 , die im kubischen Kristallsystem in der Raumgruppe $\text{Fd}\bar{3}\text{m}$ kristallisieren.

Es existieren zwei bedeutsame Chrom-Spinelle: Chromit, $\text{FeCr(III)}_2\text{O}_4$, und Magnesiochromit, $\text{MgCr(III)}_2\text{O}_4$. Die Löslichkeit von Chromit ist unter den meisten geologischen Bedingungen sehr gering [4]. Nur H_2O_2 und Mn(III)- und Mn(IV)-Verbindungen können signifikante Mengen an Chromit lösen und das freiwerdende Cr(III) in wässriger Lösung zu Cr(VI) oxidieren [19]. Diesem Aspekt ist es zu verdanken, dass in einer vergleichenden Studie an einer Vielzahl von Edelstahl-schlacken die Konzentration an Cr(VI) im Eluat stets $\leq 0,01$ mg/L bzw. $\leq 0,1$ mg/kg Trockensubstanz betrug [12]. Ungeachtet der grundsätzlich äußerst geringen Löslichkeit der Spinelle ist angesichts extrem geringer Grenzwerte, z.B. in der deutschen Versatzverordnung [5], ist es erforderlich, die Kristallchemie der Spinelle genauer zu betrachten, da diese Auswirkungen auf die Löslichkeit hat. So wurde in einer vergleichenden Untersuchung

zweier Stahlwerksschlacken [15] festgestellt, dass die Substitution von Sauerstoff durch Fluor in der Spinellstruktur die Auslaugbarkeit von Chrom negativ beeinflusst. Dies ist in Übereinstimmung mit den Beobachtungen an Mayenit [17], aber auch an synthetischen LiMn_2O_4 -Spinellen [8]. Doch nicht nur die chemische Zusammensetzung der Schlackenphasen verdient Beachtung, sondern auch die Verteilung der chemischen Elemente innerhalb der einzelnen Phasen. Spinelle in Stahlwerksschlacken sind meist keine reinen Chromite oder Magnesiochromite, sondern Mischkristalle der Zusammensetzung $(\text{Fe,Mg})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$. Dabei kann die Verteilung der sich substituierenden Elemente innerhalb eines Kristalls homogen oder inhomogen sein. Spinelle, die aus einem Al-reichen Rand und einem Cr-reichen Kern bestehen, sind z.B. im Hinblick auf eine Freisetzung vorteilhafter als Spinelle mit einer homogenen Cr-Al-Verteilung, da der Al-reiche Rand den Cr-reichen Kern vor einer Reaktion mit der wässrigen Lösung schützt (Bild 2) [15]. Trotz des Einflusses der Zonierung sowie der Realstruktur der Spinelle ist die Einbindung von Chrom in diese Mineralgruppe im Hinblick auf das Auslaugverhalten generell sehr vorteilhaft, während die Bildung von Chromatit ($\text{CaCr}^{6+}\text{O}_4$) sowie $\text{Ca}_5(\text{Cr}^{5+}\text{O}_4)_3\text{F}$ aufgrund von deren höherer Löslichkeit und der höheren Oxidationsstufen des Chroms vermieden werden sollte [6]. Die Erkenntnis, das mit einem Anstieg des CaO/SiO_2 -Verhältnisses einer Schlacke von 1 auf 2 eine Erhöhung der Auslaugbarkeit aufgrund der Bildung dieser Phasen nach sich zieht, kann zur Optimierung der Schlackenchemie ebenso verwendet werden, wie die Förderung der Spinellbildung durch MgO -Zugabe [6].

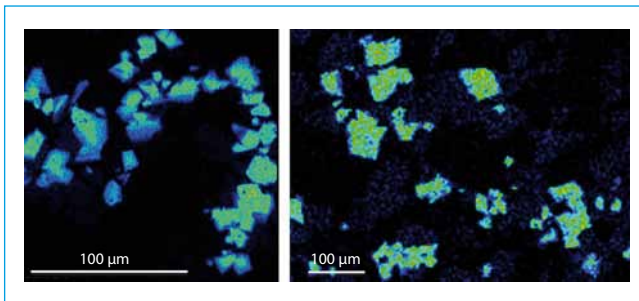


Bild 2:

