

**FEhS – INSTITUT
FÜR BAUSTOFF-FORSCHUNG e.V.**

**Bliersheimer Str. 62
4 7 2 2 9 D U I S B U R G
Telefon: 02065/9945 - 0
Telefax: 02065/9945 - 10
E-Mail: fehs @ fehs.de
Internet: http://www.fehs.de**

Juli 2014

ISSN 0948-4795

21. Jahrgang Nr. 1

Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierung von Stahlwerksschlacken und Auswirkung auf die Löslichkeit umweltrelevanter Bestandteile

Dr.-Ing. R. Bialucha, M. Spanka, M.Sc.

Einleitung

In Deutschland wurden im Jahr 2012 insgesamt 13,4 Mio. t Eisenhüttenschlacken (EHS) erzeugt, davon 7,5 Mio. t Hochofenschlacken und 5,9 Mio. t Stahlwerksschlacken (SWS). Der weitaus größte Anteil an SWS stammt aus der Produktion von Qualitäts- und Massenhäuten [1], ein geringerer Prozentsatz aus der Herstellung hochlegierter Stähle. Die Schlacken aus der Qualitäts- und Massenhäutenherstellung, zu denen im Wesentlichen LD-Schlacken (LDS) aus Oxygenstahlwerken und Elektroofenschlacken (EOS) aus Elektrostahlwerken zählen, werden zu einem Prozentsatz von über 90 % als Produkte verwendet. Haupteinsatzgebiete sind dabei der Straßen- und Erdbau, daneben auch der Wasserbau und der Düngemittelbereich. Ein Teil der Schlacken wird auch werksintern als Kalk- und Eisenträger im metallurgischen Kreislauf eingesetzt. Bei den Schlacken aus der Produktion von hochlegierten Stählen (im Folgenden als Edelstahlschlacken – EDS bezeichnet) ist die Verwendungsrate dagegen mit ca. 70 % bisher noch deutlich niedriger. Die Ursache hierfür liegt u. a. darin, dass ein Großteil der EDS sehr feinkörnig ist und daher nur wenige Einsatzgebiete infrage kommen. Zudem gibt es auf dem Markt eine Vielzahl an feinkörnigen Materialien, die alle Konkurrenzprodukte darstellen.

Die Verwendbarkeit von Stahlwerksschlacken, die zu den industriellen Nebenprodukten gezählt werden, richtet sich – neben der technischen Eignung – vor allem nach der Umweltverträglichkeit (wasserwirtschaftliche Verträglichkeit). Hierunter wird in erster Linie die Löslichkeit umweltrelevanter Bestandteile und damit deren Einfluss auf Boden und Oberflächen- bzw. Grundwasser verstanden.

Das von der AiF geförderte Forschungsvorhaben "Zeitliche Abhängigkeit der Karbonatisierung von Stahlwerksschlacken und Auswirkung auf die Löslichkeit umweltrelevanter Bestandteile" [2] beschäftigt sich im Wesentlichen mit Untersuchungen zur Reduzierung der Auslaugung umweltrelevanter Schwermetalle, wie Chrom, Molybdän und Vanadium aus Stahlwerksschlacken (SWS). Als weiterer umweltrelevanter Parameter wurde Fluorid untersucht. Hintergrund für diese Parameterauswahl ist die zurzeit in Arbeit befindliche Ersatzbaustoffverordnung (EBV), in der für die oben genannten Parameter u. a. aufgrund einer Sickerwassermodellierung äußerst niedrige Grenzwerte bzw. Materialwerte festgelegt werden sollen [3]. Nach derzeitigem Stand wird damit zukünftig der Einsatz großer Mengen an SWS im offenen Einbau nicht mehr möglich sein. Daher

Inhalt	Seite
Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierung von Stahlwerksschlacken und Auswirkung auf die Löslichkeit umweltrelevanter Bestandteile	1
R. Bialucha, M. Spanka	
Verdichtbarkeit und Tragfähigkeit ungebundener Baustoffgemische	8
D. Demond, Th. Merkel	
Messung der elektrischen Leitfähigkeit von flüssigen Schlacken	14
D. Algermissen, D. Madersbach, R. König, A. Naujock, L. Rose	
Erhebungen zu Produktion und Einsatz von Hoch- und Stahlwerksschlacke	18
Th. Merkel	

gilt es, Möglichkeiten zur Verringerung der Freisetzung dieser umweltrelevanten Parameter zu entwickeln. Die Auslaugbarkeit hängt von verschiedenen Faktoren, wie z. B. Feststoffgehalt, Mineralphasen bzw. mineralischer Bindungsform, Korngröße sowie Alterung ab. Untersuchungen des FEhS-Instituts haben gezeigt, dass höhere Feststoffgehalte nicht unbedingt zu einer stärkeren Auslaugung führen. So konnte z. B. für Chrom festgestellt werden, dass gerade ein höherer Gehalt an Chrom zu der Bildung einer eigenständigen, unlöslichen Mineralphase – dem Spinell – führt [4].

Für das Element Vanadium ist aus verschiedensten Untersuchungen des FEHS-Instituts [5, 6], aber auch anderer Institutionen [7] bekannt, dass "die Freisetzung über die in wässrigen Eluaten anlösbaren kalksilikatischen Minerale erfolgt". Für die Parameter Molybdän und Fluorid ist die mineralische Bindungsform weniger gut untersucht bzw. bekannt. Die Korngröße eines Mineralstoffs hat ebenfalls einen großen Effekt, wobei im Allgemeinen die Auslaugbarkeit mit kleiner werdendem Korn zunimmt, da die spezifische Oberfläche größer wird [6]. Schwerpunkt dieses Forschungsvorhabens war der Faktor Alterung bzw. Karbonatisierung. Untersucht wurde die zeitliche Abhängigkeit der Karbonatisierung von Stahlwerksschlacken und deren Auswirkungen auf die Löslichkeit umweltrelevanter Bestandteile. Karbonatisierung ist die Umwandlung von Calciumoxid und Calciumhydroxid durch die Reaktion mit CO_2 zu Calciumcarbonat. Das gebildete Calciumcarbonat ist schwer löslich und führt zu einer Verfestigung des Baustoffgemisches und zu einer Abdichtung, also einer Passivierung der Kornoberfläche. So können Karbonatisierungsvorgänge die Auslaugbarkeit möglicherweise so weit herabsetzen, dass ein Material auch in Einsatzbereichen verwendet werden kann, für die es aufgrund zu hoher Auslaugraten im frischen Zustand nicht geeignet wäre. Bisher ist nicht bekannt, wie diese Reaktion zeitlich abläuft und welche Auswirkungen sie sowohl auf die technischen Eigenschaften der Schlacke als Bauprodukt als auch auf deren Umweltverträglichkeit hat.

Untersuchungen

Für die Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens "Karbonatisierung" wurden insgesamt drei verschiedene Stahlwerksschlacken aus der Qualitätsstahlerzeugung bzw. aus der Produktion von hochlegierten Stählen (Edelstahl) eingesetzt. Nach umfangreichen Voruntersuchungen wurden je eine LD-Schlacke (LDS), eine Elektrofenschlacke (EOS) und eine Edelstahlschlacke (EDS) ausgewählt, die sich hinsichtlich des Auslaugverhaltens von stahlwerksschlacken-typischen Parametern unterschieden. Um eine deutliche Veränderung des Auslaugverhaltens mit zunehmender Alterung nachvollziehen zu können, wurden gezielt solche Schlacken ausgewählt, die einen oder mehrere der vorgenannten umweltrelevanten Parameter in gut messbaren Konzentrationen enthielten. Diese Schlacken sind daher keinesfalls als "typische" Stahlwerksschlacken einzustufen.

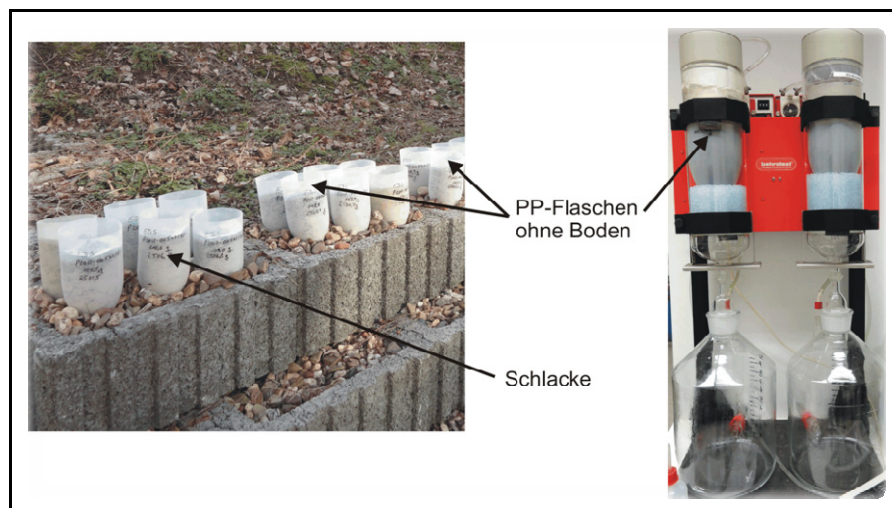


Bild 1: Lagerung der Proben in PP-Flaschen im Freien (links) und anschließende Auslaugung in der down-flow-Perkolationsapparatur (rechts)

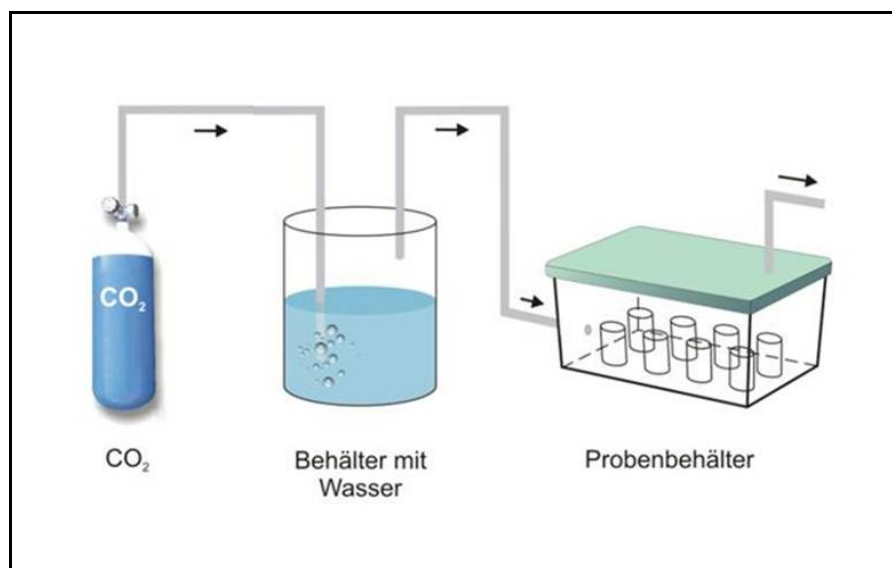


Bild 2: Schematischer Aufbau der CO₂-Behandlungs-Apparatur

In dem Forschungsvorhaben wurde der Einfluss einer Alterung/Karbonatisierung sowohl auf bautechnische Eigenschaften als auch auf die Umweltverträglichkeit der Stahlwerksschlacken untersucht. Mithilfe des "California Bearing Ratio"-Versuchs (CBR) [8] wurde untersucht, ob bzw. wie stark die drei untersuchten Schlacken sich durch eine fortschreitende Karbonatisierung verfestigen. Mittels Trogversuch [9] wurde untersucht, wie sich das Auslaugverhalten der aus den SWS hergestellten und unter feuchten Bedingungen gelagerten Proctorkörper mit zunehmender Verfestigung verändert. Dazu wurden nach 0, 1, 4, 12, 24, 48 und 72 Wochen Probekörper entnommen und ausgelaugt.

Zur Untersuchung der Auslaugraten der frischen Schlacken im Originalzustand kamen das Schüttelverfahren 2:1 gemäß

DIN 19529 [10], der Säulenkurztest und das ausführliche Säulenverfahren gemäß DIN 19528 [11] (beides up-flow-Verfahren), das Trogverfahren gemäß TP Gestein-StB 7.1.2 [9] sowie das down-flow-Perkolationsverfahren gemäß TP Gestein-StB 7.1.3 [12] zum Einsatz, um den Einfluss der unterschiedlichen Prüfbedingungen auf die Auslaugergebnisse zu erfassen. Außerdem wurde der Einfluss der Korngröße durch die Verwendung von zwei gezielt zusammengesetzten Körnungen 0/11 mm und 0/22 mm für LDS und EOS untersucht. Die EDS war bereits im Originalzustand recht feinkörnig und enthielt nur wenige Bestandteile > 11 mm, weshalb sie nur in der Körnung 0/11 mm verwendet wurde. Für die grundlegende Charakterisierung wurden für die drei ausgewählten Schlacken Röntgenbeugungsuntersuchungen und Feststoffanalysen durchgeführt.

Um den zeitlichen Ablauf der Karbonatisierung zu untersuchen, wurden verschiedene Langzeitversuche durchgeführt. Zum einen wurde die Schlacke im Freien in Polypropylen (PP)-Flaschen gelagert und war dort den natürlichen Witterungsbedingungen über einen Zeitraum von maximal 72 Wochen ausgesetzt (Bild 1, links). Nach vorgegebenen Zeiten (nach 1, 4, 8, 12, 16, 24, 48 und 72 Wochen) wurden die Schlacken in den PP-Flaschen mittels des down-flow-Perkolationsverfahrens eluiert (Bild 1, rechts). Durch dieses Vorgehen konnte eine Zerstörung der im Wesentlichen auf der Oberfläche der Proben gebildeten Karbonatschicht verhindert werden. Diese Lagerung im Freien unterscheidet sich von üblichen Laborverfahren darin, dass erstens die Proben der natürlichen Witterung (mit Regen-, aber auch längeren Trockenphasen) ausgesetzt waren und zweitens nicht das Regenwasser analysiert wurde, welches die Proben durchsickert hat, sondern die gealterten/bewitterten Schlackenproben untersucht wurden.

Zusätzlich zu den Auslaugversuchen wurden an Parallelproben aus diesen Auslaugversuchen Untersuchungen der Karbonatgehalte im Feststoff durchgeführt. Dazu wurde aus den PP-Flaschen nur eine dünne Schlackenschicht von der Oberfläche entnommen und aufbereitet.

Neben den Untersuchungen unter praxisnahen Bedingungen wurden auch Laborversuche durchgeführt, bei denen versucht wurde, eine beschleunigte Karbonatisierungsreaktion der Schlacken mittels Zuführung von Kohlensäure (CO_2) herbeizuführen. Dazu wurden von allen drei SWS aus der Körnung 0/11 mm Proctorkörper hergestellt und in einem geschlossenen System bei natürlicher CO_2 -Konzentration (Luft) bzw. mit einem Luft/ CO_2 -Gemisch sowie reinem CO_2 -Gas bei 20 °C und feuchten Bedingungen gelagert (Bild 2). Nach 1, 4, 8, 12, 24 und 48 Wochen wurde jeweils ein Proctorkörper entnommen und mittels Trogverfahren ausgelaut. An Parallelproben wurde der CO_2 -Gehalt im Feststoff analysiert sowie die Mineralphasen mittels Röntgenbeugung untersucht.

