

The Use of Unbound Steel Slag – Risk Prevention and Provision of Resources –

Michael Dohlen

Considerable quantities of mineral materials are required each year for paving and the construction of unbound forest and rural roads. For reasons of resource conservation, it would be sensible to use quality-controlled secondary raw materials e.g. steel slags, in order to reduce the use of mineral-based raw materials. However, the relevant authorities often regard the use of unbound construction methods using steel slags as being problematic, because there is a fear that it could influence the soil-human exposure pathway. In order to test whether there is an environmental effect, the use of steel slags has been discussed from the precautionary principle point of view. The low precautionary and test values of the German Federal Directive on Soil Purity and the assignment criteria of the LAGA Notice 20 (Technical Rules Soil) were used as a measure of risk. Based on the chemical tests on several basic oxygen furnace slags (BOFS) and electric arc furnace slags (EAFS), it could be proved that, with the exception of total chromium, the results considerably undershot the requirements for inorganic and organic contaminants. For a differential analysis, the chromium (VI) contents and the bioavailable (resorptive) chromium portion were also determined, because the total chromium content does not support any direct conclusions about the dangers. The results show that the toxicologically significant chromium (VI) was not proven in the tested steel slags, and the resorptive chromium content is significantly below the test values for sensitive uses. To assess the provisions for conservation of resources through the use of steel slags, a current life cycle assessment was undertaken by the Fraunhofer Project Group for Materials Recycling and Resource Strategies – IWKS, that sees the current utilisation paths of thyssenkrupp basic oxygen furnace slags in a more positive light than a substitution by primary rocks.

Verwendung von Stahlwerksschlacken in ungebundener Bauweise – Risiko- und Ressourcenvorsorge –

Michael Dohlen

1.	Eigenschaften und Verwendung von Stahlwerksschlacken.....	268
2.	Ergebnisse und Diskussion	271
3.	Zusammenfassung und Ausblick.....	277
4.	Quellen	279

In Deutschland werden jährlich mehrere Millionen Tonnen mineralische Baustoffe für den ungebundenen, d.h. nicht abgedeckten Feld- und Waldwegebau sowie zur Flächenbefestigung im Erdbau benötigt. Bei diesen Bau- und Instandsetzungsmaßnahmen handelt es sich entweder um öffentliche oder nicht-öffentliche Baumaßnahmen, bei denen die Baulast entweder bei den Ländern, Kommunen oder bei privaten Grundstückseigentümern liegt.

Um zu veranschaulichen, welche Baustoffmengen z.B. im Wegebau benötigt werden, folgt ein einfaches Beispiel:

Beispiel Wegebau: Für den Bau eines typischen Waldwegs werden pro Quadratmeter rund 0,20 m Schichtaufbau angenommen. Bezogen auf 1.000 m Länge mit einer Wegebreite von 3,50 m werden dafür 700 m³ Material gebraucht. Bei einer Körnung 0/45 mm mit einer angenommenen Dichte von 1,60 t/m³ werden unter Berücksichtigung der Verdichtung etwa 1.290 Tonnen benötigt. Die Materialmenge verdoppelt sich, wenn eine Schichtdicke von 0,40 m realisiert wird.

Für diesen beispielhaften Weg muss mindestens die gleiche Menge – in Abhängigkeit von der Dichte des Gesteins – an Primärrohstoffen in Steinbrüchen gewonnen werden, wenn beispielsweise Hartkalkstein eingesetzt werden soll. Dabei stößt die Gewinnung von Gesteinsrohstoffen aus Umwelt- und Naturschutzgründen in Deutschland zunehmend an ihre Grenzen, so dass neben *heimischen* Ressourcen jährlich zusätzlich große Mengen Natursteine, also natürliche Festgesteine, wie Granit oder Basalt, aus dem Ausland – vor allem aus Skandinavien und Schottland – importiert werden müssen. Erschwert wird die Rohstoffversorgung zusätzlich in wirtschaftlich guten Zeiten, weil die Gewinnung von Natursteinen nicht im gleichen Maße wie die Nachfrage zu steigern und oft genehmigungsrechtlich begrenzt ist.

Außerdem ist es bis heute keine Seltenheit, dass im Wald- und landwirtschaftlichen Wegebau häufig unzerkleinerter oder unsortierter Bauschutt, kontaminiertes Abbruchmaterial (asbesthaltige Faserzementprodukte, wie z.B. Fassaden- und Eternitplatten, teerhaltige Beläge, PCB-haltige Anstriche) und andere Materialien als Tragschichtmaterial verwendet werden (Bild 1). Dabei handelt es sich eindeutig um Abfälle im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes [18]. Im Gegensatz zu aufbereiteten und güteüberwachten Baustoffen kann es hier zu einem unkontrollierten Eintrag von Schadstoffen in den Boden und das Grundwasser kommen und stellt Vollzugsbehörden oftmals vor Probleme.



Bild 1: Unerlaubter Wegebau im ländlichen Raum mit unsortiertem Bauschutt

Foto: private Aufnahme

Angesichts der geschilderten Probleme erscheint es ökologisch sinnvoll, auch güteüberwachte Ersatzbaustoffe – besser Sekundärbaustoffe – als gleichberechtigte Baustoffe neben mineralischen Primärmaterialien einzusetzen. Bei technischer und umweltrechtlicher Eignung können diese industriell hergestellten Baustoffe Eingriffe in die Natur reduzieren und einen Beitrag zur Senkung des Flächenverbrauchs und von CO₂-Emissionen leisten [11].

Bewährte Sekundärbaustoffe sind beispielsweise Stahlwerksschlacken, die mit einer langen Tradition – insbesondere wegen der guten technischen Eignung und der umweltverträglichen Eigenschaften – im Verkehrswege- und Erdbau verwendet werden [10].

Dessen ungeachtet wird von Umweltbehörden, z.B. dem vorsorgenden Bodenschutz oder dem Naturschutz, die Verwendung von güteüberwachten Stahlwerksschlacken und anderen Sekundärrohstoffen in oberflächennahen Bauweisen häufig kritisch gesehen und abgelehnt. Der Grund aus Sicht der Behörden ist die Befürchtung, dass es durch den Einbau zu einem Risiko für den Wirkungspfad Boden-Mensch oder zum Entstehen einer schädlichen Bodenveränderung kommt [vgl. 17].

Beispielsweise wird bei LD-Schlacken der basische pH-Wert kritisch gesehen, weil dadurch die ökologische Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts im nahen Umfeld einer Baumaßnahme beeinflusst werden könnte. Allerdings sinkt der temporär erhöhte pH-Wert durch Karbonatisierungsreaktionen der Schlacke schon nach einer kurzen Bodenpassage. Generell ist zu bedenken, dass jede Herstellung eines technischen Bauwerks aus nicht direkt vor Ort vorkommenden Baustoffen – dazu zählt beispielsweise auch der Einbau von natürlichem dolomitischen Kalkstein mit basischen pH-Werten von bis zu pH 10,5 – zwangsläufig zu einer Beeinflussung des Naturhaushalts führt.