Cr-Verteilung in zonierten (links) und nicht zonierten (rechts) Spinellen in Stahlwerksschlacken

2.5. Ferrite

Brownmillerit ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$) ist in einigen LD-Schlacken eine wesentliche Wirtsphase für Vanadium und dreiwertiges Chrom [10]. Dabei ist Vanadium als dreiwertiges Ion in oktaedrischer und als fünfwertiges Ion im Tetraeder gebunden [7]. Die Kinetik der Auflösung von Brownmillerit in Stahlwerksschlacken ist mit einer Reaktionsrate von $10^{-9} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-2}$ extrem langsam [10], so dass die Einbindung von Chrom und Vanadium im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit schlackenbasierter Baustoffe positiv zu beurteilen ist. Im Gegensatz zu diesen LD-Schlacken trat in einer untersuchten Edelstahlschlacke kein Brownmillerit auf; dort war Chrom in Spinellen und Vanadium in Scheelit gebunden [15].

2.6. Fluoride

Fluorit, CaF_2 , stellt das einzig relevante Mineral aus der Gruppe der Fluoride unter den Schlackephase dar. Fluorit ist das schwerlöslichste Fluorid und somit die aus Umweltschutzgesichtspunkten bestmögliche Einbindung von Fluor. Fluorit wird als Flussmittel verwendet und bildet sich beim Erstarren der Schlacke wieder neu, insbesondere bei höheren Sauerstoffpartialdrücken [17]. In einer untersuchten Edstahlschlacke wurde festgestellt, dass Fluorit kristallchemisch sehr rein ist und z.B. trotz der geochemischen Ähnlichkeit von Ca^{2+} und Mg^{2+} und eines hohen Mg-Gehaltes im System kein Mg^{2+} und erst recht nicht Cr^{3+} oder V^{4+} anstelle von Ca^{2+} einbaut [15].

3. Sekundärbildungen an Oberflächen

Bei der Wechselwirkung von Stahlwerksschlacken mit wässrigen Lösungen kann es nach der Freisetzung von Ionen oder anderen gelösten Spezies (z.B. $\text{Si}(\text{OH})_4^0$) zur Bildung von Sekundärphasen an der Grenzfläche zwischen Primärphasen und wässrigen Lösungen kommen. So zeigt ein Vergleich thermodynamischer Modellierungen mit experimentellen Arbeiten nach NF EN 12457-2 zur Auslaugung von spinellgebundenem Chrom aus Stahlwerksschlacken, dass erstere die gelöste Konzentration von Chrom unterschätzen, was durch die Bildung von Cr(III)-Hydroxiden erklärt werden kann. In diesem Fall stimmen thermodynamisches Modell und empirische Beobachtungen gut überein. In diesem Fall ist hervorzuheben, dass es trotz Lösung und Wiederausfällung nicht zur Oxidation von Cr(III) zu Cr(VI) kommt [10]. Es ist zu beachten, dass diese direkte Auflösung und Wiederausfällung von Cr(III)-Phasen in Hochofenschlacken ohne zwischenzeitliche Oxidation aufgrund des geringen Ca-Gehaltes möglich ist, während es bei einem höheren Ca-Gehalt der vorigen Oxidation zu Cr(VI)-führenden Sekundärphasen bedarf. Dabei spielt weniger der reine Chromatit (CaCrO_4) als vielmehr der Einbau in $\text{Ba}(\text{S,Cr})\text{O}_4$ -Mischkristalle eine entscheidende Rolle [9]. Die Neubildung derartiger Phasen führt zu einer Abnahme der Auslaugbarkeit des Chroms während der Alterung von im Straßenbau eingesetzten Stahlwerksschlacken [20]. Diese Entwicklung wurde auch in eigenen Studien beobachtet [15], wobei die von Suer et al. thermodynamisch postulierten Sekundärphasen auch hier mangels hoch ortsauflösender Methoden (z.B. Transmissionselektronenmikroskopie) nicht nachgewiesen werden konnten.