Ergebnisse und Diskussion

– Bautechnische Eigenschaften

Mithilfe des CBR-Versuchs konnte gezeigt werden, dass mit zunehmender Lagerungszeit eine Zunahme des CBR-Werts erfolgt, also ein Anstieg der Festigkeit bzw. der Tragfähigkeit. Die Selbsterhärtung gilt als

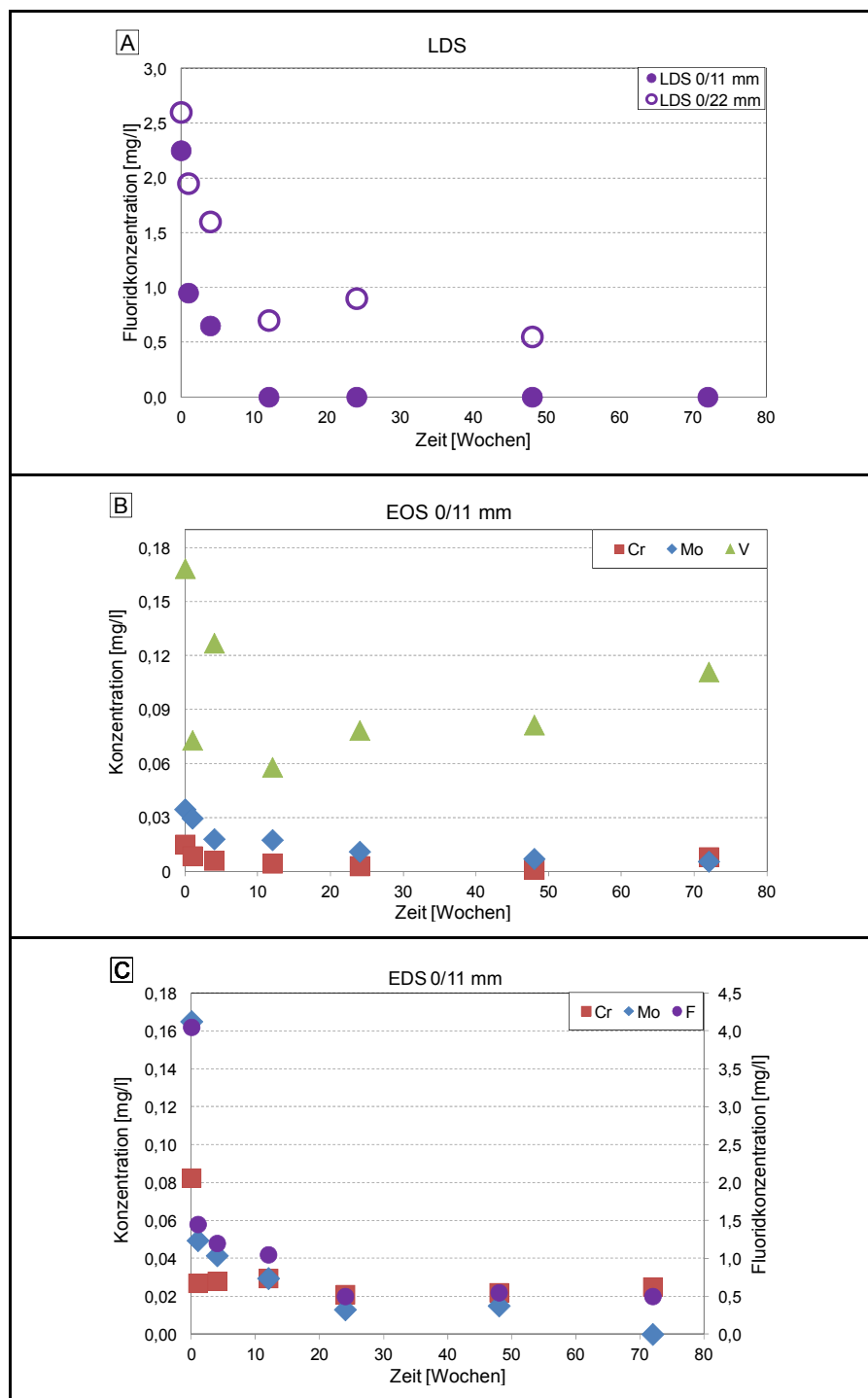


Bild 3: Beispiele für die Konzentrationsverläufe in den Trogeluaten von LDS (A), EOS (B) und EDS (C) (Mittelwerte aus Doppelversuchen)

nachgewiesen, wenn der CBR-Wert des Mineralstoffgemisches nach 28 Tagen Lagerungszeit um mindestens 20 % gegenüber dem CBR-Wert unmittelbar nach dem Verdichten der Probe angestiegen ist. Die Zunahme der Selbsterhärtung war besonders bei der LDS stark ausgeprägt, aber auch die beiden anderen Schlacken (EOS und EDS) zeigten nach 28 Tagen die erforderliche Festigkeitszunahme. Dabei ist zu beachten, dass alle drei Schlacken im Vergleich zu herkömmlichen Mineralstoffgemischen hohe CBR-Werte aufwiesen. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die

Proben gezielt gemäß der Anforderungen der TL SoB-StB [13] für Deckschichtmaterial zusammengesetzt wurden und daher einen hohen Feinkornanteil enthielten. Die besonders starke Verfestigung der LDS kann damit erklärt werden, dass diese Schlacke die höchsten Freikalkgehalte aufwies, die für eine schnelle Karbonatisierung verantwortlich sind. Die Ergebnisse der technischen Prüfungen nach [8] bestätigen durchgehend die Eignung von Schlacken bzw. karbonatisierten Schlacken für den Einsatz als Baustoff für Deckschichten ohne Bindemittel. Dieser Prozess der

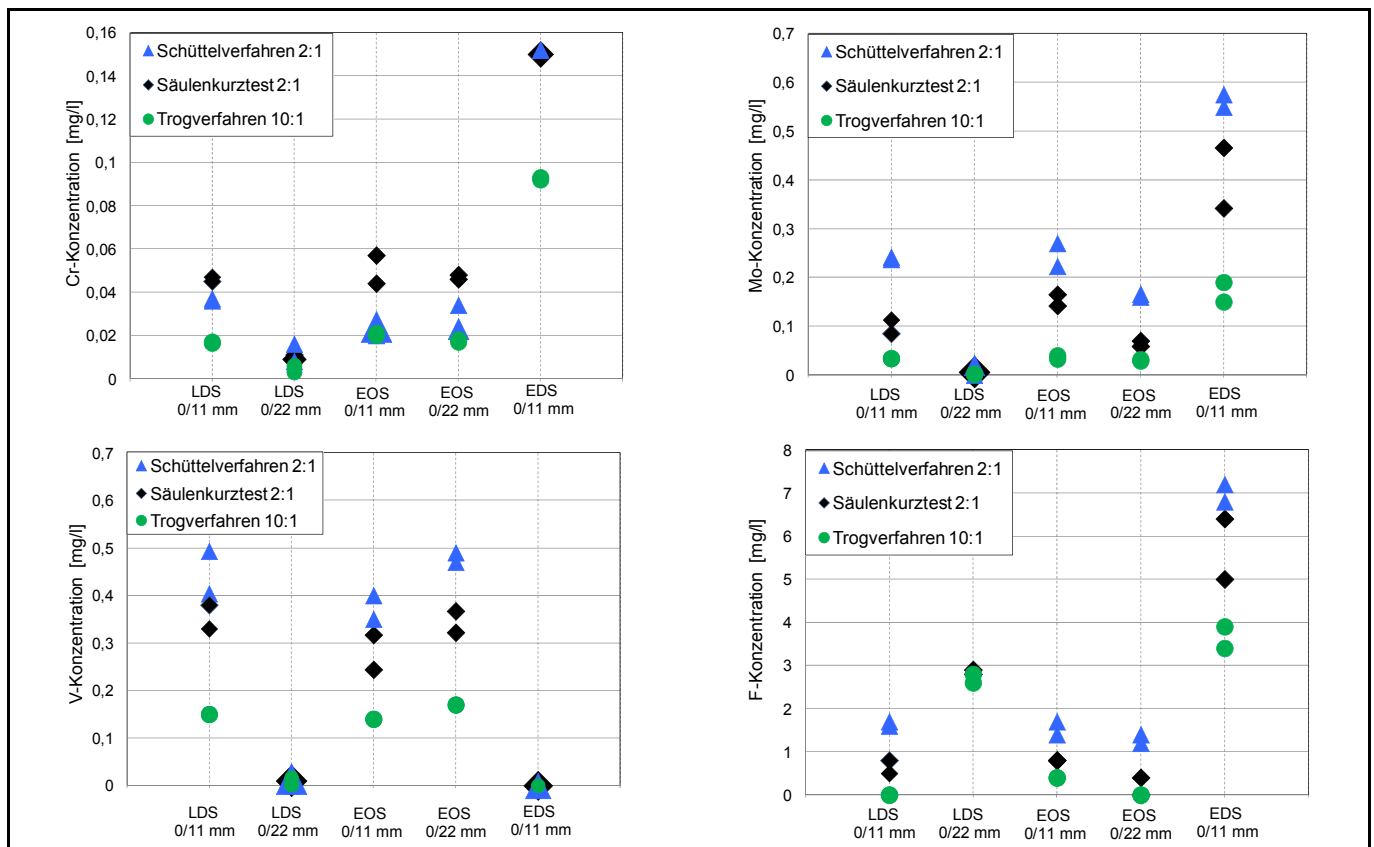


Bild 4: Vergleich von Schüttelverfahren, Säulenkurztest und Trogverfahren (Konzentrationen in mg/l)

Selbsterhärtung wird durch die Aggregatbildung von ausgefallenen Calcitkristallen hervorgerufen, welche die einzelnen Minerale verkitten und eine feste Matrix bilden. Durch das Verkitten der Schlackenkörner an der Oberfläche kann zum einen eine Erosion und zum anderen das Verwehen feiner Partikel vermindert bzw. verhindert werden.

– Auswirkung der Verfestigung auf die Auslaugbarkeit von SWS

Für alle drei Schlacken konnte eine optische Verfestigung mit zunehmender Lagerungszeit beobachtet werden, was bereits anhand der CBR-Versuche festgestellt wurde (siehe bautechnische Eigenschaften). Die Proctorkörper mit 0 Tagen und 7 Tagen Lagerungszeit zerfielen während des Trogversuchs. Erst nach einer längeren Lagerungszeit von einem Monat blieben die Probekörper weitestgehend unversehrt.

Generell kann eine deutliche Abnahme der Auslaugraten mit zunehmender Lagerungszeit für die Parameter Chrom, Molybdän und Fluorid für die jeweiligen Schlackenarten und Körnungen beobachtet werden.

Exemplarisch für die LDS sind in [Bild 3 A](#) die Fluoridkonzentrationen in den Eluaten dargestellt, die eine deutliche Abnahme mit zunehmender Lagerungszeit zeigen. Diese

Verringerung findet bei der Körnung 0/11 mm deutlich schneller statt als bei der Körnung 0/22 mm. Auch die hier nicht dargestellten Parameter Chrom, Molybdän und Vanadium zeigen eine deutliche Verringerung der Konzentrationen in den Eluaten mit zunehmender Lagerungszeit. Bei der EOS kann für Chrom und Molybdän ein ähnliches Verhalten verzeichnet werden ([Bild 3 B](#)). Für Vanadium kann bis zu einer Lagerungszeit von 12 Wochen ebenfalls eine Verminderung der Konzentrationen beobachtet werden, danach beginnen die Vanadiumkonzentrationen aber wieder anzusteigen. Nach 72 Wochen liegt die Vanadiumkonzentration zwar unterhalb der Konzentrationen von 0 Tagen, aber wieder oberhalb der niedrigsten Werte nach 12 Wochen. Die Fluoridkonzentrationen in den analysierten Eluaten liegen im gesamten Untersuchungszeitraum unterhalb der Bestimmungsgrenze von $< 0,4 \text{ mg/l}$. Für die EDS erwiesen sich Chrom, Molybdän und Fluorid als gut messbare Parameter ([Bild 3 C](#)). Die Vanadiumkonzentrationen in den Eluaten lagen unterhalb der Bestimmungsgrenze ($< 0,002 \text{ mg/l}$). Sowohl die Chrom-, die Molybdän- als auch die Fluoridkonzentrationen starten mit hohen Werten im Vergleich zu den beiden anderen Schlacken des Forschungsvorhabens. Bereits nach 1 Woche lässt sich jedoch eine deutliche Abnahme beobachten. Bis zu

einer Lagerungszeit von 72 Wochen kann weiterhin eine sukzessive Abnahme dieser Parameter verzeichnet werden.

Als maßgeblicher Faktor für die Abnahme der Auslaugraten ist die Verfestigung, welche bereits nach 1 Monat Lagerungszeit erfolgte, als Erklärung anzuführen.

– Auslaugversuche im Labor

Um das Auslaugverhalten der drei Schlacken im Originalzustand zu untersuchen, wurden die o. g. Laborverfahren angewandt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die drei Schlacken hinsichtlich der Freisetzung der untersuchten Parameter deutlich unterscheiden. In [Bild 4](#) sind die Konzentrationen schlackentypischer Parameter für das Schüttelverfahren (L/S 2:1), den Säulenkurztest (L/S 2:1) und das Trogverfahren (L/S 10:1) vergleichend dargestellt.

Da bei dem Schüttelverfahren – im Gegensatz zu dem Säulenkurztest – das Material mechanisch beansprucht wird, sind höhere Konzentrationen in den Eluaten des Schüttelverfahrens zu erwarten. Dies trifft auf die Parameter Molybdän, Vanadium und Fluorid zu, während die Auslaugung von Chrom nicht einheitlich diesem Trend folgt. Für das Trogverfahren werden erwartungsgemäß die niedrigsten Konzentrationen

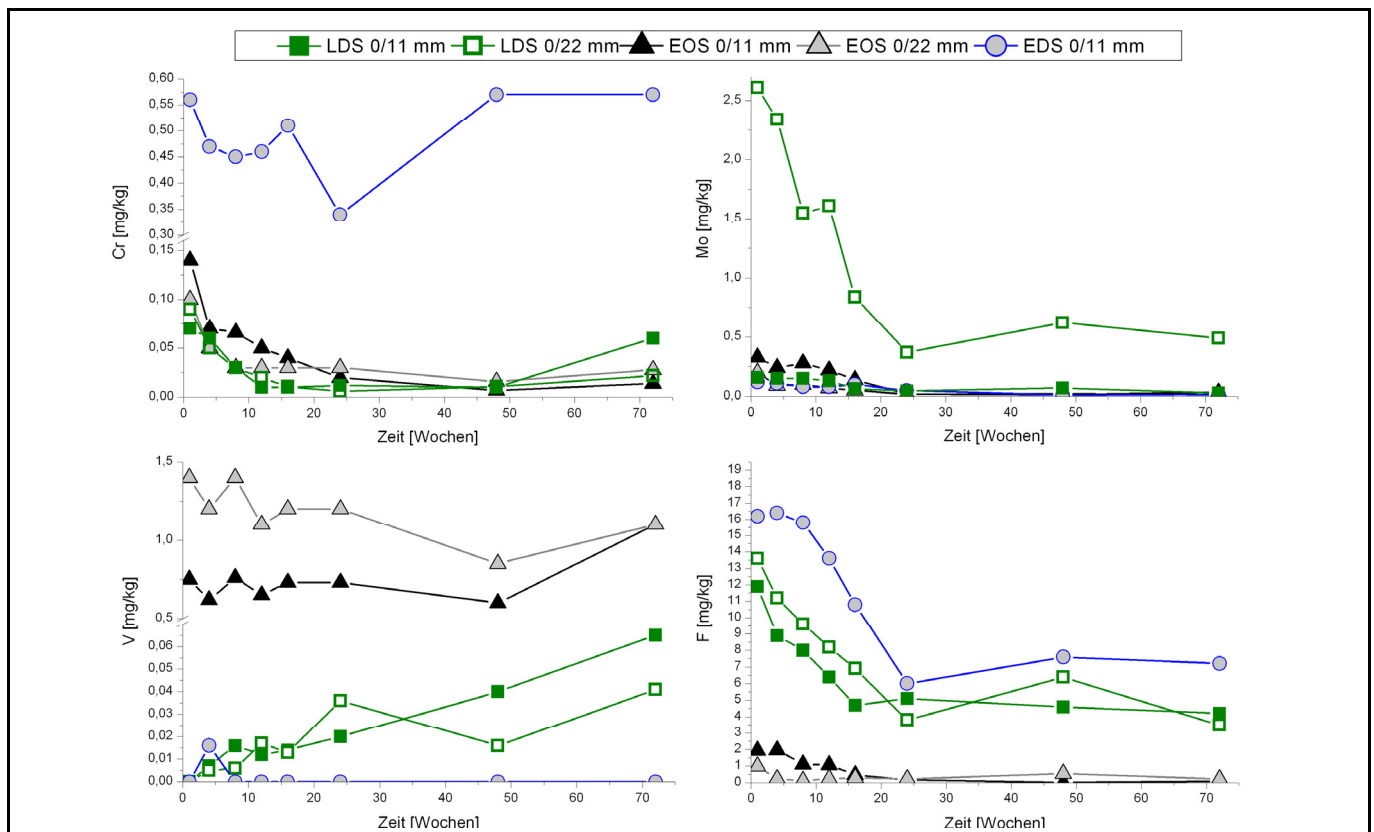


Bild 5: Berechnete Gesamtfrachten des down-flow-Verfahrens nach 0 Tagen sowie 1, 8, 12, 16, 24, 48 und 72 Wochen für die Parameter Chrom, Molybdän, Vanadium und Fluorid

gemessen, da durch das deutlich höhere L/S-Verhältnis von 10:1 eine Verdünnung der Konzentrationen stattfindet. Bei Umrechnung der Konzentrationen in Frachten (mg/kg) sind dagegen die Werte des Trogverfahrens am höchsten, da durch das höhere Wasserangebot insgesamt mehr ausgelaugt wird.

In den Eluaten der EDS werden die höchsten Konzentrationen an Chrom, Molybdän und Fluorid gemessen (Bild 4), während die Vanadiumkonzentrationen unter der Bestimmungsgrenze liegen. Der Einfluss der unterschiedlichen Korngrößen wird besonders bei der LDS deutlich. Chrom, Molybdän und Vanadium laugen aus der Körnung 0/11 mm mehr aus als aus der Körnung 0/22 mm, da mit kleiner werdendem Korn die spezifische Oberfläche größer wird und daher die Freisetzung zunimmt. Umgekehrt verhält sich nur das Fluorid.

Der Vergleich der beiden Perkulationsverfahren (ausführlicher up-flow-Säulenversuch [11] und down-flow-Perkolation [12]) zeigt keine einheitliche Tendenz. Verantwortlich hierfür sind die unterschiedlichen Randbedingungen, wie L/S-Verhältnis, gesättigter (up-flow) bzw. ungesättigter (down-flow) Fluss, Trocknungsphasen nur bei einem der beiden Verfahren (down-flow) etc. Für die LDS werden für Chrom,

Molybdän und Vanadium die höchsten Frachten für die Auslaugung der Körnung 0/11 mm mittels up-flow-Verfahren erhalten, während Fluorid hier die niedrigsten Frachten zeigt. Für die EOS hingegen wird tendenziell bei dem down-flow-Verfahren eine höhere Fracht als bei dem ausführlichen Säulenverfahren ermittelt. Gute Übereinstimmungen beider Verfahren ergeben sich für die Frachten der EDS für die Parameter Chrom und Fluorid. Die Molybdängelgehalte liegen für die EDS bei dem down-flow-Verfahren höher als bei dem ausführlichen Säulenverfahren. Für die EDS wurde bei beiden Verfahren kein Vanadium oberhalb der Bestimmungsgrenze ($< 0,002 \text{ mg/l}$) gemessen.

– Langzeitversuche unter praxisnahen Bedingungen (Auslagerungsversuche)

Die Auslagerungsversuche im Freien mit anschließender Auslaugung mittels down-flow-Perkulationsverfahren liefern im Allgemeinen deutlich höhere pH-Werte als die Laborversuche und bleiben über den gesamten Untersuchungszeitraum von 72 Wochen auf einem ähnlichen Niveau. Tendenziell lassen sich für die Parameter Chrom, Molybdän und Fluorid mit zunehmender Lagerungszeit abnehmende Konzentrationen in den Eluaten beobachten (Bild 5). Eine Ausnahme bildet nur die

Chromauslaugung der EDS, die erst abnimmt, dann aber wieder auf das Ausgangsniveau ansteigt. Die beobachtete Abnahme der Auslaugraten kann auf die fortschreitende Karbonatisierung zurückgeführt werden, die unter anderem zu einer Abdichtung der Kornoberflächen führt. Diese These wird dadurch unterstützt, dass mit zunehmender Auslagerungszeit die im Feststoff gemessenen CO_2 -Gehalte zunehmen. Vanadium zeigt ein anderes Verhalten, insbesondere bei der LDS steigen die Konzentrationen mit der Zeit an. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass nach anfänglicher Auslaugung des sehr schnell löslichen Freikalks mit zunehmender Lagerungszeit bzw. Karbonatisierung auch andere Calciumverbindungen, wie Kalksilikate gelöst werden, in denen Vanadium enthalten ist (mehr dazu siehe Literatur [5-7]).

– Versuche mit CO_2 -Behandlung

Die Ergebnisse der Langzeitversuche der CO_2 -Behandlung an Proctorkörpern zeigen, dass bereits nach einer Woche Lagerungszeit sowohl mit CO_2 als auch mit dem Luft/ CO_2 -Gemisch die Schlacken soweit verfestigt bzw. karbonatisiert sind, dass sie im Trogversuch stabil bleiben, während der unter Luftatmosphäre gelagerte Proctorkörper zerfällt.

Der Vergleich der Auslaugergebnisse der an Luft gelagerten Proctorkörper mit denen der mit CO₂ bzw. einem Luft/CO₂-Gemisch behandelten zeigt, dass sich die Karbonatisierung sehr unterschiedlich auf die drei untersuchten Schlacken auswirkt. So kann für die EOS und die EDS eine Verminderung der Chromauslaugung durch die Behandlung erzielt werden, für die LDS hingegen nicht. Eine Verminderung der Molybdänkonzentrationen kann dagegen für die LDS und die EDS erzielt werden, während sich die Behandlung bei der EOS negativ auswirkt. Die Fluoridauslaugung wird nur bei der LDS eindeutig reduziert, bei der EDS schwanken die Werte sehr stark, und bei der EOS liegen alle Werte unter der Bestimmungsgrenze. Die Vanadiumkonzentrationen in den Trogeluaten der Proctorkörper nehmen bei allen drei Schlacken durch die CO₂-Behandlung zu.

– **Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierung unter praxisnahen Bedingungen im Vergleich zu Laborversuchen mit Zeitraffereffekt (CO₂)**

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer gezielten CO₂-Behandlung von Stahlwerksschlacken ist die zeitliche Komponente – neben der Wirksamkeit, also einer Verbesserung der Auslaugung – eine wichtige Kenngröße. In Bild 6 sind die im Feststoff gemessenen CO₂-Gehalte der Proben aus den CO₂-Behandlungsversuchen (bis 48 Wochen) und die Auslagerungsversuche im Freien (bis 72 Wochen) für die 3 untersuchten Schlackenarten der Körnung 0/11 mm aufgetragen.

Die CO₂-Behandlungsversuche zeigen, dass durch die beschleunigte Karbonatisierung für alle drei Schlacken bis etwa zur 12. Woche eine maximale Calcitbildung erreicht wird. Danach sinken die CO₂-Gehalte bei der LDS und der EDS wieder ab, während sie bei der EOS auf einem relativ konstanten Niveau bleiben. Die Röntgenphasendiagramme bestätigen die höchste Calcitbildungsrate nach etwa 8 bis 12 Wochen. Ein Vergleich der CO₂-Versuche mit den Auslagerungsversuchen im Freien zeigt, dass LDS und EDS unter natürlichen Witterungsbedingungen ein ähnliches Verhaltensmuster haben wie die im Labor mit CO₂ behandelten Proben. Auch unter Praxisbedingungen steigen die CO₂-Gehalte bis zur 12. Woche auf vergleichbare Werte an. Im weiteren Verlauf nehmen die CO₂-Gehalte dann unter natürlichen Bedingungen allerdings noch weiter zu. Für die EOS werden hingegen erst nach 48 Wochen ähnliche Gehalte wie bei den

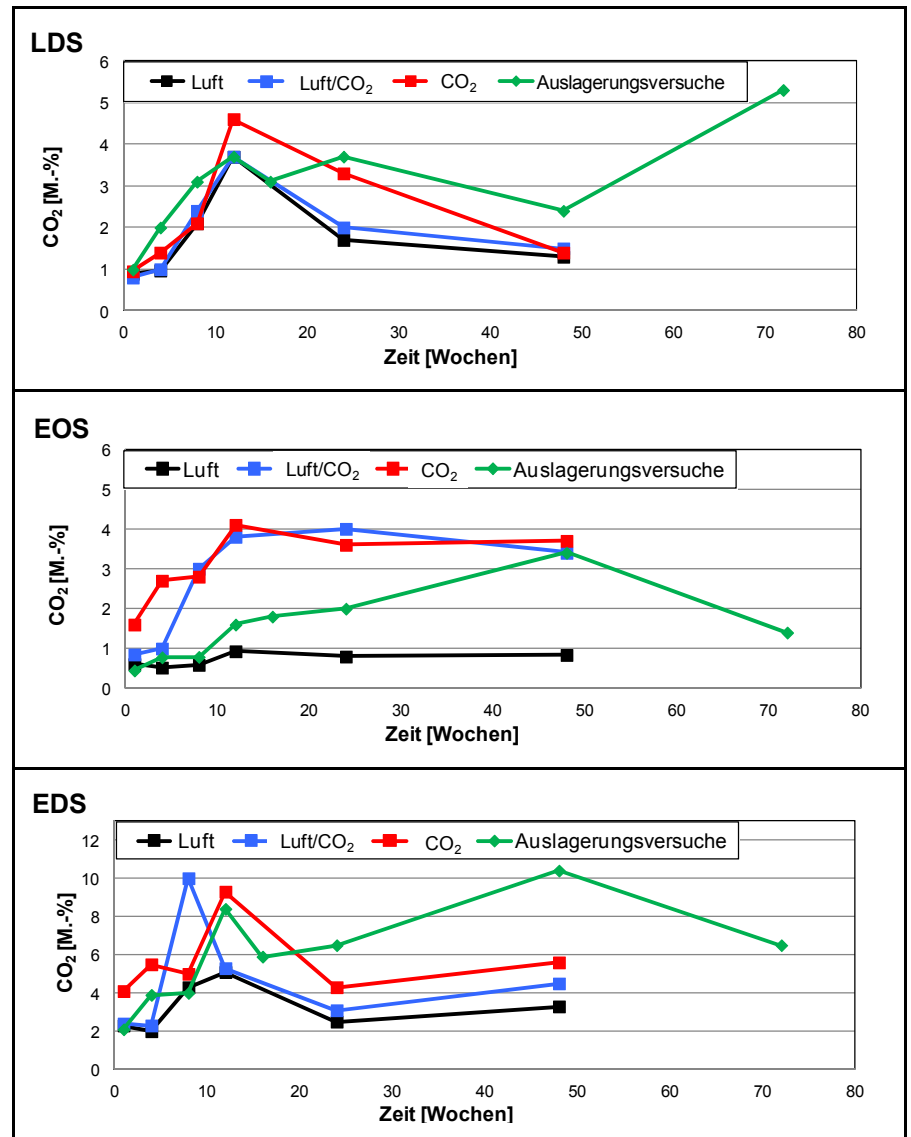


Bild 6: CO₂-Gehalte der Proben aus den CO₂-Behandlungsversuchen und den Auslagerungsversuchen im Freien, für die Körnung 0/11 mm

CO₂-Behandlungsversuchen erreicht. Die unterschiedliche Mineralogie, vor allem der unterschiedliche Freikalkgehalt der drei Schlacken ist als Erklärung anzuführen. In der Basischarakterisierung wurde für die EOS kein Freikalk ermittelt, für LDS hingegen ein hoher und für die EDS ein mittlerer Gehalt an Freikalk, der sehr schnell reagiert. Dies bedeutet, dass bei der EOS andere Calciumverbindungen zu Calciumcarbonat umgewandelt werden, die aber deutlich langsamer reagieren als der Freikalk.

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Forschungsvorhabens war es, den Wissensstand über den Einfluss der Alterung und einer damit einhergehenden Karbonatisierung auf Stahlwerksschlacken zu vertiefen. Zum einen sollte der zeitliche Verlauf der Karbonatisierungsvorgänge an der Oberfläche der Schlackenkörner und

zum anderen die Änderung der Auslaugbarkeit umweltrelevanter Parameter aus den Schlacken mit fortschreitender Karbonatisierung untersucht werden. Dazu wurde in dem Forschungsvorhaben – neben den technischen Eigenschaften – vor allem das Auslaugverhalten anhand von Laborversuchen, Versuchen zur beschleunigten Karbonatisierung unter verschiedenen Bedingungen sowie Auslagerungsversuchen unter natürlichen Witterungsbedingungen untersucht.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens, dass durch Karbonatisierungsreaktionen eine Selbsterhärtung und damit eine Zunahme der Tragfähigkeit erfolgt. Weiterhin nimmt durch diese Verfestigung die Auslaugbarkeit von Chrom, Molybdän und Fluorid aus Proctorkörpern aller drei Schlacken ab. Lediglich die Vanadiumauslaugung der EOS folgt nicht diesem Verhaltensmuster.

Die Versuche unter praxisnahen Bedingungen und unter Laborbedingungen mit gezielter CO₂-Zufuhr zeigen bezüglich der Auslaugung, dass sich die Karbonatisierung sehr unterschiedlich auf die drei Schlacken (LDS, EOS und EDS) und die verschiedenen schlackentypischen Parameter (Chrom, Molybdän, Vanadium und Fluorid) auswirkt. Dies wird durch Faktoren wie unterschiedliche Gehalte und Mineralbindungen von Schwermetallen und Salzen, aber auch von Alkalien und Erdalkalien (insbesondere Freikalkgehalt) beeinflusst. Daneben haben auch unterschiedliche Korngrößen einen Einfluss auf die Intensität und die zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungsreaktionen. Beide Versuchsansätze zeigen, dass LDS und EDS ein ähnliches Verhalten aufweisen und nach etwa 12 Wochen einen ersten Höhepunkt der Karbonatbildung zeigen. Im weiteren Versuchsverlauf steigen die CO₂-Gehalte der unter natürlichen Witterungsbedingungen ausgelagerten Schlacken dann noch weiter an. Dabei ist das erreichte CO₂-Niveau bei der EDS mit maximal 10 M.-% etwa doppelt so hoch wie bei der LDS mit rund 5 M.%. Die EOS reagiert unter natürlichen Bedingungen deutlich langsamer und erreicht erst nach 48 Wochen das CO₂-Niveau der Laborversuche. Eine mögliche Ursache ist darin begründet, dass die EOS keinen Freikalk enthält, der sehr schnell hydratisiert und zu Karbonat reagieren kann.

Die untersuchte Edelstahlschlacke scheint am besten für Karbonatisierungsreaktionen geeignet zu sein, da diese Schlacke nur geringe Vanadiumgehalte aufweist und weitere umweltrelevante Parameter in der untersuchten EDS auf die Karbonatisierung mit einer verminderten Auslaugung reagieren. Des Weiteren werden für diese Schlackenart die höchsten CO₂-Aufnahmekapazitäten von bis zu 10 M.-% bestimmt, was im Hinblick auf die Bindung von Kohlendioxid in Schlacken und der CO₂-Reduktion in der Atmosphäre ebenfalls relevant erscheint. In anschließenden Untersuchungen könnte in Praxis- oder Betriebsversuchen festgestellt werden, ob es sich wirtschaftlich lohnen würde, mit dem im Verhüttungsprozess entstehenden Kohlendioxid gezielt CO₂ in Schlacken zu binden. Weiterhin erscheint es lohnenswert, andere Beschleunigungsarten der Karbonatisierung,

zum Beispiel durch höhere Wassergehalte oder aber durch Temperatur-/Druckerhöhung, zu erforschen.

Dank

Das IGF-Vorhaben Nr. 16622 N der Forschungsvereinigung VDEh-Gesellschaft zur Förderung der Eisenforschung mbH wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- [1] Merkel, Th.: Daten zur Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken, Report des FEhS – Instituts für Baustoff-Forschung e.V., 20 (2013) Nr. 1, S. 12
- [2] Bialucha, R., Spanka, M.: Zeitliche Abhängigkeit der Karbonatisierung von Stahlwerksschlacken und Auswirkung auf die Löslichkeit umweltrelevanter Bestandteile, Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 16622 N, (2014)
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzstoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material – Entwurf Oktober 2012
- [4] Mudersbach, D.: Verbesserung der Eigenschaften von Elektroofenschlacken aus der Herstellung von nicht-rostenden Stählen zur Nutzung dieser Schlacken im Verkehrsbau. Schriftenreihe des FEhS – Instituts für Baustoff-Forschung e.V., (2004) Heft 11
- [5] Drissen, P.: Mineralische Bindung von Spurenelementen in Stahlwerksschlacken. Report des FEhS – Instituts für Baustoff-Forschung e.V. 13 (2006) Nr. 1, S. 6-8

- [6] Bialucha, R.: Löslichkeit umweltrelevanter Elemente aus Eisenhüttenschlacken in Abhängigkeit vom pH-Wert, Report des FEhS – Instituts für Baustoff-Forschung e.V. 14 (2007) Nr. 1, S. 1-5
- [7] van Zomeren, A., van der Laan, S. R., Kobesen, H. B. A., Huijgen, W. J. J., Comans, R. N. J.: Changes in mineralogical and leaching properties of converter steel slag resulting from accelerated carbonation at low CO₂ pressure. Waste Management 31 (2011), S. 2263-2244
- [8] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau – TP BF-StB, Teil B 7.1: CBR-Versuch, Ausgabe 1988
- [9] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau – TP Gestein-StB Teil 7.1.2 Trogverfahren, Ausgabe 2008
- [10] DIN 19529: Elution von Feststoffen – Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen Stoffen mit einem Wasser-Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg, Januar 2009
- [11] DIN 19528: Elution von Feststoffen – Perkulationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen, Januar 2009
- [12] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau – TP Gestein-StB Teil 7.1.3 Perkulationsverfahren, Ausgabe 2008
- [13] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau – TL SoB-StB, Ausgabe 2004 / Fassung 2007

Verdichtbarkeit und Tragfähigkeit ungebundener Baustoffgemische

D. Demond, M.Sc., Dr.-Ing. Th. Merkel

Einleitung

Aufgrund der zentralen Lage Deutschlands innerhalb Europas wird die gesamte Straßenkonstruktion seit Jahren zunehmend durch das Verkehrsaufkommen beansprucht. Ein Ende dieser Entwicklung ist nicht abzusehen, weshalb in Zukunft die Beanspruchung weiter steigen wird [1]. Aus diesem Grund ist es wichtiger denn je, standfeste und verformungsarme Straßen zu bauen, die hinsichtlich ihres Langzeitverhaltens die immer weiter steigenden Belastungen ohne Schäden aufnehmen können.

Der Bau standfester und verformungsarmer Straßen erfordert auch eine optimale in-situ-Verdichtung, die über den Verdichtungsgrad belegt wird. Dieser benötigt als Bezugsgröße eine im Labor bestimmte Raumdichte. In Deutschland und einer Reihe weiterer europäischer Länder [2] ist zur Bestimmung dieser Raumdichte der Proctorversuch, der in den 1930er Jahren von Ralph R. Proctor [3] für den Erdbau entwickelt wurde, festgelegt. In der BRD ist die Durchführung des Proctorversuchs für den Erdbau in einer nationalen DIN und für den Straßenoberbau in einer europäischen DIN EN beschrieben.

Vermutlich könnten viele der im Straßenoberbau verwendeten Prüfverfahren auch für den Bereich des Erdbaus (Unterbau und Untergrund) eingesetzt werden. Allerdings beziehen sich europäische Normen nur auf den Straßenoberbau, da die Schaffung europäisch harmonisierter Normen in erster Linie der Vermeidung von Handelshemmnissen diene und dies für den Erdbau nicht für notwendig erachtet wurde. Daraus folgt, dass gleichgelagerte Laborprüfungen für den Bereich des Ober- und des Unterbaus in unterschiedlichen Normen beschrieben sind, die sich in Details der Durchführung bzw. Prüfparameter nur geringfügig unterscheiden und wahrscheinlich zu gleichen Ergebnissen führen. Insbesondere die Bereiche folgender Untersuchungen sind von diesem Umstand betroffen:

- ♦ Die Durchführung der Korngrößenverteilung wird für Erdbauwerke nach DIN 18123 [4], für den Straßenoberbau nach DIN EN 933-1 [5] bestimmt.

- ♦ Die Dichte des Einzelkorns wird im Erdbau nach DIN 18124 [6] und im Straßenoberbau nach DIN EN 1097-6 [7] gemessen.
- ♦ Die Beurteilung der Tragfähigkeit einer ungebundenen Schicht erfolgt im Labor mittels CBR-Versuch, der für den Erdbau in den TP BF-StB [8] und für den Bereich des Straßenoberbaus in DIN EN 13286-47 [9] beschrieben wird.
- ♦ Die Messung der Raumdichte im Labor erfolgt für den Erdbau durch den Proctorversuch nach DIN 18127 [10]. Für den Straßenoberbau ist der Proctorversuch in DIN EN 13286-2 [11] beschrieben. Zusätzliche Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Trockendichte und des Wassergehaltes, deren Anwendung in Deutschland aktuell nicht üblich ist, sind in weiteren europäischen Normen (DIN EN 13286-3, -4 und -5 [12-14]) beschrieben. Zudem existiert ein weiteres europäisch genormtes Verdichtungsverfahren entsprechend DIN EN 1744-1 [15], das der Probenvorbereitung für den Dampfversuch zur Prüfung einer möglichen Volumenzunahme von Stahlwerksschlacke dient.

Ziel eines vom BMWi über die AiF geförderten Forschungsvorhabens war, alle aufgelisteten Laborprüfungen aus dem Bereich des Erd- und Straßenoberbaus durch eine umfassende Laborstudie unter Verwendung verschiedener Baustoffgemische untereinander zu vergleichen und die erzielten Resultate zur Beantwortung verschiedener Fragestellungen zu nutzen. Eine Kernfrage war hierbei, ob die Trennung von labor-technischen Prüfungen nach Erd- bzw. Straßenoberbau sinnvoll ist, oder ob die jeweiligen Prüfungen zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Darüber hinaus wurden neuere europäisch genormte Verdichtungsverfahren in die Studie einbezogen, deren Ergebnisse untereinander verglichen und der Einfluss aller berücksichtigten Verdichtungsverfahren auf die Sieblinie quantifiziert. Aus den Versuchsergebnissen konnten eindeutige Schlüsse gezogen werden, sie ermöglichten die Beantwortung der Fragestellungen bzw. das Erreichen der Zielsetzungen.

Untersuchungsprogramm und Verfahren

Es wurden vergleichende Untersuchungen für die Messgrößen Rohdichte, Sieblinie, Trockendichte und optimaler Wassergehalt (mittels verschiedener Verdichtungsverfahren), Kornzertrümmerung und resultierende Sieblinie sowie die Tragfähigkeit anhand nationaler und europäischer Normen durchgeführt. 13 Baustoffgemische (Schlacken, Böden, RC-Baustoffe, Naturgesteine etc.) wurden getestet und in der Summe ca. 1000 Probekörper im Verkehrsbau Labor des FEHS-Instituts bearbeitet. Eine statistische Stabilität der Ergebnisse wurde durch eine Mehrfachbelegung der jeweiligen technischen Prüfungen gewährleistet.

Das umfassendste Arbeitselement der Versuchsmatrix bestand in den Verdichtungs- und Tragfähigkeitsversuchen. Ziel der mit verschiedenen Verdichtungsapparaturen durchgeführten Verdichtungsversuche ist stets die Herstellung einer dichteren Kornmatrix und daraus resultierend die Bestimmung einer maximalen Trockendichte unter Verwendung eines sog. optimalen Wassergehaltes. Während beim Proctorversuch ein Fallgewicht, das auf die Probenoberfläche fällt, zur Herstellung der dichteren Kornmatrix genutzt wird, erfolgt die Verdichtung mittels Vibrationshammer durch einen Schlagbohrer, der mittels einer Stampfplatte vertikal sowie form- und kraftschlüssig auf der Probenoberfläche aufsitzt. Die Verdichtung mit Vibrations- bzw. Rütteltisch nutzt eine Schwingung mit einer festgelegten Amplitude und einem Auflastgewicht.

Beim CBR-Versuch (CBR = California Bearing Ratio) wird die Tragfähigkeit eines verdichteten Gemisches oder einer Bodenprobe ermittelt und in Bezug gesetzt zu einem Referenzmaterial mit bekannten Eigenschaften. Während des Versuches wird ein Stempel, der mittig auf der Probenoberfläche aufsitzt, mit einer vorgegebenen Eindringgeschwindigkeit in die Probenoberfläche eingepresst. Bei festgelegten Eindringtiefen wird die jeweils benötigte Kraft ermittelt, in Bezug zur beim Referenzmaterial benötigten Kraft gesetzt und die Tragfähigkeit als Prozentwert angegeben. Alle verwendeten Verdichtungsgeräte und die CBR-Apparatur sind in Bild 1 dargestellt.



Bild 1: Verdichtungsgeräte nach DIN 18127 und DIN EN 13286-2 (Proctor), DIN EN 13286-4 (Vibrationshammer), DIN EN 13286-5 (Vibrationstisch), DIN EN 1744-1 (Rütteltisch) und CBR-Apparatur nach TP BF-StB und DIN EN 13286-47

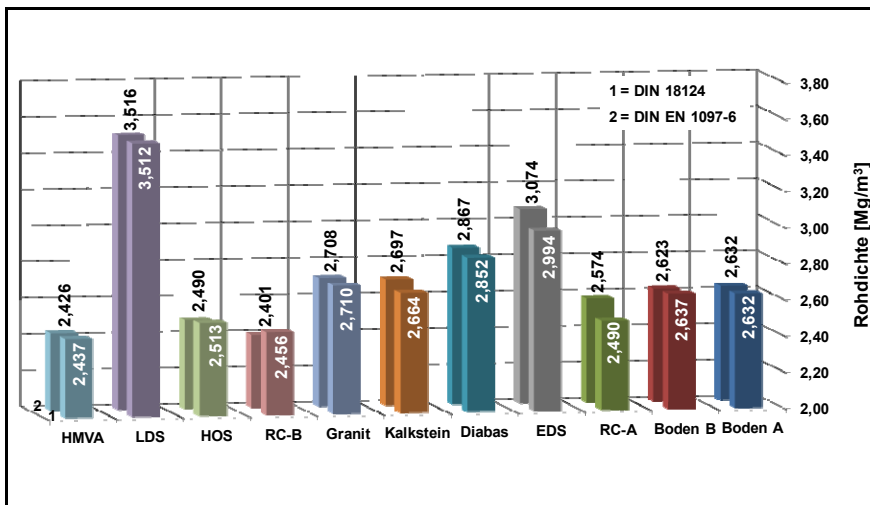


Bild 2: Gemittelte Ergebnisse der Rohdichtebestimmungen nach DIN 18124 und DIN EN 1097-6

Ergebnisse und Diskussion

– Baustoffgemische

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden vier Erdbaugemische (zwei Böden, ein RC-Baustoff und eine Edelstahlschlacke) mit einem Größtkorn bis 16 mm und sieben Straßenoberbaugemische (drei Naturgesteine, ein RC-Baustoff, eine Hochofenschlacke, eine LD-Schlacke und eine Hausmüllverbrennungsasche) mit einem Größtkorn bis 32 mm einbezogen. Durch die Vielfalt an Probenmaterialien wurde eine möglichst große Materials Spannweite und deren Eigenschaften berücksichtigt.

– Korn- / Rohdichte

Die gemittelten Ergebnisse der Rohdichtebestimmungen nach DIN 18124 und DIN EN 1097-6 sind grafisch in **Bild 2** dargestellt. Im vorderen Bereich des Diagramms sind die Resultate nach DIN 18124 und im hinteren Bereich nach

DIN EN 1097-6 zu sehen. Die Ergebnisse der Rohdichtebestimmungen weisen materialtypische Werte für jedes Baustoffgemisch auf. Grundsätzlich verdeutlicht Bild 2, dass eine Bestimmung der Rohdichte nach nationaler oder europäischer Norm zu nahezu identischen Resultaten führt. Die geringfügig größer ausfallenden Ergebnisabweichungen für die Baustoffgemische RC-A, EDS und RC-B lassen sich durch die geringe Datensatzgröße (zwei Bestimmungen pro Material) erklären.

– Pre-Korngrößenverteilungen

Die Eingangssiebungen der Baustoffgemische wurden nach DIN 18123 und DIN EN 1097-6 in Doppelbestimmung angefertigt. Die Ergebnisse der Lasergranulometrie, die für Korngrößen unterhalb von 0,063 mm durchgeführt wurde, wurden in die Auswertgrafiken implementiert. Beispielsweise ist in **Bild 3** das Ergebnis der Eingangssiebung am Baustoff Boden A dargestellt.

Die Darstellung der Ergebnisse nach nationaler bzw. europäischer Norm bedingt in erster Linie ein anderes Layout, so dass beide Auswertverfahren nahezu gleiche Grafiken ergeben. Ein Unterschied ist in der Klassifizierung eines Baustoffes nach Erdbaunorm entsprechend seiner Sieblinie in Ton-/Schluffkorn, Sandkorn und Kies-/Splittkorn gegeben. Aufgrund der erzielten Ergebnisse lässt sich jedoch festhalten, dass die Durchführung einer Siebung nach nationaler bzw. europäischer Norm nicht zu einem prinzipiell anderen Ergebnis führt und somit als gleichwertig angesehen werden kann.

– Verdichtungsversuche nach DIN 18127 und DIN EN 13286-2

Die gemittelten Ergebnisse aus je fünf Einzelversuchen der vergleichenden Verdichtungsversuche mittels Proctorapparat sind grafisch in **Bild 4** für die Trockendichten und in **Bild 5** für die entsprechenden optimalen Wassergehalte zusammengefasst.

Aus den Darstellungen lässt sich entnehmen, dass die Trockendichten (Bild 4), die nach nationaler und europäischer Norm erzielt wurden, eine sehr hohe Übereinstimmung aufweisen. Bild 5 vermittelt tendenziell den gleichen Eindruck wie Bild 4, wobei hier die Ergebnisse für einige wenige Straßenoberbaugemische etwas variabler ausfallen. Dennoch ist die Ergebniskonsistenz der Trockendichten und die der korrespondierenden Wassergehalte als hoch einzustufen. Dieses Bild wird durch jedes Material bestätigt und kann daher als kontinuierlich angenommen werden. Es unterstreicht aufgrund dessen auch für die Verdichtungsversuche mittels Proctorapparat die Forschungshypothese, dass beide Verfahrensanweisungen zu vergleichbaren Resultaten führen.

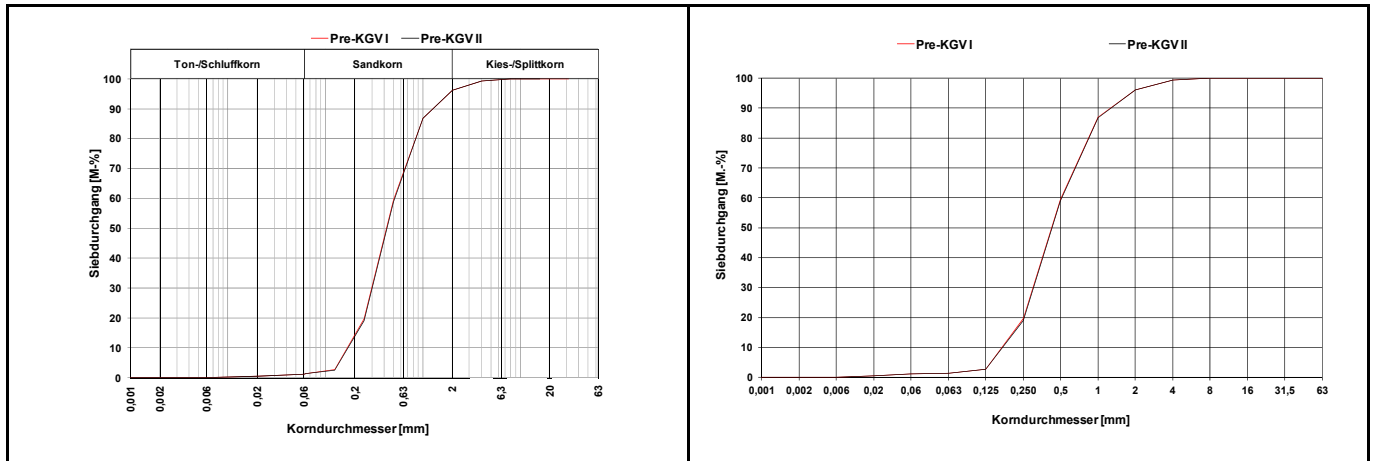


Bild 3: Pre-Korngrößenverteilungen Boden A entsprechend DIN 18123 (links) und DIN EN 933-1 (rechts)

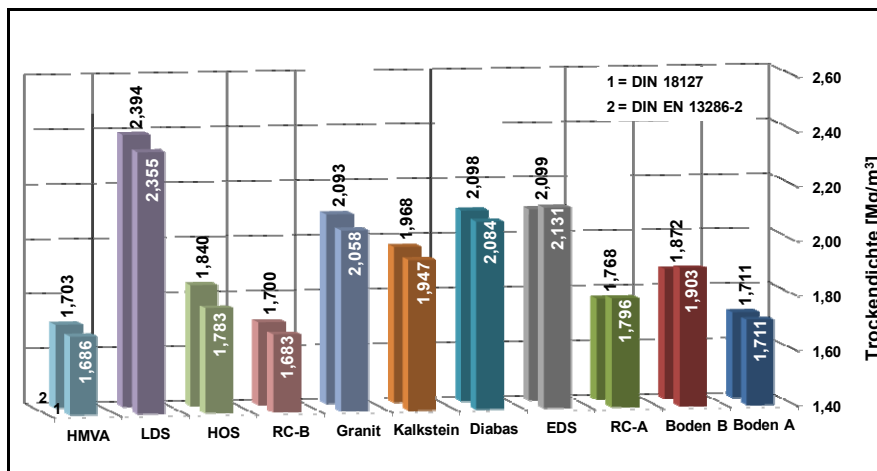


Bild 4: Vergleichende Darstellung der gemittelten Trockendichteergebnisse aus Proctorversuchen nach DIN 18127 und DIN EN 13286-2

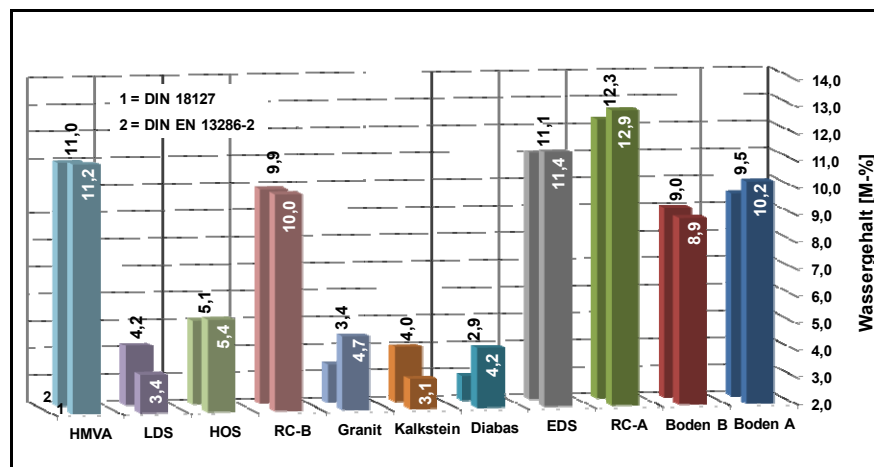


Bild 5: Vergleichende Darstellung der gemittelten optimalen Wassergehaltsergebnisse aus Proctorversuchen nach DIN 18127 und DIN EN 13286-2

– Verdichtungsversuche mittels Vibrationshammer-, Vibrations- und Rütteltisch

Da die Ergebnisse der Proctorversuche nahezu identisch ausfallen, wurden die Resultate aus einer Fünffachbelegung, die

jeweils mit dem Vibrationshammer (DIN EN 13286-4) und dem Vibrationstisch (DIN EN 13286-5) erzielt wurden, "nur" in direkter Relation zu den Werten aus Proctorversuchen nach DIN EN 13286-2 gesetzt. In **Bild 6** werden diese berechneten Ergebnisse vorgestellt.

Die Referenzwerte aus den Prüfungen nach DIN EN 13286-2 wurden in Bild 6 als schwarze Linie dargestellt. Aus dem direkten grafischen Vergleich ist zu erkennen, dass die normalisierten Trockendichten der Vibrationshammerversuche mit etwa 4 bis 8 Prozent Abweichung um das Proctorniveau liegen, während die optimalen Wassergehalte überwiegend unterhalb der optimalen Wassergehalte nach Proctor zu finden sind. Ein umgekehrtes Bild liefert das Verdichtungsverfahren mittels Vibrationstisch. Hier liegen die normalisierten Trockendichten häufig und teils deutlich unterhalb und die Wassergehalte oberhalb des Proctorniveaus. Die Abweichungen für das Vibrationstischverfahren liegen im Vergleich zur Proctordichte für die meisten Baustoffgemische zwischen minus 10 und 15 % und für die Wassergehalte tendenziell um plus ca. 20 bis 35 %.

Auf eine Berücksichtigung der Daten aus dem Verfahren nach DIN EN 1744-1 wurde verzichtet, da mit diesem Verfahren Proben trocken verdichtet werden. Die Trockendichteergebnisse nach DIN EN 1744-1 fielen mit Ausnahme der Baustoffgemische Boden A und Boden B teils um 20 % niedriger aus als die Ergebnisse, die nach Proctor erzielt wurden.

– Post-Korngrößenverteilungen

Nach den Verdichtungsversuchen wurden die Versuchsproben nochmals gesiebt, um eine potenzielle Kornzertrümmerung durch die Verdichtungsverfahren zu ermitteln und vergleichend zum Proctorverfahren zu bewerten. Für dieses Anliegen wurden die Proben ausgewählt, die mit einem Wassergehalt verdichtet wurden, der dem optimalen Wassergehalt entsprach oder diesem nahe kam. Ausnahme bildeten die Proben, die nach DIN EN 1744-1 verdichtet wurden.

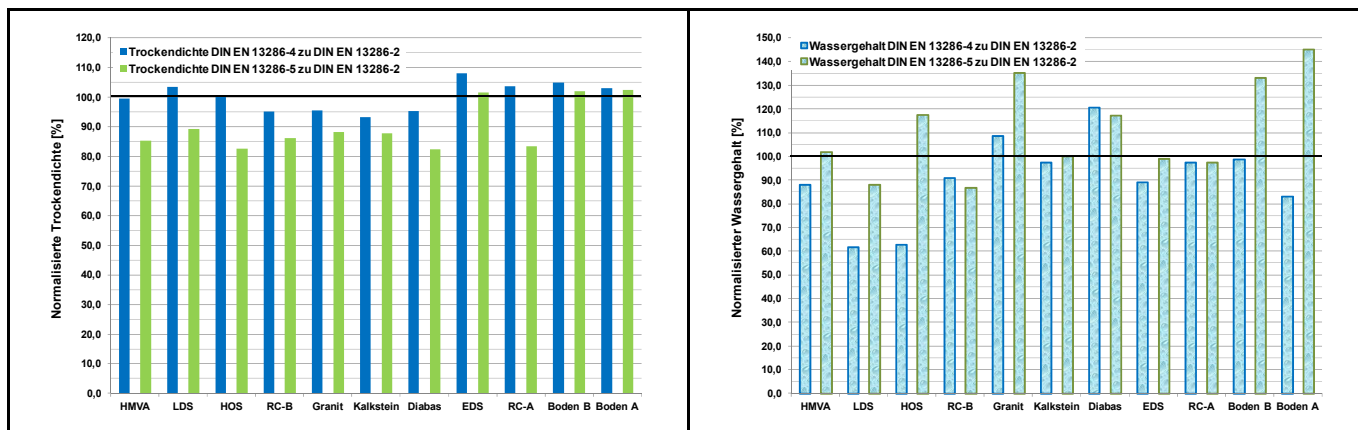


Bild 6: Relationsdarstellung der Ergebnisse entsprechend DIN EN 13286-2 zu DIN EN 13286-4 und -5

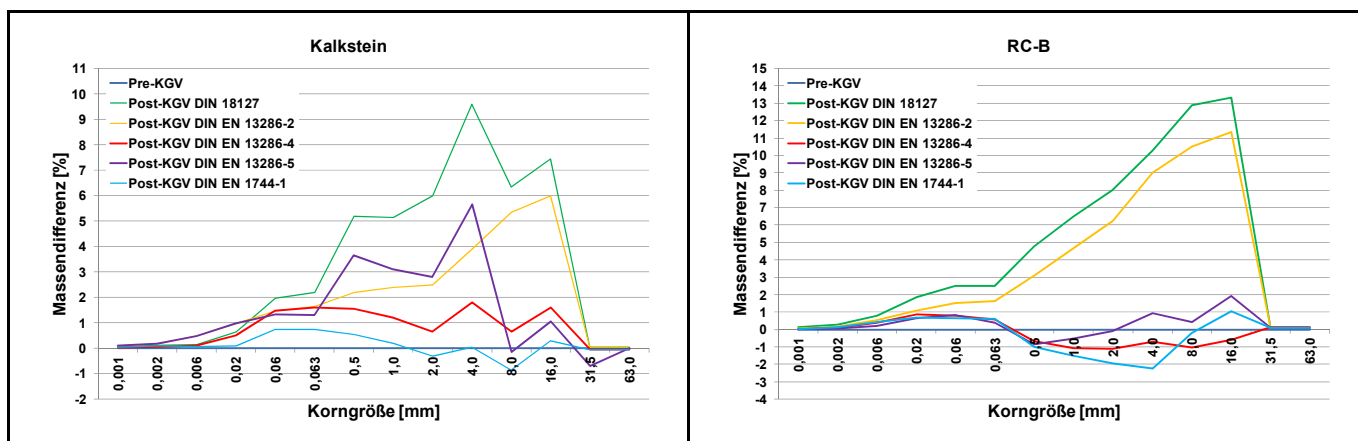


Bild 7: Einfluss der Verdichtungsverfahren auf die Kornzertrümmerung

Im Anschluss erfolgte die Nachsiebung in Doppelbelegung entsprechend DIN 18123 und DIN EN 933-1.

Um eine einheitliche Aussagebasis zur Beurteilung der Kornzertrümmerung zu ermöglichen, wurden die Massenanteile der gemittelten Eingangssiebung (Pre-KGV) auf null normiert, sodass diese Daten deckungsgleich mit der Abszisse verlaufen. Im Anschluss wurden die gemittelten Daten der nachträglichen Siebungen (Post-KGV's) auf die Eingangssiebung (Pre-KGV) normiert, indem alle prozentualen Massenanteile der Nachsiebung pro verwendeten Sieb durch die prozentualen Massenanteile der Eingangssiebung geteilt wurden. Das Resultat dieses Vorgehens wird in [Bild 7](#) vorgestellt. Beispielhaft sind dort die Ergebnisse für die Baustoffgemische Kalkstein und RC-B dargestellt.

Die hier präsentierten Grafiken lassen eindeutig den Schluss zu, dass das Proctorverfahren den größten Einfluss auf die Kornzertrümmerung zeigt. Die maximale Massenanteilszunahme liegt bei diesem Verfahren für die dargestellten Ergebnisse zwischen 9 und 13 Prozent. Der geringste

Einfluss lässt sich unter Berücksichtigung aller Daten für das Verfahren mittels Vibrationshammer nach DIN EN 13286-4 beobachten, das mit Ausnahme des Baustoffes HOS eine Kornzertrümmerungsrate von ca. 2 Prozent bewirkt. Eine Erklärung für diese Ergebnisse ist in der Art der Verdichtung der Verfahren zu finden. Während bei dem Vibrationshammerverfahren ein Stempel kraft- und formbündig auf der Probenmasse aufliegt und somit nahezu keine direkte Angriffsfläche auf einzelne Körner liefert, erfolgt die Verdichtung mittels Proctorverfahren durch ein Fallgewicht mit einem Durchmesser, der kleiner als der Probentopf ausfällt. Dieses fällt aus einer festgelegten Höhe auf die Kornmatrix. Folge hieraus ist die vermehrt ausfallende Kornzertrümmerung beim Proctorverfahren. Die Verfahren nach DIN EN 13286-5 und DIN EN 1744-1 scheinen eine Kornzertrümmerung hervorzurufen, die sich tendenziell zwischen dem Proctor- und Vibrationshammerverfahren befindet und ihren Ursprung wahrscheinlich in der Scherung der Probenpartikel aufgrund der schwingenden Bewegung während des Verdichtungs Vorganges hat.

– Tragfähigkeitsversuche (CBR-Versuche)

Die Tragfähigkeitsmessungen wurden nach TP BF-StB und DIN EN 13286-47 durchgeführt und deren Ergebnisse verglichen. Die Herstellung der Proben erfolgte entsprechend DIN 18127 und DIN EN 13286-2 unter Berücksichtigung der im Voraus bestimmten optimalen Wassergehalte. Die vollständigen gemittelten Ergebnisse der Versuche sind als grafische Darstellung in [Bild 8](#) zusammengefasst.

Im genannten Diagramm sind im vorderen Bereich die Resultate, die nach nationaler, und im hinteren Bereich die Resultate, die nach europäischer Anweisung erzielt wurden, dargestellt. Auffällig hierbei ist, dass mit Ausnahme des Baustoffgemisches LDS alle anderen Straßenoberbaumaterialien nahezu gleiche Ergebnisse erzielen. Im Gegensatz hierzu stehen die Erdbaumaterialien, die auffällige bis, speziell die Edelschlacke (EDS), starke Ergebnisunterschiede aufweisen. Werden diese Abweichungen prozentual betrachtet fallen sie erheblich aus. Die Ursache dieser Abweichungen wurde im Ablauf der Proctorverdich-

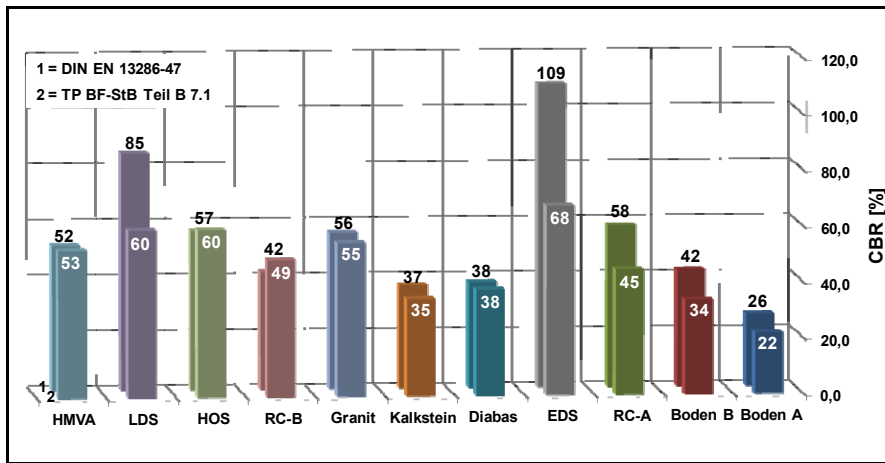


Bild 8: Gemittelte Ergebnisse der CBR-Versuche entsprechend TP BF-StB Teil B 7.1 und DIN EN 13286-47

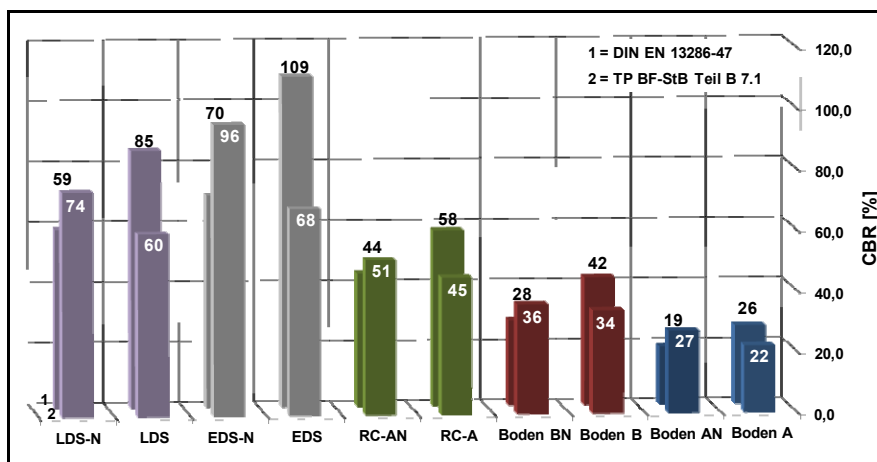


Bild 9: Ergebnisse der zusätzlichen CBR-Versuche entsprechend TP BF-StB Teil B 7.1 und DIN EN 13286-47

tung gefunden: Bei der (gemäß TP BF-StB vorgeschriebenen) Verdichtung nach DIN 18127 wird der Proctortopf so unter dem Fallgewicht bewegt, dass dieses in einer kreisförmigen Bahn auf das zu verdichtende Probenmaterial fällt. Jede Schicht wird hierbei mit 22 sukzessiv platzierten Schlägen versehen. Dies ist bei der Verdichtung nach DIN EN 13286-2 grundsätzlich genauso, allerdings wird jede eingebaute Schicht mit 56 Schlägen versehen und acht dieser 56 Schläge werden nicht weiter in den Umlauf gesetzt, sondern mittig auf die Probe platziert. Die acht zentrierten Verdichtungsschläge pro Schicht führen zu einer höheren Festigkeit an dieser Stelle, die sich beim CBR-Versuch nach DIN EN 13286-47 bemerkbar macht, da genau an dieser Stelle der Versuchsstempel aufsitzt. Bei den eher größeren Gemischen für den Straßenoberbau tritt dieser Effekt nicht auf. Um die hier getroffenen Aussagen zu belegen, wurden weitere CBR-Versuche an allen Erdbaumaterialien durchgeführt. Für die zusätzlichen Versuche wurde nur die Verdichtungsgrundlage ausgetauscht.

Während Boden A im vorderen Bereich des Diagramms (Bild 9) nach DIN-Vorschrift verdichtet und nach nationaler CBR-Vorschrift getestet wurde, wurde sein Gegenstück Boden AN nach DIN EN-Vorschrift verdichtet und nach nationaler CBR-Vorgabe getestet.

Mittels der beschriebenen Handhabung konnten die ursprünglichen Ergebnisse nahezu umgekehrt werden. Dies spricht für einen eindeutigen Zusammenhang zwischen CBR-Wert und zugrunde liegender Verdichtung. Ohne weiterführende Untersuchungen vorgenommen zu haben, wird zusätzlich vermutet, dass der Anteil an Feinmaterial auch einen Einfluss auf das Ergebnis hat, da alle Erdbaumaterialien und ein Straßenoberbaumaterial mit einem relativ hohen Feinanteil von den Ergebnisunterschieden betroffen waren.

Sofern der Einfluss der Proctorverdichtung auf das CBR-Ergebnis berücksichtigt wird, lässt sich auch für diese technische Prüfung keine Notwendigkeit zur Unterscheidung

nach Erd- oder Oberbau festhalten. Vielmehr muss berücksichtigt werden, dass die europäische Vorgehensweise Ergebniskonsequenzen haben kann, die nicht auf den CBR-Versuch selbst, sondern hauptsächlich auf die Probenherstellung zurück zu führen sind.

Zusammenfassung

Im Straßenbau werden der Erdbau und der Straßenoberbau räumlich durch das Planum getrennt. Im Zuge der Entwicklung von europäisch harmonisierten Normen wurde das Planum im übertragenden Sinne zudem zu einer Anwendungsgrenze für Normen. Während unterhalb (Erdbau) dieser Grenze national geltende Normen zum Einsatz kommen, müssen für den Straßenoberbau europäisch geltende Normen berücksichtigt werden. Speziell für die Messgrößen Verdichtung und Tragfähigkeit stellte sich die Frage, ob eine solche Anwendungsgrenze sinnvoll ist, da die jeweilig zugrunde liegenden Normen sich inhaltlich nur unwesentlich in der Durchführung und deren Versuchsparametern unterscheiden. Aufgrund dessen wurden in diesem Forschungsprojekt vergleichende technische Laborprüfungen aus dem Bereich des Erdbaus und Straßenoberbaus unter Berücksichtigung mehrerer Zielsetzungen durchgeführt. Zusammenfassend lassen sich die Ergebnisse wie folgt darstellen:

– Rohdichtebestimmung nach DIN 18124 und DIN EN 1097-6

Die Prüfungen der Rohdichten, die nach DIN 18124 und DIN EN 1097-6 bestimmt wurden, weisen nur unwesentliche Ergebnisunterschiede auf. Aufgrund dessen können aus ergebnistechnischer Sicht die Verfahren als gleichwertig angesehen werden.

– Korngrößenverteilungen nach DIN 18123 und DIN EN 933-1

Anhand der Tatsache, dass die Korngrößenverteilungen nach nationaler und europäischer Norm sich hauptsächlich in der Form der Darstellung unterscheiden, konnte auch bei dieser technischen Prüfung kein wesentlicher Ergebnisunterschied festgestellt werden. Einschränkend muss hinzugefügt werden, dass entsprechend DIN 18123 die Korngrößenverteilung auch für Korngrößen unterhalb 0,063 mm mittels Sedimentation vorgesehen ist, während DIN EN 933-1 diesen Korngrößenbereich nicht berücksichtigt.

– Proctorversuche nach DIN 18127 und DIN EN 13286-2

Die vergleichenden Prüfungen zur Bestimmung der Referenzraumdichte lieferten sehr übereinstimmende Ergebnisse. Dies betrifft vor allem die Trockendichte, die äußerst deckungsgleich bestimmt wurde. Für den korrespondierenden optimalen Wassergehalt wurden zwischen nationaler und europäischer Norm für einige wenige Straßenoberbaumaterialien leichte Ergebnisabweichungen gemessen. Diese werden aber nicht der technischen Prüfung selbst, sondern vielmehr allgemein bekannten Ergebnisschwankungen für Proctorversuche zugeschrieben. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Proctorversuche nach nationaler oder europäischer Form zu vergleichbaren Ergebnissen führen.

– Tragfähigkeitsversuche (CBR-Versuche) nach TP BF-StB Teil B 7.1 und DIN EN 13296-47

Auch für diese technische Prüfung ist anhand der Ergebnisse heraus keine Notwendigkeit zur Unterscheidung zwischen Erd- und Straßenoberbau zu erkennen. Vielmehr muss beachtet werden, dass die Probenherstellung Einfluss auf den CBR-Wert haben kann.

– Zusätzliche Verdichtungsversuche nach DIN EN 13286-4 und -5

Die Versuchsergebnisse nach DIN EN 13286-4 (Vibrationshammer) und DIN EN 13286-5 (Vibrationstisch) wurden im Vergleich zu den Ergebnissen der Versuche nach DIN EN 13286-2 (Proctor) bewertet. Die Resultate ermöglichen den Schluss, dass das Vibrationshammerverfahren aus ergebnistechnischer Sicht ein adäquates Vergleichsverfahren zum Proctorverfahren darstellt und ähnliche Resultate liefert. Auch aus Sicht der Anwendung erscheint das Verfahren nach DIN EN 13286-4 sehr praktikabel. Das Vibrationstischverfahren erzielte Resultate, die stark vom Proctorniveau abwichen und somit einen Vergleich nur bedingt ermöglichen. Zudem offenbarte sich das Vibrationstischverfahren als zeitaufwändig und wenig anwendungsfreundlich.

– Kornzertrümmerung durch Verdichtungsverfahren

Die Kornverfeinerung betrifft hauptsächlich Baustoffgemische aus dem Straßenoberbau. Als Verfahren, das den größten Einfluss auf die Kornzertrümmerung hat, wurde das

Proctorverfahren identifiziert. Das Vibrationshammerverfahren zeigte den geringsten Einfluss auf die Kornzertrümmerung, während die Kornzertrümmerungsraten der Rütteltischverfahren zwischen Proctor- und Vibrationshammerverfahren eingestuft werden konnten.

Ausblick

Sofern einige wenige einschränkende Aspekte, die im Voraus vorgestellt wurden, berücksichtigt bleiben, lässt sich der Schluss ziehen, dass die berücksichtigten technischen Prüfungen aus dem Bereich des Erd- und Straßenoberbaus vergleichbare Resultate liefern. Die vorgestellten Ergebnisse legen daher die Vermeidung von zusätzlichen Untersuchungen aufgrund unterschiedlicher Prüfanweisungen nahe. Die labortechnische Differenzierung zwischen Erd- und Straßenoberbau scheint wenig zweckvoll und bedingt für den Anwender unnötige Umstände. In den entsprechenden Gremien sollte daher die Differenzierung überdacht und überarbeitet werden.

Speziell für die Prüfungen zur Verdichtung und Tragfähigkeit sind kostenintensive automatisierte Versuchsaapparaturen notwendig. Wie aus den vorgestellten Ergebnissen zu erkennen ist, ist die Notwendigkeit der Anschaffung von Prüfeinrichtungen, die für den Erdbau und Straßenoberbau vorgesehen sind, nicht vorhanden, da die jeweiligen Prüfeinrichtungen vergleichbare Ergebnisse liefern.

Anmerkend lässt sich hinzufügen, dass inzwischen auf dem Markt Versuchsaapparaturen zur Bestimmung der Proctordichte und Tragfähigkeit angeboten werden, die sowohl die nationale als auch europäisch geltende Prüfvorschrift durchführen können. Neben den vorliegenden Ergebnisargumenten könnten auch auf diesem Wege unnötig erscheinende Kosten für zwei Versuchsaapparaturen vermieden werden.

Dank

Das IGF-Vorhaben Nr. 16733 N der Forschungsvereinigung VDEh-Gesellschaft zur Förderung der Eisenforschung mbH wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für die Förderung sei an dieser Stelle ausdrücklich gedankt.

Literatur

- [1] Ickert, I. et al (2007): Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050, Projekt: 26.0185/2006 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- [2] Krass K., Kellermann, C.: Verfahren zum Nachweis der erreichten Verdichtung bei Tragschichten ohne Bindemittel, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 768, (1999)
- [3] Proctor, R.R.: Fundamental Principles of Soil Compaction, Engineering News-Record, Volume III, Number 9, 31.08.1933, pp. 245-248
- [4] DIN 18123: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung, November 1996
- [5] DIN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren, März 2012
- [6] DIN 18124: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korndichte – Kapillarpyknometer, Weithalspyknometer, Gaspyknometer, April 2011
- [7] DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, September 2013
- [8] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau - TP BF-StB, Teil B 7.1: CBR-Versuch, Ausgabe 2012
- [9] DIN EN 13286-47: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische - Teil 47: Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio), des direkten Tragindex (IBI) und des linearen Schwellwertes, Juli 2012
- [10] DIN 18127: Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch, September 2012

- [11] DIN EN 13286-2: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische - Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz-Trockendichte und des Wassergehaltes – Proctorversuch, Februar 2013
- [12] DIN EN 13286-3: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische - Teil 3: Laborprüfverfahren für die

Trockendichte und den Wassergehalt; Vibrationsverdichtung mit vertikalem Druck, Juli 2003

- [13] DIN EN 13286-4: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische - Teil 4: Laborprüfverfahren für die Trockendichte und den Wassergehalt; Vibrationshammer, Juli 2003

- [14] DIN EN 13286-5: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische - Teil 5: Laborprüfverfahren für die Trockendichte und den Wassergehalt; Vibrationstisch, Juli 2003

- [15] DIN EN 1744-1: Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Chemische Analyse, März 2013

Messung der elektrischen Leitfähigkeit von flüssigen Schlacken

D. Algermissen, M.Sc., Dr.-Ing. D. Mundersbach (FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V.)
Dipl.-Ing. R. König, A. Naujock, Dipl.-Ing. L. Rose (SMS Siemag AG)

Die Kenntnis von thermophysikalischen Daten von schmelzflüssigen metallurgischen Schlacken, zum Beispiel Viskosität, Wärmekapazität, elektrische oder Wärmeleitfähigkeit, ist von elementarer Bedeutung für das Verständnis von metallurgischen Prozessen, aber auch für die Auslegung von metallurgischen Aggregaten. Allerdings ist die experimentelle Ermittlung dieser Kenngrößen im Labor aufgrund der hohen Temperaturen und Aggressivität der Schlacken anspruchsvoll. Deswegen wurden in der Vergangenheit Modelle zur Bestimmung dieser Daten entwickelt. Jedoch werden die Ergebnisse dieser Modelle, insbesondere außerhalb der typischen Schlackenzusammensetzungen, unpräzise.

Für die Stahlherstellung mittels Elektrolichtbogenofen wird zwischen den 3 Elektroden (Dreiphasenwechselstrom) beziehungsweise zwischen der Elektrode und Bodenelektrode (Gleichstrom) zum Einsatzmaterial ein Lichtbogen mit Temperaturen um die 8600 K erzeugt [1]. Durch Wärme-konvektion und -strahlung wird dann die elektrothermische Energie des Lichtbogens zur Wärmeübertragung auf das Einsatzmaterial genutzt [2].

Es ist bekannt, dass sich in diesem Prozess die elektrische Leitfähigkeit der metallurgischen Schlacken, im stationären Fall die Proportionalitätskonstante zwischen der elektrischer Feldstärke und der Stromdichte, deutlich auf die jeweils einzubringende Leistung und damit die Temperatur auswirkt [2], [3]. Besonders beim Einschmelzen von Komponenten mit unterschiedlicher Zusammensetzungen ist daher eine mögliche Einschätzung der elektrischen Leitfähigkeit der jeweiligen Schlacke von großer Bedeutung.

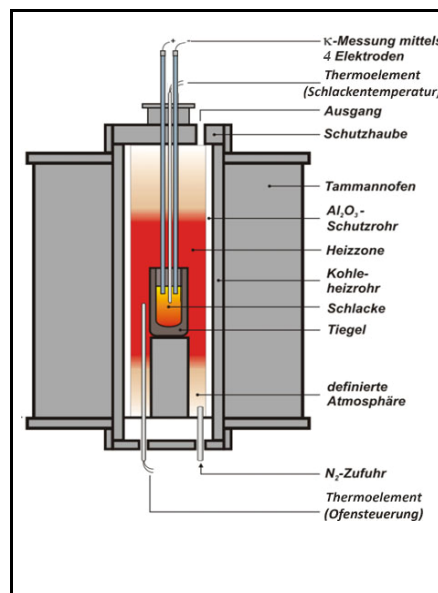


Bild 1: Schematischer Aufbau des Tammann-Ofens



Bild 2: Messapparatur

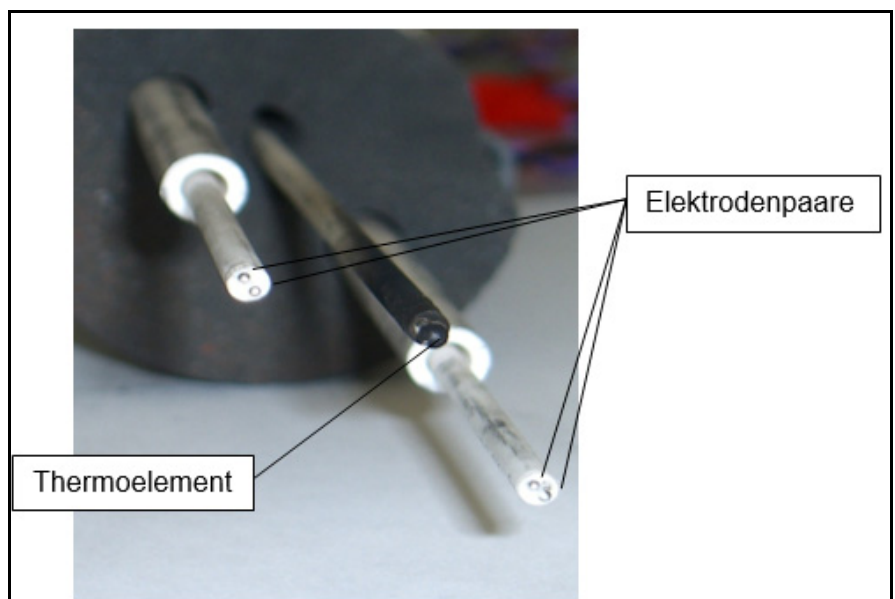


Bild 3: Messzelle

Hinzukommt, dass durch die vorgegebene Spannung des Transformators die einschmelzbare Menge, die pro Stunde produziert werden kann, stark von der elektrischen Leitfähigkeit der Schlacke abhängig ist. Um bei einem Neubau eines Elektrolichtbogenofens die genaue Dauer und die Kosten des Einschmelzvorgangs bestimmen und die Leistung auslegen zu können, muss zuvor u. a. die elektrische Leitfähigkeit der zu erwartenden Schlacken-zusammensetzung bestimmt werden.

Bisher konnte nur auf in der Literatur veröffentlichte elektrische Leitfähigkeit verschiedener Schlacken zurückgegriffen werden, welche allerdings in den seltensten Fällen, aufgrund unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen, auf andere Elektrolichtbogenöfen übertragen werden konnten. Daher wurde im Rahmen eines gemeinschaftlichen Projekts zwischen FEhS-Institut und der Firma SMS Siemag eine Messapparatur entwickelt, um die elektrischen Leitfähigkeiten unterschiedlicher schmelzflüssiger Schlacken im Labormaßstab messen zu können.

Prinzip der Messung der elektrischen Leitfähigkeit

Um generell die elektrische Leitfähigkeit schmelzflüssiger Schlacken ermitteln zu können, muss deren elektrischer Widerstand gemessen werden, da die elektrische Leitfähigkeit nur eine indirekt messbare Größe ist, welche über den Kehrwert des Widerstands beschrieben wird. Aufgrund der komplexen Stromverteilung innerhalb der Probe wird eine Messzelle eingesetzt, welche mit verschiedenen Kochsalzlösungen mit unterschiedlichen Konzentrationen bei Raumtemperatur kalibriert wird, diese Lösungen weisen bekannte spezifische elektrische Leitfähigkeiten auf. Mit dieser Messzelle wird dann der elektrische Widerstand, durch Interpolation der Kalibrationswerte, der zu untersuchenden Probe gemessen und die elektrische Leitfähigkeit ermittelt.

Aufbau der Messapparatur

Die Versuche werden im Labor an, in einem Tammann-Ofen auf ca. 1650 °C erhitzten, Schlacken im schmelzflüssigen Zustand durchgeführt (Bild 1). Die Temperatur der Schlacke wird mittels Thermoelement direkt in der Schmelze gemessen, welches in eine hohle Mittelelektrode eingebettet ist. Ein weiteres Thermoelement im Ofeninnenraum dient der Ofensteuerung.

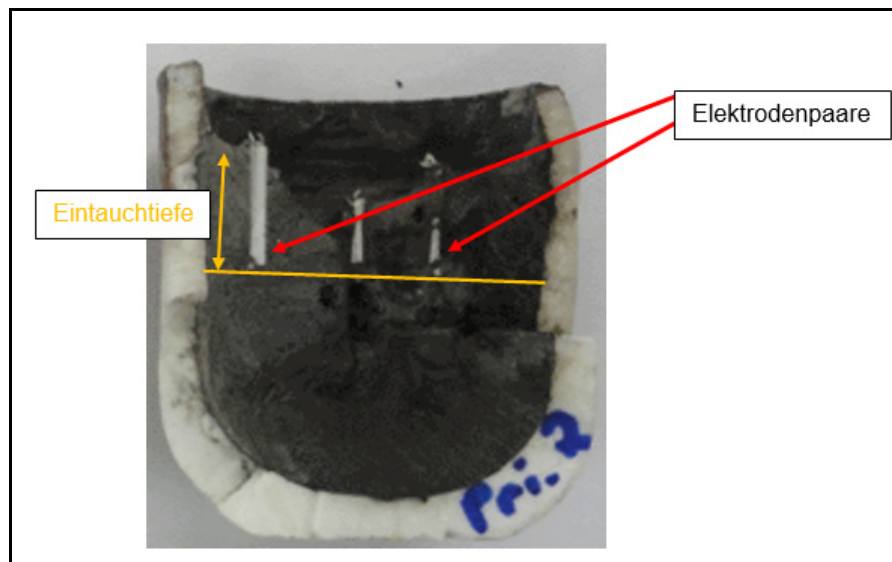


Bild 4: Vertikal getrennter Tiegel mit Elektroden und Thermoelement

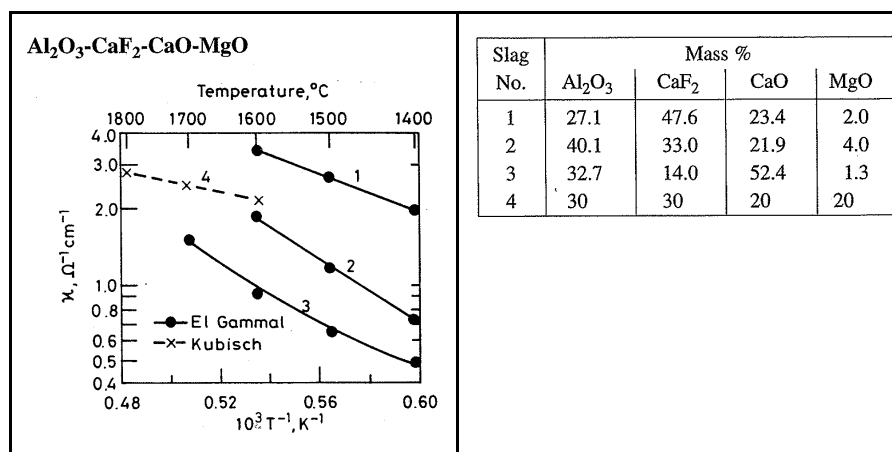


Bild 5: Quartärsystem Al₂O₃-CaF₂-CaO-MgO [5]

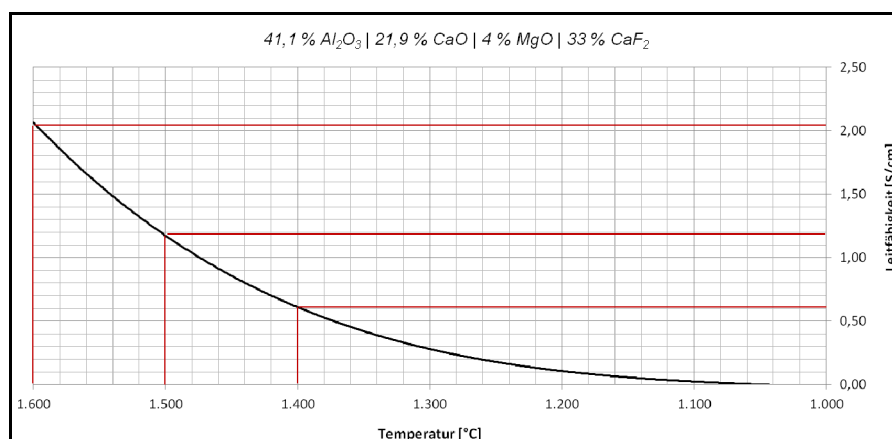


Bild 6: Verlauf der Leitfähigkeit über die Temperatur (FEhS-Messung)

Die Messzelle ist für eine erhöhte Messgenauigkeit nach dem 4-Elektroden-Prinzip aufgebaut (Bild 2). Dabei werden die von den Elektroden hervorgerufenen Polarisationserscheinungen verhindert, indem die

strombelasteten Elektroden nicht gleichzeitig den Spannungsabfall in der schmelzflüssigen Schlacke messen, wie es beim 2-Elektroden-Prinzip der Fall ist, sondern lediglich als Sonden dienen [4].

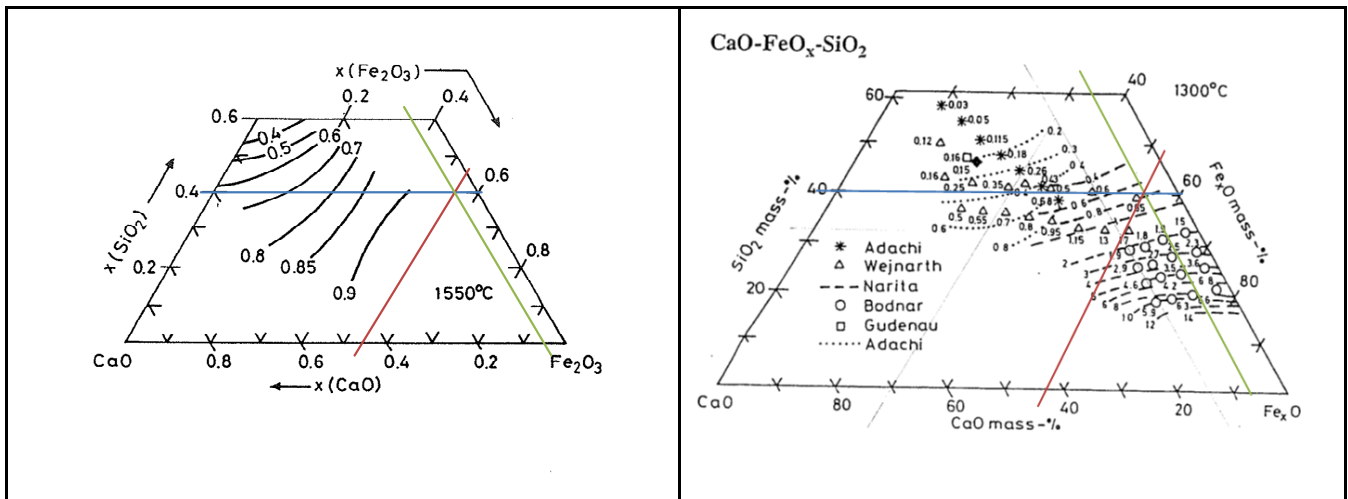


Bild 7: Ternärsysteme CaO-FeO_x-SiO₂ für 1550 °C und 1300 °C [5]

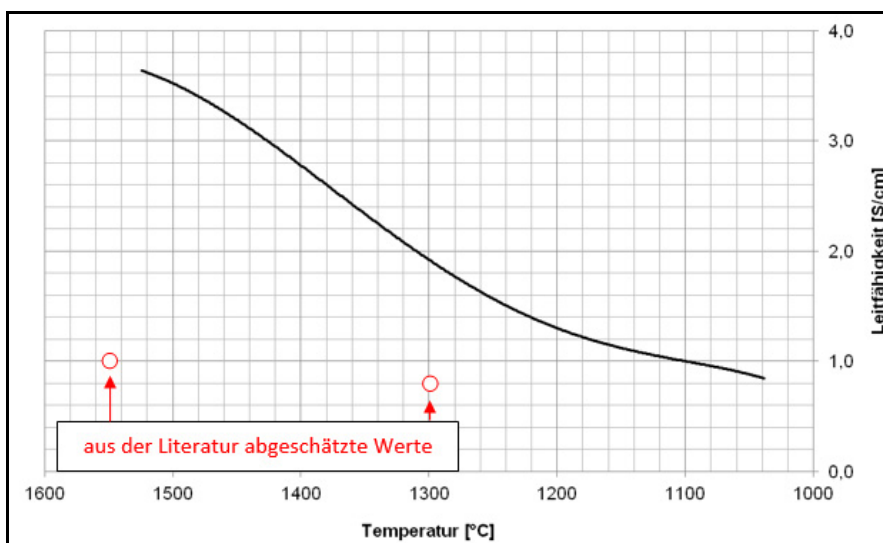


Bild 8: Experimentell ermittelter Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit über die Temperatur

Zur Vermeidung von Kriechströmen und Kurzschlüssen befinden sich die Elektroden getrennt in Keramikrohren, welche nur an der unteren Öffnung einen Kontakt mit der Schlacke erlauben. Um eine Temperaturbeständigkeit bis über 1700 °C zu gewährleisten, bestehen die Elektroden sowie das Thermoelement aus Platin-Rhodium (Bild 3).

Für ein neutrales Aufschmelzen der Schlacke werden keramische Tiegel aus eigener Produktion des FEhS-Instituts mit einer besonders niedrigen Porosität genutzt. Diese halten sowohl einer aggressiven Schlacke, als auch den hohen Temperaturen stand. Gleichzeitig wird mit diesen Tiegeln eine reduzierende Wirkung auf die Schlacke vermieden. Dies ist, beispielsweise bei Kohlenstofftiegeln nicht gegeben. Das Aufheizen im Tammann-Ofen wird zudem unter einer Inertgasatmosphäre durchgeführt

und muss aufgrund der Thermoschockempfindlichkeit der Keramiktiegel äußerst langsam erfolgen.

Beim Erreichen der gewählten Maximaltemperatur wird die Messapparatur mit der flüssigen Schlacke in Kontakt gebracht und anschließend die Leitfähigkeitsmessung in der Schlacke bis zum Erstarren durchgeführt. Dabei ist die Eintauchtiefe der Elektroden als ein ebenfalls auf die Messung einflussnehmender Parameter zu beachten, da in der schmelzflüssigen Schlacke ein vertikaler Temperaturgradient vorliegt (Bild 4).

Verifikation durch die Literatur

Generell kann einerseits zur Überprüfung der Messgenauigkeit ein reines Oxid verwendet oder eine Schlacke synthetisch hergestellt werden, die der genauen chemischen Zusammensetzung einer aus der

Literatur bekannten Schlacke entspricht, um die zu erwartende elektrische Leitfähigkeit abzuschätzen. So konnte zum Beispiel in Versuchen an reinem schmelzflüssigem Flussspat (CaF₂) die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Eintauchtiefe aufgezeigt werden.

Andererseits wurde als Referenzschlacke der Schlackentyp Nummer 2 im 4-Stoff-Diagramm Al₂O₃-CaF₂-CaO-MgO des Schlackenatlases [5] gewählt, dessen elektrische Leitfähigkeiten an den 3 Temperaturpunkten 1600 °C, 1500 °C und 1400 °C angegeben werden (Bild 5).

Im Rahmen der unter den gewählten Bedingungen durchgeführten Versuche konnte durch Aufheizen auf die gewünschte maximal zu messende Temperatur und anschließender Abkühlung, der Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit über die Temperatur bis zur Soliduszone aufgenommen werden. Die Messung im Temperaturbereich von 1600 °C bis 1000 °C bestätigte die Ergebnisse des Schlackenatlases und damit auch die korrekte Funktion der entwickelten Messapparatur (Bild 6).

Erweiterung der Literaturwerte

Der Einfluss anderer Komponenten, welche nicht in einem Mehrstoff-Diagramm dargestellt werden können, aber bei Betriebschlacken üblich sind, kann sehr unterschiedlich sein und weicht damit von idealisierten Mehrstoffsystemen ab. Die Literaturwerte können daher in solchen Fällen nur als Richtwerte angenommen werden, wobei insbesondere in Randbereichen keine trivialen Extrapolationen möglich sind.

Fe _{met}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	ZnO
[M.-%]												
0,22	49,9	3,85	32,9	2,88	3,39	0,12	0,75	0,76	0,30	1,07	0,30	1,27

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung für Elemente > 0,1 M.-%

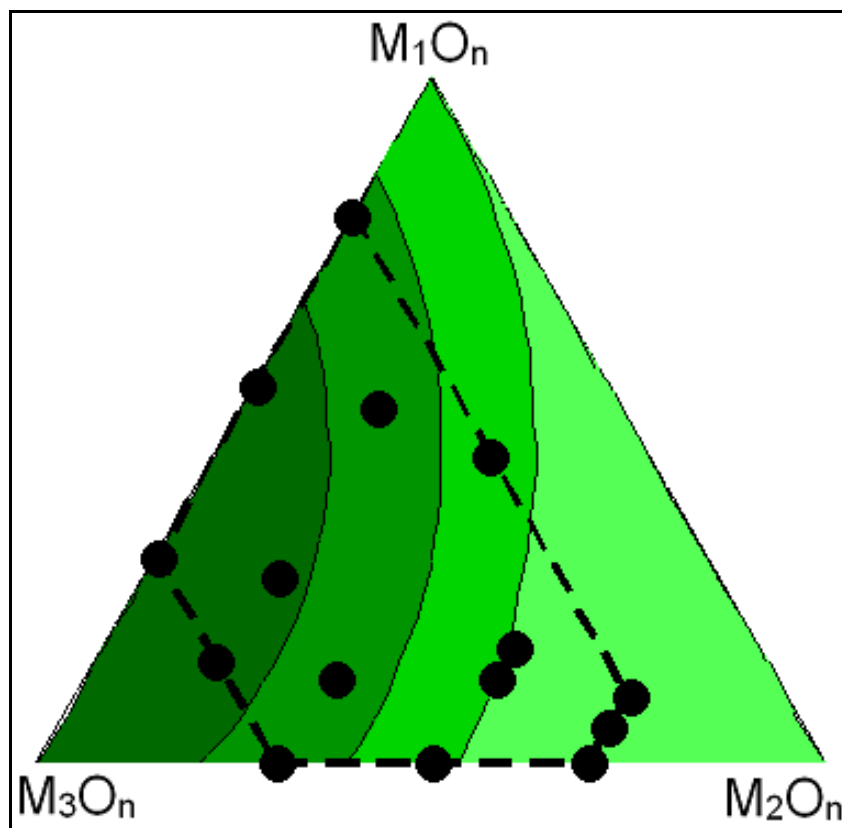


Bild 9: Statistische Versuchsplanung für einen betrieblich interessanten Bereich einer Schlacke mit 3 Komponenten

Als ein Beispiel für eine Betriebsschlacke werden im Folgenden die Ergebnisse für eine Eisen-Silikat-Schlacke vorgestellt. Diese ausgewählte Schlacke wies die in Tabelle 1 dargestellte chemische Zusammensetzung auf.

Das in der Literatur bekannte und hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung am zutreffendste Mehrstoffdiagramm ist das Ternärsystem CaO-FeO_x-SiO₂ (Bild 7). Die Zusammensetzung der ausgewählten Betriebsschlacke liegt jedoch außerhalb des angegebenen Bereichs und besitzt zudem in der Literatur nicht betrachtete Oxide bzw. Oxidstufen von circa 10 M.-%.

Die mittels Extrapolation abgeschätzte Leitfähigkeit bei 1300 °C und 1550 °C müsste im angegebenen Fall bei etwa 1 S/cm liegen.

Durch die Messungen des FEhS-Instituts an dieser Betriebsschlacke zeigte sich (Bild 8), dass die elektrische Leitfähigkeit sogar um das 2 bis 3fache höher liegt als auf Basis

des in der Literatur angegebenen idealisierten Modells zu erwarten wäre. Dadurch wird deutlich, dass durch Extrapolationen der elektrischen Leitfähigkeiten, insbesondere in Randbereichen, nur eine qualitative und keine quantitative Aussage getroffen werden kann.

Durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit von mehreren chemischen Zusammensetzungen mittels statistischer Versuchsplanung (Bild 9), kann damit ein für die zu erwartende Schlacke mehrdimensionales Ternärsystem erstellt werden. Vorteilhaft wirkt sich aus, dass dieses in der dritten Dimension die Leitfähigkeiten bei verschiedenen Zusammensetzungen und unterschiedlichen Temperaturen darstellen kann, ohne für den Temperaturverlauf zusätzlichen Messungen durchzuführen. Somit kann durch die statistische Versuchsplanung, je nach betrachtetem Bereich und gewünschter Genauigkeit, mit etwa 15 Messungen ein komplexes Modell zur Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit von Schlacken erstellt werden.

Zusammenfassung

Die elektrische Leitfähigkeit von schmelzflüssigen Schlacken stellt u. a. für die Auslegung eines Elektrolichtbogenofens einen wichtigen Parameter dar. Da die Literaturangaben hierzu auf diverse Schlackenzusammensetzungen begrenzt sind und in den seltensten Fällen auf die im Werk erzeugten Betriebsschlacken zutreffen, ergibt sich durch die individuelle Leitfähigkeitsmessung mit der im FEhS-Institut entwickelten Messapparatur ein großer Vorteil für die Stahlerzeuger und Anlagenbauer.

Dies war der Grund dafür, im schmelzmetallurgischen Labor des FEhS-Instituts in Zusammenarbeit mit SMS Siemag eine Messeinrichtung zu entwickeln, die für beliebige Schlackenzusammensetzungen reproduzierbare Werte für die elektrische Leitfähigkeit von Eisenhütten- und Metallhüttenschlacken ermitteln kann.

Durch Überprüfung der Messapparatur mit den in der Literatur bekannten Zusammensetzungen konnte die gute Übereinstimmung verifiziert werden. Am Beispiel einer Messung einer Betriebsschlacke mit Begleitelementen, welche in der Literatur nicht berücksichtigt sind, konnte gezeigt werden, dass eine quantitative Aussage durch Extrapolation der bekannten Werte nicht möglich und eine Messung für aussagekräftige Werte nötig ist.

Durch die im FEhS-Institut entwickelte Methode können nun metallurgische Reaktionen im Prozess besser abgeschätzt werden. Dadurch kann zum Beispiel eine Unter- beziehungsweise Überauslegung des Transformators für den Elektrolichtbogenofen vermieden, Folgekosten eingespart und Betriebs- und Anschaffungskosten für den Kunden auf einem niedrigen Niveau gehalten werden.

Literatur

- [1] Block, O.: Spektroskopische Untersuchungen von frei brennenden Gleichstromlichtbögen mit hoher Leistung an einem Elektrostahlofen, Dr.-Ing.-Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg 1995

- [2] Schönfelder, G., Pearce, J., Kuncze, G.: Application of State-of-the-Art Technology for Modernization of Electric Arc Furnace Plants, S. 929-938
- [3] Block, F.: Die elektrischen Größen: Leitfähigkeit, Stromdichte, Wärme-
- produktionsdichte und Widerstand, Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Volume 2601, 1977
- [4] Korp, J., Rabitsch, R., Schneider, R., Krieger, W.: Experimentelle Bestimmung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit hoch CaF₂-haltiger
- Schlacken, Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Volume 151, Heft 5, 2006, S.184-189
- [5] Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh): Slag Atlas, 2nd Edition, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf 1995

Erhebungen zu Produktion und Einsatz von Hochofen- und Stahlwerksschlacke

Dr.-Ing. Th. Merkel

Seit vielen Jahren erhebt der Fachverband Eisenhüttenschlacken e. V. Daten zur Produktion und zum Einsatz von Eisenhüttenschlacken, nicht nur bei den Verbandsmitgliedern, sondern auch bei den nicht im Fachverband organisierten Unternehmen in Deutschland. Der Abgleich der Daten mit den bei der Wirtschaftsvereinigung Stahl erfassten Produktionszahlen von Roheisen und Rohstahl zeigt seit vielen Jahren, dass die Erfassung der Schlacke-produkte vollständig ist. Die Ergebnisse der Umfragen für das Jahr 2013 sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengestellt.

Erzeugung	Mio. t
Schlacke aus Stahlroheisenerzeugung	7,46
Schlacke aus sonstiger Roheisenerzeugung	0,09
Summe	7,55
davon: HS 6,61 HOS 0,94	

Nutzung	Mio. t
HOS (Gesteinskörnungen)	0,02
HOS (Baustoffgemische)	0,73
HS zur Zementherstellung	6,12
HS für andere Einsatzgebiete	0,17
Eigenverbrauch der Werke	0,05
Zwischenlager	0,46
Summe	7,55

Tabelle 1: Erzeugung und Nutzung von Hochofenschlacke 2013

Im Vergleich zum Vorjahr zeigt sich bei der Erzeugung von Hochofenschlacke ein ganz leichter Zugewinn, bei der Erzeugung von Stahlwerksschlacke eine leichte Abnahme. Insgesamt wurden etwa 13 Mio. t Hochofen- und Stahlwerksschlacke produziert.

Hinsichtlich der Erzeugung von Hochofenschlacke ist ein nochmaliger Anstieg des Anteils der granulierten Hochofenschlacke des Hüttensands zu verzeichnen. Dieser Hüttensand wird weiterhin im Wesentlichen als Hauptbestandteil bei der Herstellung von Normzementen nach DIN EN 197-1 eingesetzt. Etwas zurückgegangen ist der Einsatz von Hochofenstückschlacke für den Bau von Verkehrswegen, weshalb im Jahr 2013 ein merklicher Aufbau der Zwischenlager festgestellt wurde. In erster Linie hängt dies mit Sondereffekten infolge von Arbeiten an einem der in Deutschland betriebenen Hochofen zusammen, aufgrund derer Teile der Produktion nicht vermarktet werden konnten. Insofern ist zu erwarten, dass in den kommenden Jahren die erzeugte Hochofenschlacke auch wieder vollständig vermarktet werden kann.

Bei den Stahlwerksschlacken ist die Erzeugung von Schlacken aus dem LD-Verfahren im Vergleich zum Vorjahr praktisch

Erzeugung	Mio. t
Schlacke aus Oxygenstahlerzeugung	3,10
Schlacke aus Elektrostahlerzeugung	1,72
Schlacke aus Sonderverfahren	0,74
Summe	5,56

Nutzung	Mio. t
Metallurg. Kreislaufrführung	0,72
Düngemittel	0,51
Baustoffe (Straßenbau, Erdbau, Wasserbau etc.)	2,96
Sonstiges	0,38
Zwischenlager	0,32
Deponie	0,67
Summe	5,56

Tabelle 2: Erzeugung und Nutzung von Stahlwerksschlacke 2013

konstant geblieben. Etwas zurückgegangen ist die Erzeugung der anderen Stahlwerksschlacken. Trotz dieses Rückgangs um insgesamt ca. 0,3 Mio. t konnten die erzeugten Stahlwerksschlacken nicht vollständig am Markt platziert werden. Zwar ist die Verwendung als Kalk- und Eisenträger im metallurgischen Kreislauf und die Nutzung als Düngemittel ungefähr gleichgeblieben, die baustoffliche Verwendung hingegen hat abgenommen, was dazu führt, dass 2013 die Bestände an verkaufsfähigem Material

(Zwischenlager) erstmals seit einigen Jahren wieder angestiegen sind. Zumindest ist in diesem Zusammenhang erfreulich, dass die Menge der auf Deponie abgelagerten Stahlwerksschlacken verringert werden konnte. Es bleibt zu hoffen, dass die milde Witterung des ersten Quartals 2014 im Vorjahresvergleich nicht nur zu einem deutlichen Anstieg der Bautätigkeit, sondern in diesem Zusammenhang auch zu einem Anstieg der Nutzung der Baustoffe aus Stahlwerksschlacke führt.