Im Folgenden soll insbesondere der Frage nachgegangen werden, welche Auswirkungen von der Verwendung von Stahlwerksschlacken in ungebundener Bauweise auf den Wirkungspfad Boden-Mensch auftreten können. Obwohl es sich bei Stahlwerksschlacken nicht um Bodenmaterial, sondern um einen mineralischen Baustoff handelt, wird hier der eingeführte Begriff *Wirkungspfad Boden-Mensch* verwendet.

Risiko- und Ressourcenvorsorge

Auch für die Verwendung von Baustoffen gilt das Vorsorgeprinzip als wichtige Leitlinie der deutschen und europäischen Umweltpolitik [26]. Es soll durch vorausschauendes Handeln bereits frühzeitig verhindern, dass Gefahren und Belastungen für die Umwelt überhaupt erst entstehen.

Das Vorsorgeprinzip beinhaltet die beiden Dimensionen Risiko- und Ressourcenvorsorge:

Risikovorsorge: Bei unvollständigem oder unsicherem Wissen über Art, Ausmaß, Wahrscheinlichkeit sowie Kausalität von Umweltschäden und -gefahren vorbeugend zu handeln, um diese von vornherein zu vermeiden.

Ressourcenvorsorge: Schonender Umgang mit den natürlichen Ressourcen wie Wasser, Boden und Luft, um sie langfristig zu sichern und im Interesse künftiger Generationen zu erhalten.

Dieses Prinzip ermöglicht es beispielsweise Behörden, Situationen der Ungewissheit rechtlich zu bewältigen. Das bedeutet, dass staatliche Institutionen in Situationen der Ungewissheit, z.B. wegen unsicherer oder unvollständiger wissenschaftlicher Erkenntnisse, nicht abwarten müssen, bis endgültige Gewissheit besteht, sondern sie können unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit auf den Besorgnisanlass reagieren [26]. Wie das zu geschehen hat, legt das Vorsorgeprinzip aber nicht im Einzelnen fest.

Die Auswahl der möglichen Reaktionen reicht dabei von Maßnahmen, die der reinen Informationsgewinnung dienen, bis zur Untersagung einer bestimmten Handlung – z.B. den Einbau bestimmter Baustoffe. Generell kann das Vorsorgeprinzip das Beweismaß herabsetzen und erlauben, die Beweislast zu verlagern, weil staatliches Handeln nicht der Überzeugung bedarf, dass ein Risiko tatsächlich vorliegt. Es reichen plausible oder ernsthafte Anhaltspunkte für ein Umweltrisiko. Wenn diese vorliegen, ist es Sache des Risikoverursachers, die begründeten Anzeichen für bestimmte Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu widerlegen und die der Besorgnis unterliegenden Annahmen zu erschüttern [26].

Der Besorgnisgrundsatz und die im Bundes-Bodenschutzgesetz verankerte Vorsorgepflicht sind ein wichtiger Garant, um Gefahren für die Umwelt bereits frühzeitig zu verhindern. Allerdings dürfen sie nicht dafür genutzt werden, um Sekundärrohstoffe generell für bestimmte Bauweisen auszuschließen, wenn ausreichende Informationen für eine risikolose Verwendung vorliegen. Die Vorsorgepflicht muss auch die Vorsorge im Hinblick auf die natürlichen Ressourcen und die Beachtung der Grundsätze der Kreislaufwirtschaft beachten.

An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass der Autor nicht beabsichtigt, unterschiedliche Umweltbelange (z.B. Ressourcenschonung) bzw. Schutzgüter (Boden, Wasser, Luft sowie Pflanzen und Tiere) gegeneinander aufzurechnen, sondern eine Grundlage für eine fachgerechte Diskussion über die schadlose Verwendung von Stahlwerksschlacken unter Einhaltung des Vorsorgeprinzips anzubieten.

1. Eigenschaften und Verwendung von Stahlwerksschlacken

Stahlwerksschlacken (Bild 2) entstehen als mineralisches Nebenprodukt bei der Herstellung von Stahl entweder nach dem Linz-Donawitz-Verfahren im LD-Konverter (LD-Schlacke, LDS) oder beim Einschmelzen von Schrott im Elektrolichtbogenofen (Elektroofenschlacke, EOS).

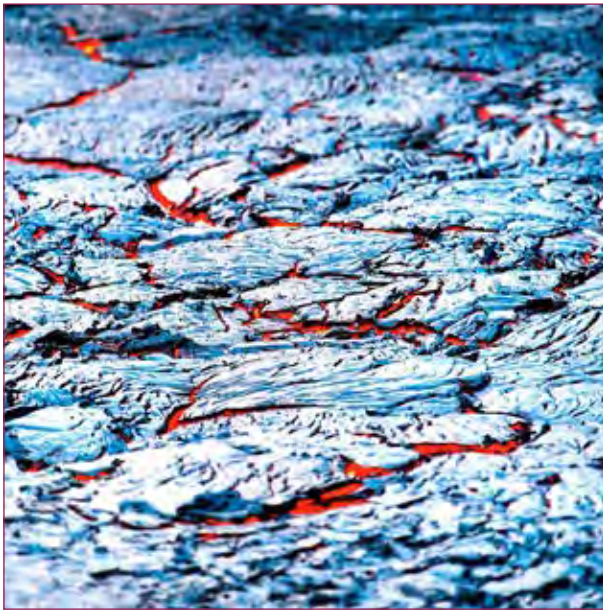


Bild 2:

Lava-ähnliche Abkühlung einer Stahlwerksschlacke

Foto:
Thyssenkrupp Materials International

In Deutschland wurden 2016 rund 5,12 Mio. Tonnen Stahlwerksschlacken produziert [23], davon etwa 3,11 Mio. Tonnen bei der LD-Stahlerzeugung, was einen Anteil an der Gesamtmenge von fast sechzig Prozent darstellt.

Chemische Eigenschaften

Die Hauptbestandteile von Stahlwerksschlacken setzen sich im Wesentlichen aus in verschiedenen Mineralphasen gebundenem Calciumoxid, Siliciumoxid, Aluminiumoxid und Eisenoxid zusammen. Hinzu kommen oxidierte Anteile von verschiedenen Begleitelementen.