Bei der inkongruenten Auflösung von vanadiumführendem Larnit ($\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$) kommt es zu einer partialen, zeitlich begrenzten Freisetzung von Vanadium und zur Wiedereinbindung in sekundäre Vanadatminerale wie z.B. Calciodelrioit ($\text{Ca}(\text{VO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), deren Löslichkeit dann die Auslaugbarkeit von Stahlwerksschlacken bestimmt [9]. Ebenso kann das Auftreten von $\text{Ca}_2\text{V}_2\text{O}_7$ in einer auf einer Halde entnommenen LD-Schlacke [1] auf sekundäre Alterationsprozesse zurückgeführt werden. Im Gegensatz zur Auslaugbarkeit des Chroms erhöhte sich die des Vanadiums mit zunehmender Alterung in einer Studie, wobei dieses Ergebnis anderen Arbeiten widerspricht [20]. Die Untersuchung des Auslagungsverhaltens von Vanadium aus Stahlwerksschlacken unter besonderer Berücksichtigung der Grenzflächenmineralogie bzw. der Sekundärmineralbildungen ist somit eine wichtige offene Frage.

4. Modifizierung von Stahlwerksschlacken

Die Kenntnis der Bildungsbedingungen spezifischer Mineralphasen, die umweltrelevante Elemente wie Cr, Mo und V fest und dauerhaft binden, ermöglicht somit die maßgeschneiderte Produktion von Schlacken. Parameter, die hierbei eine Rolle spielen, sind z.B. die Abkühlrate [18], die Sauerstoffugazität [17], das CaO/SiO₂-Verhältnis und der Mg-Gehalt im System [6]. Demzufolge können durch thermochemische Behandlung von Stahlwerksschlacken Metalle nicht nur in eine noch weniger auslaugbare, sondern auch in eine besser rückgewinnbare Form überführt werden [2].

5. Zusammenfassung und Ausblick

Das Auslagverhalten von Stahlwerksschlacken lässt sich auf die mineralogische Zusammensetzung zurückführen, wobei die Elementverteilung zwischen und innerhalb primärer sowie sekundärer Mineralphasen eine entscheidende Rolle spielt. Gesamtgehalte lassen hingegen keinen Rückschluss auf das Auslagverhalten zu, während Auslagerversuche einen notwendigen, aber nicht hinreichenden Ansatz zum Verständnis und zur Beurteilung des Auslagverhaltens von Stahlwerksschlacken darstellen. Am Beispiel der äußerst geringen Auslagbarkeit von Chrom aus Stahlwerksschlacken, in denen dieses in gewöhnlichen (Mg,Fe)(Cr,Al)₂O₄-Spinellen gebunden ist, zeigt sich, dass die Mineralogie einen zentralen Beitrag zum Verständnis des Auslagverhaltens von Schlacken erbringen kann. Andererseits bestehen trotz der umfassenden existierenden wissenschaftlichen Erkenntnisse über diese Zusammenhänge gewisse offene Fragen, z.B. bezüglich der Auswirkung der Substitution von Sauerstoff durch Fluor in Spinellstrukturen auf die Auslagbarkeit, aber auch im Hinblick auf die Mineralogie und Auslagbarkeit von Vanadium.