Aufgrund der Entstehung und der Einsatzstoffe bei der Stahlerzeugung können Stahlwerksschlacken, ebenso wie verschiedene Naturgesteine, höhere Schwermetall-Gehalte – beispielsweise das Schwermetall Eisen – aufweisen. Besonders das Metall Chrom spielt

für viele Stahlqualitäten eine wichtige Rolle und liegt darum auch als Nebenbestandteil in Stahlwerksschlacken vor. Anorganische Schadstoffe und Schwermetalle, wie zum Beispiel Arsen, Blei, Kupfer und Nickel, können aus metallurgischen Gründen nicht oder nur in sehr geringen Gehalten in Stahlwerksschlacken enthalten sein. Organische Schadstoffe, wie beispielsweise polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierte Biphenyle (PCB) und Dioxine (PCDD/PCDF), sind wegen der hohen Entstehungstemperaturen von über 1.600 °C überhaupt nicht vorhanden.

Während für Bodenuntersuchungen üblicherweise Feststoffgehalte gemäß BBodSchV [3] oder LAGA TR Boden [21] herangezogen werden, wird für die Verwendung von Sekundärbaustoffen i.d.R. eine Prüfung der Umweltverträglichkeit hinsichtlich der auslaugbaren Stoffe gefordert, die in bundeslandspezifischen Umsetzungen geregelt sind. Als Prüfverfahren kommen überwiegend Schüttelverfahren gemäß den Technischen Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau zur Verwendung [15]. Auf der Grundlage von umweltrelevanten Inhaltsstoffen, die im Eluat bestimmt werden, wird die Zulassung/wasserrechtliche Genehmigung für eine konkrete Baumaßnahme erteilt. Im Allgemeinen ist die Freisetzung (Auslaugung) der meisten Schwermetalle sehr niedrig, was wissenschaftliche Studien [13, 19] und aktuelle Ergebnisse aus der Güteüberwachung zeigen (Tabelle 1).

Parameter	Einheit	LDS	EOS
pH-Wert	–	12,2	11,1
Arsen	mg/l	< 0,005	< 0,005
Blei	mg/l	< 0,005	< 0,005
Cadmium	mg/l	< 0,0005	< 0,0005
Chrom gesamt	mg/l	< 0,005	< 0,005
Chrom (VI)	mg/l	< 0,005	< 0,005
Kupfer	mg/l	< 0,005	< 0,005
Nickel	mg/l	< 0,005	< 0,005
Quecksilber	mg/l	< 0,0002	< 0,0002
Zink	mg/l	< 0,005	< 0,005
Chlorid	mg/l	< 1,0	< 1,0
Sulfat	mg/l	< 5,0	< 5,0

Tabelle 1:

Charakteristische Eluat-Konzentrationen von LD-Schlacke (LDS) und Elektroofenschlacke (EOS) (Schüttelverfahren W/F 10:1; Körnung 8/11 mm)

Bautechnische Eigenschaften

Stahlwerksschlacken können, je nach Prozessfahrweise im Stahlwerk oder durch die Behandlung der schmelzflüssigen Schlacke [12], Unterschiede in den bautechnischen Eigenschaften aufweisen. Allgemein gilt, dass sich aufgrund der kubischen Kornform und der rauen Oberfläche eine gute Verzahnung zwischen den Körnern ausbildet, was eine hohe Tragfähigkeit und Formstabilität zur Folge hat. Weiterhin lassen sich Stahlwerksschlacken unkompliziert einbauen und sofort befahren. Ein Vorteil von LD-Schlacken ist, dass sie sich wegen der hydraulischen Eigenschaften bei wassergebundenen Bauweisen oberflächlich schnell verfestigen. Diese Selbsterhärtung bewirkt eine zusätzliche Verbesserung der Tragfähigkeit und erhöht die Standzeit eines technischen Bauwerks. Die positiven technischen Eigenschaften spielen auch in Hinblick auf die

Umweltverträglichkeit eine wichtige Rolle: Einerseits wird durch die Selbsterhärtung die Wasserdurchlässigkeit gesenkt, so dass weniger Wasser in die Tragschicht eindringen kann und leicht lösliche Bestandteile, wie z.B. Calcium, ausgewaschen werden, die den pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit erhöhen. Andererseits wird die Verstaubungsneigung durch das oberflächliche Abbinden gesenkt [1].

Für die Verwendung im Erdbau werden vor allem Baustoffgemische in den Körnungen 0/32 mm, 0/45 mm oder 0/63 mm eingesetzt. Splittkörnungen aus stabilisierter LD-Schlacke und Elektroofenschlacke werden bevorzugt für bituminöse Anwendungen genutzt. In Tabelle 2 sind charakteristische Kennwerte für Stahlwerksschlacken aufgeführt.

Parameter	Einheit	LDS	EOS
Rohdichte	t/m ³	3,4	3,6
Schüttdichte	t/m ³	1,4	1,5
Proctordichte	t/m ³	2,3	2,4
Druckfestigkeit	N/mm ²	200	200
Widerstand gegen Zertrümmerung: Schlagzertrümmerungswert	Ma.-%	< 18	< 18
Widerstand gegen Frostbeanspruchung: Frostwiderstand	Ma.-%	< 0,5	< 0,5
Anteil ungünstig geformter Körner	Ma.-%	< 10	< 10

Tabelle 2:

Charakteristische bautechnische Kennwerte von LD-Schlacke (LDS) und Elektroofenschlacke (EOS)

Verwendung von Stahlwerksschlacken in ungebundener Bauweise

Unter dem Begriff offener oder ungebundener Einbau werden Bauweisen im Erdbau mit ungebundenen Baustoffgemischen ohne zusätzliche bituminöse Befestigung oder hydraulische Bindemittel, wie Kalk oder Zement, verstanden.

Voraussetzung für ungebundene Baumaßnahmen ist, dass die Baumaterialien sowohl den technischen als auch den rechtlichen Anforderungen entsprechen. Insbesondere müssen sie neben der Umweltverträglichkeit eine entsprechende Festigkeit und Verwitterungsbeständigkeit (Frostsicherheit) gewährleisten. Um diese Voraussetzungen zu erfüllen, unterliegen Stahlwerksschlacken einer Güteüberwachung. Durch regelmäßige Prüfungen der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) und durch eine Fremdüberwachung bzw. freiwillige Güteüberwachung wird sichergestellt, dass die eingesetzten Gesteinskörnungen und Baustoffgemische aus Stahlwerksschlacken die unterschiedlichen Anforderungen erfüllen.

Die spezifischen bautechnischen Erfordernisse werden in den entsprechenden Technischen Lieferbedingungen und den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen sowie verschiedenen (regionalen) Merkblättern beschrieben.

Verwendungsbeispiele Wegebau und Flächenbefestigung

Haupteinsatzgebiete von Stahlwerksschlacken sind der Straßen-, Wege- und Erdbau. Insbesondere im Erdbau und für ungebundene Schichten des Oberbaus werden überwiegend LD-Schlacken und teilweise auch Elektroofenschlacken verwendet.

Auf die Darstellung der Verwendung von Stahlwerksschlacken im Straßen-, Wasser- und Deponiebau wird an dieser Stelle verzichtet. Eine ausführliche Darstellung zur Verwendung von LD-Schlacke ist in [10] beschrieben.

Baustoffgemische aus LD-Schlacke werden bevorzugt im Wege- und Flächenbau eingesetzt, wo die technischen Bauwerke langfristig hohen Belastungen, z.B. durch Schwerlastverkehr bei der Holzabfuhr oder der Montage von Windrädern, ausgesetzt sein können (Bild 3 und 4). Gegenüber Natursteinen zeigt sich bei LD-Schlacken häufig eine höhere Standfestigkeit und Tragfähigkeit, weil sie sich besser verdichten lassen. Weiterhin tragen die physikalischen Eigenschaften von Stahlwerksschlacken dazu bei, dass Profilveränderungen durch Auswalken von Fahrspuren nur sehr selten anzutreffen sind.



Bild 3:

Ungebundener Waldweg aus LD-Schlacke

Foto: R. Perret

Im landschaftlichen Flächenbau, z.B. für Aufstell- oder Abstellflächen und für Untergrundstabilisierungen, ist LD-Schlacke zur Herstellung von standfesten Tragschichten für hohe Lastaufnahmen besonders gut geeignet, wie Bild 4 zeigt.



Bild 4:

Aufstellfläche und Zufahrtswege aus LD-Schlacke für den Bau eines Windparks

Foto: R. Perret

2. Ergebnisse und Diskussion

Damit die Verwendung von Stahlwerksschlacken in ungebundenen Bauweisen vor dem Hintergrund des Vorsorgeprinzips fachlich besser bewertet werden kann, werden im

Weiteren die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zur Risiko- und Ressourcenvorsorge vorgestellt und diskutiert.

Ressourcenvorsorge

Um die wissenschaftliche Grundlage aus der Sicht der Ressourcenvorsorge zu vergrößern, hat die Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie (IWKS) eine Ökobilanz-Studie zu den Umweltwirkungen der verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten von LD-Schlacke der thyssenkrupp Steel AG erstellt [11, 16].

Im Fokus der Studie stand die Frage, welche Auswirkungen es hätte, wenn LD-Schlacke deponiert und durch Primärrohstoffe ersetzt werden müsste. Das IWKS kommt zu dem Ergebnis, dass die Umwelt stärker belastet werden würde, wenn man auf die Nutzung güteüberwachter LD-Schlacken verzichtete und dafür natürliche Rohstoffe einsetzen müsste. Der zusätzliche Ausstoß von Treibhausgasen würde jährlich rund 10.000 bis 13.000 Tonnen CO₂ betragen, da in diesem Fall ein zusätzlicher Primärabbau von Gesteinen und die Deponierung der Schlacken verbunden mit einem Flächenmehrverbrauch erforderlich wären. Das entspricht etwa 32 bis 41 Millionen Kilometer Autofahrten im PKW (Euro-5-Norm), der Produktion von 15 bis 19 Millionen kWh Strom (Produktionsmix 2012 in Deutschland) oder der Speicherkapazität von 800 bis 1.000 Hektar Wald. Eine weitere Ökobilanz-Studie des Clausthaler Umwelttechnik-Instituts (CUTEC) für verschiedene metallurgische Schlacken kommt zu ähnlichen Ergebnissen [vgl. 7].

Risikovorsorge

Um abschätzen zu können, ob durch den ungebundenen Einbau von Stahlwerksschlacken negative Beeinflussungen des Wirkungspfades Boden-Mensch zu befürchten sind, werden nachfolgend Untersuchungen vorgestellt, die über die regelmäßigen Untersuchungen im Rahmen der Güteüberwachung hinausgehen.

Auch technische Bauwerke, wie Wege aus Stahlwerksschlacken, können in bestimmten Fallgestaltungen den Anforderungen des Bodenschutzrechts unterliegen und müssen dann die materiell-rechtlichen Anforderungen der BBodSchV erfüllen. Darum werden Anforderungen aus dem vorsorgenden Bodenschutz herangezogen, um die Basis für ein differenziertes Bild der potentiellen Umweltwirkungen bei der Verwendung in ungebundener Bauweise zu erlangen. Für die Beurteilung, ob durch die Verwendung von Stahlwerksschlacken das Risiko einer schädlichen Bodenveränderung zu besorgen ist, werden nachfolgend die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen mit den derzeit gültigen anorganischen Parametern der Vorsorgewerte der BBodSchV, Stand 1999 [3] und der geplanten des Entwurfs der BBodSchV von 2017 [4] für die Bodenarten-Hauptgruppen Sand sowie die Zuordnungswerte der LAGA-Mitteilung 20, TR Boden (Feststoffe) [21] herangezogen. Diese höchsten Anforderungen, d.h. die niedrigsten Vorsorgewerte der Bodenarten-Gruppe Sand, verglichen mit den beiden anderen Bodenarten-Gruppen Lehm/Schluff und Ton, liefern die Bewertungsgrundlage als Maß für die Risikovorsorge. Unbeachtet bleiben regionale Hintergrundwerte eines Bodens, die sich aus dem geogenen Grundgehalt und der ubiquitären Stoffverteilung als Folge diffuser Einträge in den Boden zusammensetzen, die zu deutlich höheren

Schadstoffgehalten in Böden, auch oberhalb der Vorsorgewerte, führen können [2]. Vor diesem Hintergrund können die Ergebnisse dieser Untersuchung als *Worst-Case-Szenario* betrachtet werden.

Auswirkungen auf den Wirkungspfad Boden-Grundwasser werden hier nicht weiter vertieft, weil für jede Baumaßnahme mit Stahlwerksschlacken i.d.R. eine wasserrechtliche Genehmigung vor dem Einbau vorliegen muss. Darum wird im Weiteren nur der Wirkungspfad Boden-Mensch betrachtet.

Von Behördenseite aus existieren Befürchtungen, dass durch die Aufnahme von Schwermetallen aus Stahlwerksschlacken ein potentielles Risiko für den Menschen entsteht. Insbesondere das als kritisch gesehene Schwermetall Chrom kommt in unterschiedlichen Bindungsformen und Konzentrationen in Stahlwerksschlacken vor [6]. Darum wird oftmals bei der Interpretation einer Feststoffanalyse die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung angenommen oder beim sortenreinen Ausbau wird aus dem güteüberwachten und wasserrechtlich genehmigten Baustoff plötzlich ein gefährlicher Abfall. Allerdings ist seit Langem bekannt, dass der Chrom-Gesamtgehalt in Stahlwerksschlacken keine signifikanten Auswirkungen auf die Auslaugung und die Freisetzung von toxischem Chrom (VI) hat [13, 24].

Materialien und Untersuchungen

Die chemischen Untersuchungen fanden an mehreren güteüberwachten LD-Schlacken und Elektroofenschlacken verschiedener Hersteller aus Deutschland statt. Die Probenahmen erfolgten entweder gemäß LAGA PN 98 [22] oder nach DIN EN 932-1 [9] durch fachkundige Probenehmer. Nach der Probenaufbereitung wurden die Proben (< 63 µm) in einem akkreditierten Labor untersucht.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der untersuchten Schlackenproben zeigen, dass LD-Schlacken die strengen Anforderungen der Vorsorgewerte der BBodSchV für Sand und die Zuordnungswerte Z0 der LAGA TR Boden mit Ausnahme von Chrom gesamt sehr deutlich unterschreiten (Tabelle 3). Die untersuchten Elektroofenschlacken weisen verfahrensbedingt im Mittel etwas höhere Chrom- und Zink-Gehalte auf als die LD-Schlacken. Die mittleren Zn-Gehalte der EOS-Proben unterschreiten jedoch die Zuordnungswerte Z0 der LAGA TR Boden für Lehm/Schluff (150 mg/kg) und können darum als nicht kritisch betrachtet werden. Auch natürliche Festgesteine, beispielsweise basische Magmatite und Vulkaniklastite in Hessen, können höhere Schwermetallgehalte aufweisen. Im Mittel kommen Chrom-Gehalte von 399 mg/kg, Nickel-Gehalte von 249 mg/kg und Zink-Gehalte von 108 mg/kg vor [25].

Da Primärrohstoffe nicht hinsichtlich umweltrelevanter Parameter geprüft und zugelassen werden, können diese Gesteinsrohstoffe für ungebundene Baumaßnahmen verwendet werden, obwohl Grenzwerte gemäß vorsorgendem Bodenschutz deutlich überschritten werden. Damit wird deutlich, dass geogen erhöhte Schwermetallgehalte von der Gesetzgebung anders betrachtet werden als technologene, obwohl die Wirkung auf Mensch und Umwelt keinen Unterschied nach der Herkunft des Schadstoffs macht.

Die Ergebnisse der Eluat-Untersuchungen gemäß LAGA TR Boden ergaben nur bei den Prüfparametern pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit Überschreitungen, die aus Calcium-Verbindungen resultieren und damit unkritisch sind. Organische Bestandteile können in Stahlwerksschlacken wegen der sehr hohen Entstehungstemperaturen von über 1.600 °C nicht enthalten sein und müssen darum nicht bestimmt werden.

Tabelle 3: Vergleich der Vorsorgewerte der BBodSchV (1999) und des Entwurfs einer Neufassung BBodSchV (2017) für die Bodenarten-Hauptgruppe Sand sowie die Zuordnungswerte (Z0) der LAGA TR Boden mit den mittleren Gehalten von LD-Schlacken und Elektroofenschlacken

Parameter	Einheit	Vorsorgewert	Vorsorgewert (Entwurf 2017)	LAGA TR Boden	LDS (n = 8)	EOS (n = 4)
Arsen	mg/kg	–	10	10	< 1,0	< 1,0
Blei	mg/kg	40	40	40	10	13
Cadmium	mg/kg	0,4	0,4	0,4	< 0,20	< 0,20
Chrom gesamt	mg/kg	30	30	30	1.606	1.800
Chrom (VI)	mg/kg	–	–	–	< 1,0	< 1,0
Kupfer	mg/kg	20	20	20	< 5	< 5
Nickel	mg/kg	15	15	15	< 10	< 10
Quecksilber	mg/kg	0,1	0,2	0,1	< 0,05	< 0,05
Thallium	mg/kg	–	0,5	0,4	< 0,4	< 0,4
Zink	mg/kg	60	60	60	< 25	129

Aufgrund der Überschreitung und der großen Bedeutung für Stahlwerksschlacken wird im Folgenden das Metall Chrom ausführlicher betrachtet.

Chrom-Gehalte

Die toxikologische Bewertung von Chrom hängt weniger vom Gesamtgehalt ab, sondern vor allem von der Oxidationsstufe, in der Chrom vorliegt. Darum stellt der Gesamtgehalt kein direktes Gefährdungspotential dar. Zum Beispiel besteht nichtrostender Stahl aus 18 Prozent Chrom und 10 Prozent Nickel (1 Prozent sind 10.000 mg/kg) ohne dass es bei der Verwendung von Edelstahlbesteck zu einer Gefahr für den Menschen kommt. Weiterhin dürfen Chrom-Präparate als Nahrungsergänzungsmittel mit Konzentrationen von 500 µg/kg pro Tablette in der Europäischen Union frei verkauft werden.

Unbestreitbar spielt Chromat (Chrom (VI)) die entscheidende Rolle, weil es im Gegensatz zu Chrom (III) eine kanzerogene und mutagene Wirkung bei Menschen entwickeln kann [5; 20]. Diese wissenschaftliche Erkenntnis wird darum auch im Entwurf der Neufassung der BBodSchV [4] berücksichtigt. Dort heißt es für den Wirkungspfad Boden-Mensch: *Bei Überschreitung der Prüfwerte für Chrom gesamt ist der Anteil an Chrom (VI) zu messen und an Hand der Prüfwerte für Chrom (VI) zu bewerten.* Auch im Brandenburger Verwertungserlass für LD-Schlacke [14] wird ein maximaler Wert für Chrom (VI) im Feststoff festgelegt (≤ 180 mg/kg). Dort heißt es: *Ist in der jeweiligen Einbauklasse auch der Chrom-Gesamtgehalt im Feststoff zu bestimmen, so gilt dieser als eingehalten, wenn der vorgenannte Chrom (VI)-Gehalt nicht überschritten wird.*

Bezogen auf die untersuchten Schlackenproben bedeutet das, dass die Chrom (VI)-Gehalte in den untersuchten LD-Schlacken und Elektroofenschlacken immer sehr deutlich unterhalb der analytischen Nachweisgrenze von < 1,0 mg/kg lagen. Diese Ergebnisse decken sich mit den Aussagen einer aktuellen Studie aus Österreich [5], die anhand thermodynamischer Daten die Stabilität von Chromoxiden und die Bildung von Chrom (VI) in Stahlwerksschlacken untersucht hat. Abschließendes Ergebnis der Untersuchung war, dass in LD-Schlacken und Elektroofenschlacken aus der Qualitätsstahlerzeugung keine sechswertigen Chrom-Verbindungen (Chromat) festgestellt werden können.

Resorptionsverfügbarkeit von Chrom und Chrom (VI)

Für die Bewertung des Risikos beim Pfad Boden-Mensch ist auch die direkte Aufnahme von Stahlwerksschlacke im Hinblick auf Chrom zu prüfen, weil sie bei offenen Einbauweisen im Wege- oder Flächenbau potentiell möglich ist. Darum wurde an den LD-Schlacken und EOS-Proben auch der resorptionsverfügbare Chrom-Gehalt, d.h. der Anteil des Gesamtschadstoffgehalts, der tatsächlich über den menschlichen Magen-Darm-Trakt aufgenommen werden kann, bestimmt [8].

Der resorptive Chrom-Anteil betrug bei den untersuchten LD-Schlacken zwischen 0,6 und 3,7 Prozent und bei den Elektroofenschlacken zwischen 0,6 und 1,0 Prozent des Chrom-Gesamtgehalts (Bild 5 und 6).

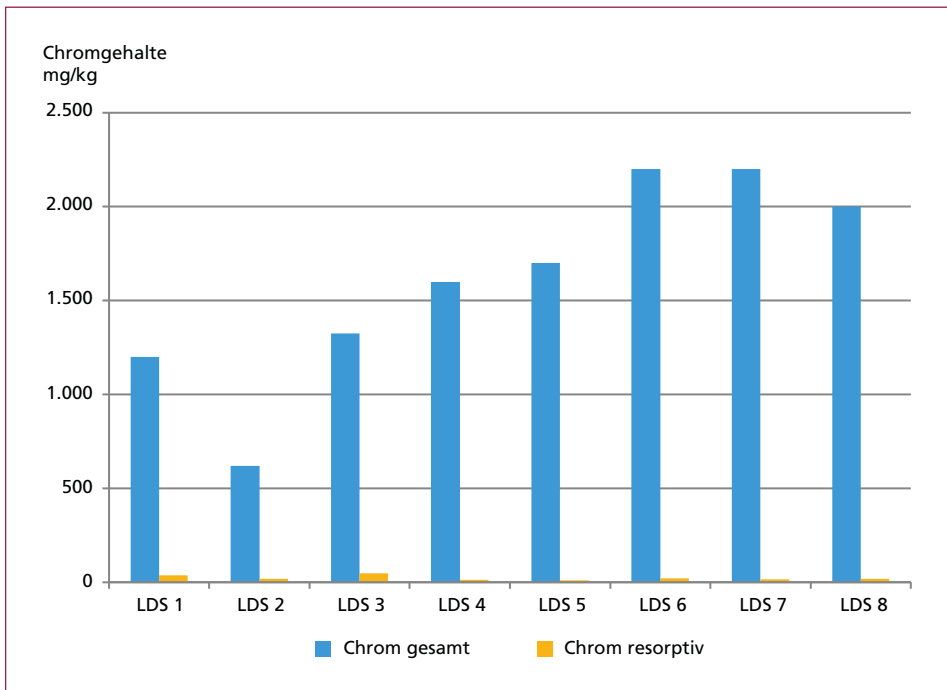


Bild 5: Chrom-Gesamtgehalte und resorptive Chrom-Gehalte in verschiedenen LD-Schlacken; Chrom (VI) lag immer unterhalb der Nachweisgrenze (< 1,0 mg/kg) und wird darum nicht dargestellt

Um das Gesamtrisiko durch anorganische Stoffe bei oraler Aufnahme zu untersuchen, wurden zusätzlich die Parameter Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom gesamt, Kobalt, Nickel, Quecksilber und Thallium sowie Cyanide untersucht. Das Ergebnis für die LD-Schlacken und die Elektroofenschlacken lautet, dass alle Parameter unterschreiten die Prüfwerte mit Ausnahme von Chrom sehr deutlich und liegen immer unter den Prüfwerten für die sensibelsten Nutzungen (Kinderspielflächen und Industrie- und Gewerbegrundstücke) der BBodSchV [3]. Zu berücksichtigen ist, dass Chrom (VI) immer unter der Nachweisgrenze lag und der resorptive Chrom-Anteil deutlich unter den Prüfwerten von 200 mg/kg für die sensibelsten Nutzungen.

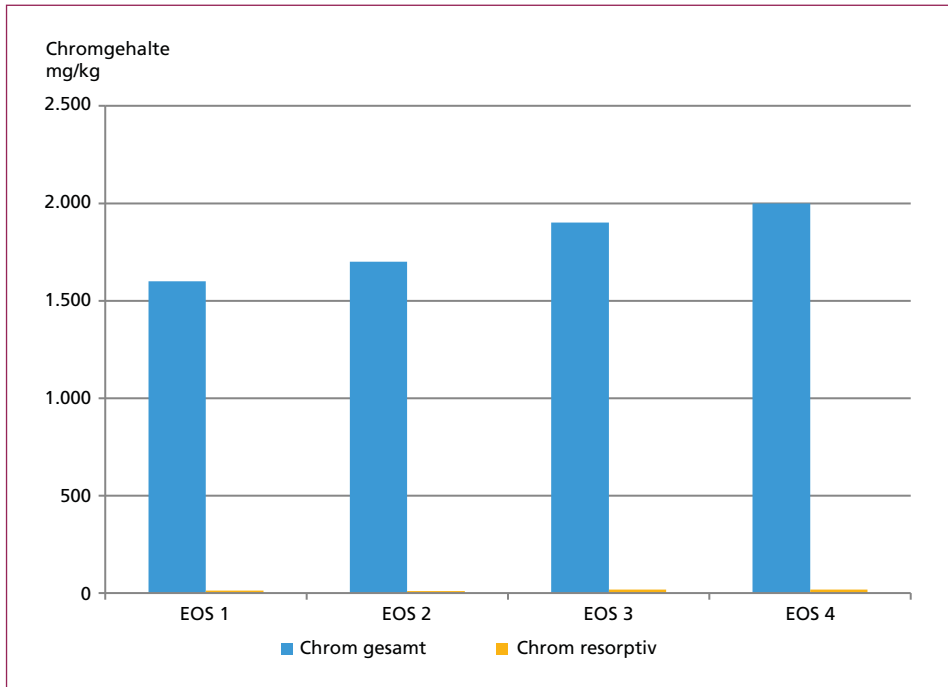


Bild 6: Chrom-Gesamtgehalte und resorptive Chrom-Gehalte in verschiedenen Elektroofenschlacken. Chrom (VI) lag immer unterhalb der Nachweisgrenze ($< 1,0$ mg/kg) und wird darum nicht dargestellt

Partikuläre Verlagerung von Stahlwerksschlacken

Außer der direkten Aufnahme ist auch die partikuläre Verlagerung von Baustoffen zu betrachten, um das potentielle Risiko für angrenzende Bereiche besser einschätzen zu können. Allerdings ist die Verlagerung von Material durch den Bau und den Gebrauch eines ungebundenen Weges messtechnisch sehr schwierig zu untersuchen und zu quantifizieren. Hinzu kommt, dass der anthropogene (Staub-)Hintergrundwert sehr hoch sein kann, was die Unterscheidung nach der Quelle der Staubemissionen zusätzlich erschwert. Aus diesem Grund wird zurzeit ein Forschungsprojekt zu den „Auswirkungen von Stahlwerksschlacken im offenen Flächen- und Wegebau auf umliegende naturnahe Böden“ durchgeführt.

Tabelle 4: Prüfwerte der BBodSchV (1999) und des Entwurfs einer Neufassung der BBodSchV (2017) für die direkte Aufnahme von Schadstoffen auf Kinderspielflächen, in Wohngebieten, Park- und Freizeitanlagen und Industrie- und Gewerbegrundstücken sowie mittlere Konzentrationen von LD-Schlacken und Elektroofenschlacken

Parameter	Einheit	Kinderspielflächen	Wohngebiete	Park- und Freizeitanlagen	Industrie- und Gewerbegrundstücke	LDS (n = 8)	EOS (n = 4)
<i>Antimon</i>	mg/kg	50	100	250	250	< 5	< 5
Arsen	mg/kg	25	50	125	140	< 1,0	< 1,0
Blei	mg/kg	200	400	1.000	2.000	10	13
Cadmium	mg/kg	10	20	50	60	< 0,20	< 0,20
Chrom _{gesamt}	mg/kg	200	400	1.000 (400)	1.000 (200)	1.606	1.800
<i>Chrom (VI)</i>	mg/kg	130	250	250	130	< 1,0	< 1,0
<i>Kobalt</i>	mg/kg	300	600	600	300	< 1,0	< 1,0
Nickel	mg/kg	70	140	350	900	1,4	1,4
Quecksilber	mg/kg	10	20	50	80 (100)	< 0,05	< 0,05
<i>Thallium</i>	mg/kg	5	10	25	–	< 0,4	< 0,4
Cyanide	mg/kg	50	50	50	100	< 0,1	< 0,1

*kursiv: neue Parameter gemäß Entwurf-BBodSchV (2017)
in Klammern: neue Prüfwerte gemäß Entwurf-BBodSchV (2017)*

Generell lässt sich sagen, dass das Einzelkorngefüge in Baustoffgemischen aus Stahlwerksschlacken aufgrund karbonatischer Reaktionen bei Wasserkontakt verkittet, weil das entstehende Calciumhydroxid mit Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu Calciumcarbonat reagiert und die Verlagerung feiner Partikel reduziert wird.



Bild 7:

Wegeoberfläche aus LD-Schlacke nach der Fertigstellung

Foto: R. Perret

3. Zusammenfassung und Ausblick

Vor dem Hintergrund der hohen mineralischen Baustoffmengen, die jährlich für den Wege- und Flächenbau benötigt werden, wurde die Verwendung von Stahlwerksschlacken in ungebundener Bauweise unter Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips betrachtet.

Güteüberwachte Stahlwerksschlacke – insbesondere LD-Schlacken – eignen sich wegen ihrer bautechnischen und umweltfreundlichen Eigenschaften für vielfältige Verwendungen im Erdbau. Gleichzeitig können diese industriell hergestellten Gesteine einen nachhaltigen Beitrag zur Versorgung mit mineralischen Baustoffen liefern, so dass weniger Gesteinsrohstoffe abgebaut werden müssen.

Im Rahmen einer Ökobilanz-Studie wurde beispielsweise für LD-Schlacke nachgewiesen, dass ihre Verwendung gegenüber einem zusätzlichen Abbau von Naturgesteinen Umweltwirkungen, z.B. im Hinblick auf Klimawandel, Flächen- und Ressourcenverbrauch, reduziert.

Um eine Basis für die Bewertung der Risikovorsorge zu schaffen, und weil der Einsatz von Behörden oftmals kritisch gesehen wird, wurden Untersuchungen an Stahlwerksschlacken im Hinblick auf die Einhaltung der Vorsorgewerte der BBodSchV und der Zuordnungswerte der LAGA TR Boden durchgeführt. Ergebnis der Feststoffuntersuchungen war, dass mit Ausnahme von Chrom gesamt die untersuchten anorganischen Schadstoffe immer sehr deutlich unter den Anforderungswerten lagen. Das toxikologisch relevante Chrom (VI) wurde allerdings in keiner einzigen Schlackenprobe nachgewiesen. Generell erscheint es sinnvoller, Chrom (VI) anstelle von Chrom gesamt für die Bewertung heranzuziehen, wie dies auch schon im Neuentwurf der BBodSchV vorgesehen ist. Ebenfalls unterschreiten die Ergebnisse der Untersuchungen zur Resorption von Chrom und andere anorganische Parameter die Anforderungen für die direkte Aufnahme beim Wirkungspfad Boden-Mensch. Organische Schadstoffe wurden nicht untersucht, weil sie wegen der hohen Entstehungstemperaturen in Schlacken nicht enthalten sein können.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die in Stahlwerksschlacken gegenüber den Vorsorge- und Prüfwerten erhöhten Cr-Gesamtgehalte, unter Einbeziehung der Ableitungskriterien für Chrom (VI) und dem resorptiven Chromgehalt, in aller Regel zu keiner Schutzgutgefährdung führen. Generell erscheint es sinnvoll, keine Material-, sondern besser eine schadstoffspezifische Betrachtung vorzunehmen.

Aussagen zur partikulären Verlagerung von ungebunden eingebauter Stahlwerksschlacke können an dieser Stelle nicht abschließend geklärt werden. Vermutlich ist die Beeinflussung des Bodens im Umfeld eines Weges jedoch gering, weil bei Stahlwerksschlacken aufgrund karbonatischer Reaktionen eine Selbsterhärtung stattfindet. In einer wissenschaftlichen Abschlussarbeit zur Verwendung von LD-Schlacke im Forstwegebau in Niedersachsen konnten grundsätzlich schädliche Auswirkungen auf das Schutzgut Boden nicht festgestellt werden.

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass eine bundeseinheitliche Regelung zum Umgang mit Sekundärbaustoffen – wie die seit langem diskutierte geplante Ersatzbaustoffverordnung – weiterhin sehr wichtig ist, um einheitliche Regeln für die Anwendung von Sekundärrohstoffen festzulegen. Aktuell ist z.B. eine güteüberwachte und wasserrechtlich zugelassene Stahlwerksschlacke in einem Bundesland ein geeigneter Baustoff, während nach dem Grenzübertritt aus genau diesem Baustoff ein nicht zu verwendender *Abfall* wird.

Weiterhin muss eine praktikable Lösung gefunden werden, wie beim Ausbau von sortenreinem Material nach der Nutzung in einem technischen Bauwerk zu verfahren ist. Es wäre sinnvoll, wenn für den Ausbau sortenreiner Baustoffe die gleichen Anforderungen wie für deren Einbau gelten würden. Vor dem Hintergrund der bautechnischen Ausbaumöglichkeiten und der in vielen Kommunen bereits üblichen Katastererfassung von technischen Bauwerken sollte das eine gangbare Lösung sein, um die Akzeptanz und das Vertrauen in Sekundärrohstoffe zu fördern.

4. Quellen

- [1] Bialucha, R.; Dohlen, M.: Langfristiges Verhalten von Stahlwerksschlacken im ländlichen Wegebau. In: Report des FEHS – Instituts für Baustoff-Forschung, 15 (1). 2008, S. 1-15
- [2] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (Hrsg.): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden. 4. überarbeitete und ergänzte Auflage (2017)
- [3] Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12.07.1999 (BGBl. I S. 1554); zuletzt geändert durch Artikel 3 Abs. 4 der Verordnung vom 27.11.2017 (BGBl. I S. 3465)
- [4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung. Referentenentwurf vom 06.02.2017
- [5] Cheremisina, E.; Schenk, J.: Kein sechswertiges Chrom in Stahlwerksschlacken. In: stahl und eisen, 137 (8). S. 33-34
- [6] Cheremisina, E.; Schenk, J.: 2017 Chromium Stability in Steel Slags. In: steel research international, 87 (11). 2017, S. 1-7
- [7] Clausthaler Umwelttechnik-Institut - CUTEC: Bewertung der Substitution von industriellen Nebenprodukten der Stahlerzeugung durch Primärrohstoffe beim Einsatz im Straßen- und Wegebau. Clausthal-Zellerfeld (unveröffentlicht), 2017
- [8] DIN 19738: Bodenbeschaffenheit – Resorptionsverfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen aus kontaminiertem Bodenmaterial, 2017
- [9] DIN 932-1: Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Probenahmeverfahren, 1996
- [10] Dohlen, M.: Verwendung von LD-Schlacke im Wege- und Flächenbau. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Band 3. Nietwerder: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2016, S. 323-339
- [11] Dohlen, M.; Homm, G.; Schebek, L.: Ökobilanzielle Untersuchung von LD-Schlacke für verschiedene Einsatzbereiche. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Band 4. Nietwerder: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2017, S. 193-203
- [12] Dohlen, M.; Schrey, H.; Surges, H.-G.: LiDonit – Erfahrungen aus drei Jahrzehnten vom Straßenbau bis zur Kunst. In: Max Aicher Unternehmensgruppe (Hrsg.): Schlacken-Symposium 2016 – Kreislaufwirtschaft stabil weiterentwickeln. 2016, S. 29-40
- [13] Drissen, P.: Mineralische Bindung von Spurenelementen in Stahlwerksschlacken. In: Report des FEHS – Instituts für Baustoff-Forschung, 13 (1). 2006, S. 6-9
- [14] Erlass des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg vom 17.07.2015 zur Verwertung von Linz-Donawitz-Schlacke (LD-Schlacke) in technischen Bauwerken in der Z1- und Z2-Einbauklasse im Land Brandenburg

- [15] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau - TP Gestein-StB, Ausgabe 2008
- [16] Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie – IWKS: Ökobilanzielle Betrachtung der Nutzung von LD-Schlacke unter besonderer Berücksichtigung der Substitutionseffekte. Projektnummer: 163-020931, 2017
- [17] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (BBodSchG) vom 17.03.1998 (BGBl. I S. 502); zuletzt geändert durch Artikel 3 Abs. 3 der Verordnung vom 27.09.2017 (BGBl. I S. 3465)
- [18] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (KrWG) vom 24.02.2012 (BGBl. I S. 212); zuletzt geändert durch Artikel 2 Abs. 9 des Gesetzes vom 20.07.2017 (BGBl. I S. 2808)
- [19] Höllen, D.; Pomberger, R.: Mineralogie und Auslaugbarkeit von Stahlwerksschlacken. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Nietwerder: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 377-385
- [20] Jöbstl, J.: Anforderungen an die umweltfreundliche Entsorgung von Stahlwerksschlacken am Beispiel der LD-Schlacken. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Aschen, Schlacken, Stäube aus Metallurgie und Abfallverbrennung. Nietwerder: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2016, S. 523-539
- [21] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (Hrsg.): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil II: Technische Regeln für die Verwertung – 1.2 Bodenmaterial (TR Boden). Stand 05.11.2004
- [22] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (Hrsg.): PN 98 – Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen. Fassung 2004
- [23] Merkel T.: Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken 2016. In: Report des FEhS – Instituts für Baustoff-Forschung, 24 (1). 2017, S. 15
- [24] Mudersbach, D.: Verbesserung der Eigenschaften von Elektroofenschlacken aus der Herstellung von nichtrostenden Stählen zur Nutzung dieser Schlacken im Verkehrsbau. Schriftenreihe des FEhS – Instituts für Baustoff-Forschung, Heft 11, 2004
- [25] Rosenberg, F.; Sabel, K.-J.: Hintergrundgehalte umweltrelevanter Schwermetalle in Gesteinen und oberflächennahem Untergrund Hessens. Übersichtskarte 1:300.000, 1996
- [26] Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/umweltrecht/umweltverfassungsrecht/vorsorgeprinzip> (abgerufen am 08.03.2018)

Ansprechpartner



Dr. rer. nat. Michael Dohlen

thyssenkrupp MillServices & Systems GmbH

Leiter Forschung & Entwicklung | Qualitätssicherung

Forschung & Entwicklung Mineral- und Sekundärrohstoffe

Emschertalstraße 12

46149 Oberhausen (D)

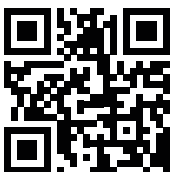
Telefon: 0049-(0)208-65605166

E-Mail: michael.dohlen@thyssenkrupp.com



Deutschlands Online-Magazin
für die Recyclingwirtschaft

++ Immer online ++ Immer verfügbar ++ Immer aktuell ++



Jetzt 6 Wochen kostenfrei testen!
www.320grad.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,
Bernd Friedrich, Thomas Pretz, Peter Quicker, Dieter Georg Senk, Hermann Wotruba (Hrsg.):

Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5
– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN 978-3-944310-41-1 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

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

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2018

Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm,
Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.

Erfassung und Layout: Claudia Naumann-Deppe, Janin Burbott-Seidel, Sandra Peters,
Ginette Teske, Roland Richter, Cordula Müller, Gabi Spiegel

Druck: Universal Medien 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.