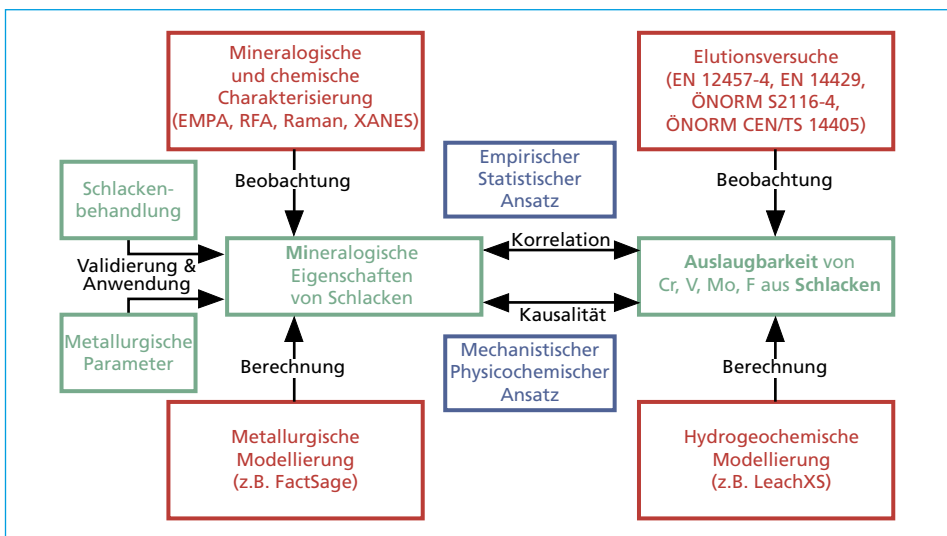


Bild 3: Projektskizze des geplanten Forschungsprojekts *MiLeSlag – Mineralogy and Leachability of Steel Slags*

Diese sollen in einem Forschungsprojekt *MiLeSlag – Mineralogy and Leachability of Steel Slags* beantwortet werden, um ein konsistentes und fundiertes Modell zu erstellen, das – durch thermodynamische Modellierung gestützt und durch empirische Beobachtungen validiert – erklärt, wie welche mineralogischen Charakteristika von Stahlwerksschlacken das Auslaugverhalten welcher Elemente unter welchen hydrogeochemischen Bedingungen steuern. Derartige Erkenntnisse können langfristig angewandt werden, um durch entsprechende Konditionierung bereits bei der Produktion im Sinne des *Ökodesigns von Stahlwerksschlacken* deren Auslaugbarkeit zu minimieren und ihren Einsatz als ressourcenschonenden, umweltfreundlichen Baustoff nachhaltig gewährleisten (Bild 3).

6. Literatur

- [1] Aarabi-Karaszani, M., et al.: Leaching of vanadium from LD converter slag using sulfuric acid. *Hydrometallurgy*. Bd. 102, 1-4, S. 14-21, 2010
- [2] Adamczyk, B., et al.: Recovery of chromium from AOD-converter slags. *steel research int.* Bd. 81, 12, S. 1078-1083, 2010
- [3] Aldrian, A., et al.: Assessment of the Mobility of Chromium in a Quality Assured Electric Arc Furnace Slag. *Environmental Abstracts. Eighth Annual International Conference on Environment*. S. 15-16, 2013
- [4] Ball, J. und Nordstrom, D.: Critical evaluation and selection of standard state thermodynamic properties for chromium metal and its aqueous ions, hydrolysis species, oxides, and hydroxides. *Journal of Chemical & Engineering Data*. Bd. 43, 6, S. 895-918, 1998
- [5] Bundesrepublik Deutschland: Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage (Versatz-Verordnung - VersatzV), 24.07.2002
- [6] Cabrera-Real, H., et al.: Effect of MgO and CaO/SiO₂ on the immobilization of chromium in synthetic slags. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. Bd. 14, S. 317-324, 2012
- [7] Chaurand, P., et al.: Environmental impacts on steel slag reused in road construction: A crystallographic and molecular (XANES) approach. *Journal of Hazardous Materials*. Bd. B 139, S. 537-542., 2007
- [8] Choi, W. und Manthiram, A.: Influence of fluorine on the electrochemical performance of spinel LiMn_{2-y}-zLi_yZn_zO_{4-η} F_η cathodes. *Journal of the Electrochemical Society*. Bd. 154, 7, S. 614, 2007
- [9] Cornelis, G., et al.: Leaching mechanisms of oxyanionic metalloid and metal species in alkaline solid wastes: A review. *Applied Geochemistry*. Bd. 23, S. 955-976, 2008
- [10] de Windt, L., Chaurand, P. und Rose, J.: Kinetics of steel slag leaching. *Waste Management*. Bd. 31, 2, S. 225-235, 2011
- [11] Drissen, P.: Eisenhüttenschlacken – industrielle Gesteine. Report des FEH-S – Institut für Baustoff-Forschung. Bd. 1, S. 5, 2004
- [12] Drissen, P. und Mudersbach, D.: Entwicklung von Baustoffen aus Edelschlacken für Flächenanierung und Deponiebau. FEH-S - Institut für Baustoffforschung. Bd. 19, S. 1-6, 2012
- [13] Engström, F., et al.: A Study of the Solubility of Pure Slag Minerals. *MINerals Engineering*. Bd. 41, S. 46-52, 2013
- [14] Gougar, M., Scheetz, E. und Roy, D.: Ettringite and C-S-H Portland cement phases for waste immobilization: A review. *Waste Management*. Bd. 16, 4, S. 295-303, 1996

- [15] Höllen, D., et al.: Mineralogy and Leachability of Iron and Steel Work Slags. Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft. Bd. 159, S. 67, 2013
- [16] Höllen, D., et al. submitted: Umwelttechnische Aspekte des Einsatzes von Schlacken als Versatz im Bergbau. Mining. submitted.
- [17] Lee, H-H., Kwon, S.-J. und Jang, S.-U.: Effects of PO₂ at Flux State on the Fluorine Dissolution from Synthetic Steelmaking Slag in Aqueous Solution. ISIJ International. Bd. 50, 1, S. 174-180, 2010
- [18] Loncnar, M., et al.: The Effect of Water Cooling on the Leaching Behaviour of EAF Slag from Stainless Steel Production. Materials and Technology. Bd. 43, 6, S. 315-321, 2009
- [19] Oze, C., Bird, D. und 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. Bd. 104, S. 6544-6549, 2007
- [20] Suer, P., et al.: Reproducing ten years of road ageing - Accelerated carbonation and leaching of EAF steel slag. Science of the Total Environment. Bd. 407, S. 5110-5118, 2009
- [21] van Zomeren, A., et al.: Changes in mineralogical and leaching properties. Waste Management. Bd. 31, 11, S. 2236-2244, 2011

Planung und Umweltrecht



Planung und Umweltrecht, Band 1

Herausgeber: Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Andrea Verstejl
Erscheinungsjahr: 2008
ISBN: 978-3-935317-33-7
Hardcover: 199 Seiten

Planung und Umweltrecht, Band 4

Herausgeber: Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Andrea Verstejl
Erscheinungsjahr: 2010
ISBN: 978-3-935317-47-4
Hardcover: 171 Seiten

Strategie Planung Umweltrecht, Band 7

Herausgeber: Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Andrea Verstejl
Erscheinungsjahr: 2013
ISBN: 978-3-935317-93-1
Hardcover: 171 Seiten, mit
farbigen Abbildungen

Planung und Umweltrecht, Band 2

Herausgeber: Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Andrea Verstejl
Erscheinungsjahr: 2008
ISBN: 978-3-935317-35-1
Hardcover: 187 Seiten

Planung und Umweltrecht, Band 5

Herausgeber: Karl J. Thomé-Kozmiensky
Erscheinungsjahr: 2011
ISBN: 978-3-935317-62-7
Hardcover: 221 Seiten

Strategie Planung Umweltrecht, Band 8

Herausgeber: Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Andrea Verstejl
Erscheinungsjahr: 2014
ISBN: 978-3-944310-07-7
Hardcover: 270 Seiten, mit
farbigen Abbildungen

Planung und Umweltrecht, Band 3

Herausgeber: Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Andrea Verstejl
Erscheinungsjahr: 2009
ISBN: 978-3-935317-38-2
Hardcover: 209 Seiten

Planung und Umweltrecht, Band 6

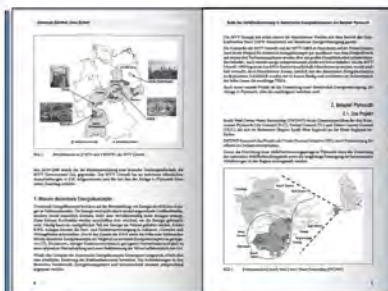
Herausgeber: Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Andrea Verstejl
Erscheinungsjahr: 2012
ISBN: 978-3-935317-79-5
Hardcover: 170 Seiten

Paketpreis

Planung und Umweltrecht, Band 1 bis 6;
Strategie Planung Umweltrecht, Band 7-8

125,00 EUR
statt 200,00 EUR

Einzelpreis: 25,00 EUR



Bestellungen unter www.vivis.de
oder

Dorfstraße 51
D-16816 Nietwerder-Neuruppin
Tel. +49.3391-45.45-0 • Fax +49.3391-45.45-10
E-Mail: tkverlag@vivis.de

vivis
TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky