

Entwicklung von Baustoffen aus Edelstahlschlacken für Flächensanierung und Deponiebau

Dr.-Ing. P. Drissen, Dr.-Ing. D. Mudersbach

Einleitung

Edelstahlschlacken (EDS) werden aufgrund der im Vergleich zu anderen mineralischen Baustoffen geringen Jahresmenge von circa 0,6 Mio. t in den technischen Regelwerken für das Bauwesen nicht berücksichtigt. Je nach verfügbarer Rohstoffbasis, Verfahrenslinie und erzeugter Stahlsorte werden in den sieben deutschen Werken unterschiedliche Qualitäten an Edelstahlschlacken erzeugt. Sie können herstellungsbedingt Besonderheiten aufweisen, die ihre Nutzung als Baustoff erschweren. Hierzu zählen die Neigung einzelner Qualitäten zu einem feinkörnigen Zerfall bei der Abkühlung, Einschränkungen hinsichtlich der Raumbeständigkeit, ihr Gehalt an Chrom und anderen Legierungselementen bzw. ihr Gehalt an metallischen Einschlüssen aus hochlegiertem Stahl. Aus Vorsorgegründen wird daher für eine Nutzung der Edelstahlschlacken zumeist eine umfassende Begutachtung technischer und umweltrelevanter Aspekte verlangt. Ein 1998 veröffentlichtes Merkblatt gibt generelle Vorgaben für technologische Eigenschaften und Leitparameter zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit und damit für den Einsatz dieser Materialien [1]. Hinsichtlich eines potentiellen Einsatzes wird jedoch ausdrücklich auf den erforderlichen Nachweis der Eignung für das konkrete Einsatzgebiet verwiesen. Edelstahlschlacken können daher nicht in gleicher Weise wie die gütüber-

wachten Schlacken aus der Qualitätsstahlerzeugung vermarktet werden. Systematische Untersuchungen zur Nutzung für bestimmte Bauweisen liegen bislang nicht vor.

Ausgehend von dieser Situation wurde in einem kürzlich abgeschlossenen Forschungsvorhaben der Einsatz von Edelstahlschlacken als Baustoff zur Herstellung von Ausgleichsschichten und Profilierungen von Deponien sowie tragfähigen Bodenpolstern für Industriebrachen untersucht [2]. Neben einer umfassenden Kennzeichnung der verschiedenen Qualitäten der Edelstahlschlacken wurden Maßnahmen zur Verbesserung umweltrelevanter und bautechnischer Parameter für die genannten Nutzungswege abgeleitet. Diese Vorgehensweise wurde beispielhaft für zwei Edelstahlschlacken umgesetzt und die optimierten Qualitäten für den Bau und die Untersuchung von Demonstrationsflächen eingesetzt.

Eigenschaften von Edelstahlschlacken

Die Erzeugung von "Edelstahl" bzw. von nichtrostenden Stählen erfolgt heute in einem zweistufigen Prozess. Nach der Herstellung eines Vormetalls im Elektrofen erfolgt dessen Verarbeitung im AOD-(Argon-Oxygen-Decarburisation) oder VD-(Vacuum-Degasing) bzw. VOD-(Vacuum-Oxygen-Decarburisation)Verfahren. Am Ende der verschiedenen metallurgischen Verfahrensstufen werden die Schlacken aus

Inhalt	Seite
Entwicklung von Baustoffen aus Edelstahlschlacken für Flächensanierung und Deponiebau	1
P. Drissen, D. Mudersbach	
Eignung von Schlacken als Bindemittel für Bodenverfestigungen	7
S. Janssen, Th. Merkel	
Stabilisierung sekundärmetallurgischer Schlacken aus der Qualitätsstahlerzeugung	10
P. Drissen, D. Mudersbach, K. Schulbert, T. Zehn	
Erzeugung und Nutzung von Produkten aus Eisenhüttenschlacke 2011	14
Th. Merkel	

dem Stahlherstellungsprozess abgezogen und erstarren in Trögen oder Schlackenbeeten langsam zu einem kristallinen Mineralstoff.

Die im Jahre 2010 erzeugten Mengen sind graphisch in Bild 1 dargestellt.

Aufgrund der verschiedenen Rohstoffqualitäten (Schrottqualität), der unterschiedlichen Verfahrensvarianten bei den verschiedenen Erzeugern und den verschiedenen Edelstahlqualitäten weisen Edelstahlschlacken eine weite Spanne ihrer chemischen Zusammensetzung auf. Tabelle 1 zeigt Erfahrungsbeispiele der chemischen Zusammensetzung. Auf eine Mittelwertbildung wurde hier und

in den nachfolgenden Tabellen bewusst verzichtet, da Mittelwerte angesichts der Bandbreite keinen Vergleich mit einzelnen Proben zulassen. Stattdessen werden beispielhaft zwei typische Zusammensetzungen A und B genannt.

Wie alle metallurgischen Schlacken enthalten auch die Schlacken aus der Edelstahl-erzeugung metallische Bestandteile, die aufgrund des hohen Gehalts an Legierungselementen einen hohen wirtschaftlichen Wert darstellen. In der Aufbereitung der Edelstahlschlacken werden daher zunehmend Anstrengungen unternommen, um diese metallischen Bestandteile so weit als möglich zurückzugewinnen.

Edelstahlschlacken sind aufgrund ihrer CaO- und SiO₂-Gehalte als kalksilikatische Materialien anzusprechen. Die verschiedenen Qualitäten unterscheiden sich entsprechend der jeweiligen spezifischen Erzeugung in der Menge der Hauptbestandteile CaO und SiO₂ bzw. der Basizität.

Trotz höherer Gehalte bis zu 56 M.-% CaO weisen die Edelstahlschlacken nur geringe Freikalkgehalte (CaO_{frei}) von zumeist < 5 M.-% auf. Weitere unterscheidende Merkmale sind die Gehalte an MgO und Al₂O₃ sowie Eisen und anderen Schwermetallen. Trotz der ausgeprägten Reduktionsarbeit in der Edeltahlerzeugung kann der Chromoxidgehalt der Edelstahlschlacken nur selten unter 1 M.-% gesenkt werden. Da in den einzelnen Verfahrensschritten der Edeltahlerzeugung dünnflüssige und damit reaktive Schlacken erforderlich sind, die geringen Eisenoxidgehalte und hohen CaO-Gehalte jedoch ein Ansteifen bewirken, kann auf den Einsatz von Flussspat in einzelnen Aggregaten nicht völlig verzichtet werden. Von einigen Ausnahmen abgesehen weisen Edelstahlschlacken Glühverluste > 3 M.-% auf, die aus der Freisetzung von chemisch gebundenem H₂O und CO₂ aus den sekundär gebildeten Mineralen Portlandit und Calcit resultieren.

Entsprechend der chemischen Zusammensetzung (Tabelle 2) dominieren in Edelstahlschlacken die kalksilikatischen Minerale β- bzw. γ-Dicalciumsilikat (Ca₂SiO₄), Merwinitt (Ca₃MgSi₂O₈), Gehlenit-Akermanit (Ca₂Mg_{0,5}AlSi_{1,5}O₇) und teilweise auch Rankinit (Ca₃Si₂O₇) beziehungsweise Cuspidin (Ca₄Si₂O₇F₂).

Aufgrund der feuchten Aufbereitung der Edelstahlschlacken liegt der chemisch bestimmte Freikalk mineralisch nicht als Freikalk (CaO_{frei}), sondern als Portlandit

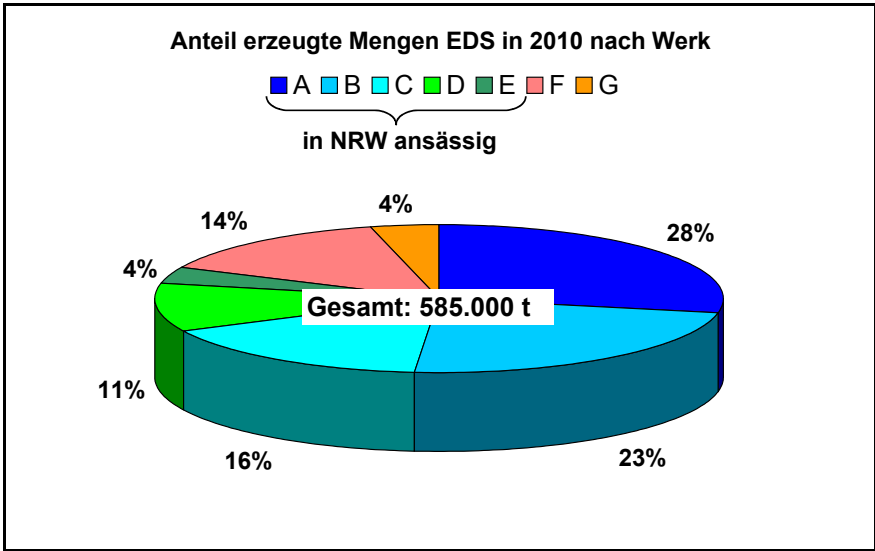


Bild 1: Erzeugungsmengen von Edelstahlschlacken im Jahr 2010

Parameter		Erfahrungsbereich		Beispiel	
		Min	Max	A	B
Metall	M.-%	0,9	26,6	4,60	3,50
Al ₂ O ₃	M.-%	1,5	9,6	1,49	3,01
CaO	M.-%	25,0	56,0	53,3	51,1
CaO _{frei}	M.-%	0,2	7,1	2,5	4,6
CaO/SiO ₂		0,8	2,7	2,28	1,96
Cr ₂ O ₃	M.-%	0,5	20,4	2,01	3,08
F	M.-%	0,8	5,1	1,70	1,10
Fe _{ges.}	M.-%	0,7	10,4	2,29	1,70
MgO	M.-%	4,6	12,3	5,91	5,68
MnO	M.-%	0,4	6,8	0,43	1,70
S _{ges.}	M.-%	< 0,1	0,5	0,25	0,36
SiO ₂	M.-%	14,0	33,0	23,4	26,1
CO _{2 geb.}	M.-%	0,3	2,8	2,38	1,63
H ₂ O _{geb.}	M.-%	1,0	6,0	6,23	4,38

Tabelle 1: Feststoffgehalte von Edelstahlschlacken, Erfahrungsbereich und Beispiele

Mineral	Formel	Erfahrungsbereich		Beispiel	
		Min	Max	A	B
β-Dicalciumsilikat	β-Ca ₂ SiO ₄	< 5	50		25
γ-Dicalciumsilikat	γ-Ca ₂ SiO ₄	< 5	60	60	30
Merwinitt	Ca ₃ MgSi ₂ O ₈	< 5	20		20
Rankinit	Ca ₃ Si ₂ O ₇	< 5	20		
Akermanit-Gehlenit	Ca ₂ Mg _{0,5} AlSi _{1,5} O ₇	< 5	25		5
Mayenit	Ca ₁₂ Al ₁₄ O _{33-x} F _{2x}	< 5	25	5	
Fluorit	CaF ₂	< 5	5	5	5
Cuspidin	Ca ₄ Si ₂ O ₇ F ₂	< 5	10	10	
Spinelle	(Fe,Mg)(Fe,Al,Cr) ₂ O ₄	< 5	15	< 5	< 5
Wüstit	FeO _x ; (Fe,Mg,Mn)O _x	< 5	10		
Periklas	MgO	< 5	10		< 5
Brucit	Mg(OH) ₂		< 5		
Freikalk	CaO				
Portlandit	Ca(OH) ₂	< 5	5	5	5
Calcit	CaCO ₃	< 5	5	5	5

Tabelle 2: Mineralische Zusammensetzung von Edelstahlschlacken; Mengenangaben in M.-% nach Reference Intensity Ratios [3] sind grobe Näherungswerte

(Ca(OH)₂) vor. Er führt somit zu keiner Beeinträchtigung der Raumbeständigkeit. Unter dem Einfluss von CO₂ aus der Luft während der Aufbereitung bzw. Lagerung wird der Portlandit teilweise in Calcit (CaCO₃) umgewandelt. Da für den Schutz der Feuerfestzustellung bei den hohen Prozesstemperaturen der Edeltahlerzeugung besondere Maßnahmen erforderlich sind, ist in allen Edeltahlschlacken Periklas (MgO_{frei}) in unterschiedlichen Mengen nachweisbar. Entsprechend der im Vergleich zum Freikalk sehr langsamen Hydratation des Periklases tritt das Hydrationsprodukt Brucit (Mg(OH)₂) nur selten in Edeltahlschlacken auf.

Eisenhaltige Minerale, wie Spinelle ((Fe,Mg) (Fe,Al,Cr)₂O₄) und Wüstite ((Fe, Mg, Mn)O_x), treten in Edeltahlschlacken eher untergeordnet auf, da in der Erzeugung entsprechende Maßnahmen zur Reduktion oxidischer Metallphasen bzw. zur Vermeidung einer Oxidation ergriffen werden. Eine Spinellbildung wird bei höheren Eisengehalten durch den Einsatz von Aluminium unterstützt.

Fluor ist in den Edeltahlschlacken an den Mineralen Fluorit (CaF₂), Cuspidin (Ca₄Si₂O₇F₂) und Mayenit (Ca₁₂Al₁₄O_{33-x}F_{2x}) gebunden.

Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen wird eine Nutzung der Edeltahlschlacken als Ausgleichsschicht auf Deponien oder als Bodenpolster auf Deponiebrachen angestrebt. Eine Gegenüberstellung von Eluatkonzentrationen mit Anforderungswerten der Deponieklasse DK I der DepVereinfV [4] in [Tabelle 3](#) zeigt, dass die überwiegende Zahl der Parameter zu keinerlei Einschränkungen für die Nutzung als Deponieersatzbaustoff führt.

Die Einbindung des Chromoxids der Edeltahlschlacken in die gegenüber Umwelteinflüssen sehr stabilen Spinelle wirkt sich positiv auf ihre Umweltverträglichkeit aus, so dass Edeltahlschlacken häufig die Anforderung an die Eluatkonzentration < 0,05 mg/l für Chrom gemäß Deponieklasse DK 0 erfüllen. Allerdings können auch bei höheren Spinellgehalten vergleichsweise hohe Cr-Konzentrationen im Eluat auftreten, die aber mit höheren Metallgehalten korreliert sind. Gleiches gilt bezüglich Molybdän. Eine weitergehende Abreicherung metallischer Bestandteile bei der Aufbereitung kann sich somit auch positiv auf die Umweltverträglichkeit der Edeltahlschlacken auswirken. In Hinblick auf potentielle Umweltauswirkungen ist

Parameter		DepVereinfV	Erfahrungsbereich		Beispiel	
		DK I	Min	Max	A	B
pH-Wert	-	5,5 - 13	10,4	12,8	12,6	12,7
el. Leitf.	µS/cm	-	200	10.000	9.280	9.910
Ba	mg/l	≤ 5	0,03	0,60	0,315	0,547
As	mg/l	≤ 0,2		< 0,005	< 0,005	< 0,005
Pb	mg/l	≤ 0,2	< 0,002	0,3	< 0,002	< 0,002
Cd	mg/l	≤ 0,05		< 0,0005	< 0,0005	0,0004
Cu	mg/l	≤ 1		< 0,002	< 0,002	< 0,002
Ni	mg/l	≤ 0,2		< 0,002	< 0,002	< 0,002
Hg	mg/l	≤ 0,005		< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002
Cr _{ges.}	mg/l	≤ 0,3	0,002	0,3	0,005	0,006
Cr ⁶⁺	mg/l	-		< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mo	mg/l	≤ 0,3	< 0,01	0,7	0,031	0,280
Sb	mg/l	≤ 0,03		< 0,005	< 0,005	< 0,005
Se	mg/l	≤ 0,03		< 0,005	< 0,005	< 0,005
Zn	mg/l	≤ 2	< 0,005	0,8	< 0,005	< 0,005
F	mg/l	≤ 5	< 0,4	9,0	1,5	4,8
Cl	mg/l	≤ 1500	< 1	5,0	1,0	4,0
SO ₄	mg/l	≤ 2000	1	300	67	85
CN _{lf.}	mg/l	≤ 0,1		< 0,005	< 0,005	< 0,005
Phenole	mg/l	≤ 0,2		< 0,01	< 0,01	< 0,01
DOC	mg/l	≤ 50		< 1	< 1	< 1
Abdampfrückstand	M.-%	≤ 3	0,3	2,5	1,1	2,3

Tabelle 3: Eluatkonzentrationen von Edeltahlschlacken [5]; Zuordnungswerte nach [4]

Parameter		Erfahrungsbereich		Beispiel	
		Min	Max	A	B
Kornanteil < 63 µm	M.-%	2,5	50	44,7	20,0
Wassergehalt	M.-%	5	24	20,35	11,96
Rohdichte	Mg/m ³	2,8	3,6	2,98	3,06
Schüttdichte	Mg/m ³	0,9	2,1	0,96	1,36
Proctordichte	Mg/m ³	1,5	2,3	1,59	1,89
Optimaler Wassergehalt	M.-%	5	27	25,5	16,5
Durchlässigkeitsbeiwert k _f	m/sec	1 x 10 ⁻⁷	1 x 10 ⁻⁹	1,8 x 10 ⁻⁸	1,3 x 10 ⁻⁷
Volumenzunahme im Dampfversuch, 168 Std.	Vol.-%	2	40	9,1	4,0

Tabelle 4: Physikalische Eigenschaften von Edeltahlschlacken

jedoch festzuhalten, dass für alle untersuchten Edeltahlschlacken die Cr⁶⁺-Konzentration im Eluat ≤ 0,01 mg/l liegt.

Aufgrund der Eluatkonzentration für Molybdän und Fluor ist zumeist ein Einsatz als Baustoff für die Deponieklassen DK I möglich. Lediglich in Einzelfällen ist der Einsatz auf die Deponieklassen DK II und DK III begrenzt. Die Untersuchungen zeigen allerdings, dass die Fluorkonzentration, aber auch die Sulfatkonzentration der Eluate mit der Zeit zurückgehen [2].

Organische Verbindungen sind bei den Erzeugungstemperaturen der Edeltahlschlacken nicht stabil. Die Feststoffparameter TOC und Glühverlust sind für Deponieersatzbaustoffe aus Hochtemperatur-

prozessen und daher für Edeltahlschlacken gemäß einer Fußnote in der DepVereinfV nicht relevant. Entsprechende Auswertungen bestätigen, dass der Parameter Glühverlust bei Edeltahlschlacken im Wesentlichen durch die Bildung nicht umweltrelevanter sekundärer Hydrat- und Carbonatphasen geprägt ist.

Die physikalischen Eigenschaften der Edeltahlschlacken ([Tabelle 4](#)) werden hauptsächlich durch ihre mineralische Zusammensetzung beeinflusst. So ist die mit einer Volumenzunahme verbundene Umwandlung von β- in γ-Dicalciumsilikat während der Abkühlung wesentlich verantwortlich für die Ausbildung eines Feinanteils < 63 µm. Dieser kann einige wenige Prozent, aber auch bis zu 50 M.-% betragen.

Aufgrund der teilweise sehr hohen Feinanteile sind beim Handling und Einbau entsprechender Qualitäten Maßnahmen zur Vermeidung von Verstaubungen zu ergreifen. Durch den teilweise sehr hohen Feinanteil ergeben sich unter anderem deutliche Unterschiede im Wassergehalt der aufbereiteten Edelstahlschlacken sowie in der Schütt- und Proctordichte.

Edelstahlschlacken weisen unter anderem durch ihren teilweise sehr hohen Feinanteil niedrigere Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte k_f in der Größenordnung um 1×10^{-7} m/sec auf. Ihr Einsatz als Dichtungsbaustoff auf Deponien ist jedoch ohne zusätzliche Maßnahmen nicht möglich, da hier ein k_f -Wert $< 5 \times 10^{-10}$ m/sec gefordert wird [4]. Hinsichtlich einer Nutzung als Ausgleichsschicht auf Deponien stellt ihre geringe Wasserdurchlässigkeit aber einen zusätzlichen Schutz für den Deponiekörper dar, auch wenn für Ausgleichsschichten keine entsprechenden Anforderungen gestellt werden.

Edelstahlschlacken weisen aufgrund der Anwesenheit von Periklas (MgO_{frei}) teilweise hohe Volumenzunahmen > 5 Vol.-% im Dampfversuch auf. Ihr Einsatz als Baustoff ist folglich auf diesbezüglich unkritische Bauweisen, wie etwa im Deponiebau, begrenzt.

Basierend auf der umfassenden Kennzeichnung der Edelstahlschlacken ist festzustellen, dass ihre Aufbereitung zur Nutzung als Baustoffe für die Herstellung von Ausgleichsschichten bzw. Profilierung auf Deponien sowie für tragfähige Bodenpolster auf Industriebrachen grundsätzlich möglich und sinnvoll ist.

Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung

In Hinblick auf eine verbesserte Nutzung und Vermarktung der Edelstahlschlacken als Ausgleichsschichten oder zur Profilierung auf Deponien bzw. als Bodenpolster für Industriebrachen wurden im Rahmen der Untersuchungen verschiedene Maßnahmen in Zusammenarbeit mit den Erzeugern und Aufbereitern erprobt. Die Maßnahmen zielten sowohl auf eine Verbesserung umweltrelevanter Parameter als auch der technischen Eigenschaften. Im Einzelnen wurden nachfolgende Optimierungsmaßnahmen für die in den vorstehenden Tabellen aufgeführten Qualitäten A und B entwickelt und erprobt:

- ◆ Bessere Metallseparation, da dies Einfluss auf die Schwermetallelution hat.

Parameter		A	A _{opt.}	B	B _{opt.}
Feststoffgehalte					
Metalle	M.-%	4,60	2,05	3,50	1,60
Al_2O_3	M.-%	1,49	1,73	3,01	3,31
CaO_{frei}	M.-%	2,5	1,4	4,6	3,2
SiO_2	M.-%	23,4	27,1	26,1	29,7
CaO/SiO_2		2,28	1,95	1,96	1,64
Cr_2O_3	M.-%	2,01	2,35	3,08	2,67
Ni	mg/kg	406	180	476	373
$\text{Fe}_{\text{ges.}}$	M.-%	2,29	1,54	1,70	1,12
MgO	M.-%	5,91	5,77	5,68	5,52
F	M.-%	1,70	1,65	1,10	1,30
$\text{CO}_2_{\text{geb.}}$	M.-%	2,38	1,90	1,63	0,65
$\text{H}_2\text{O}_{\text{geb.}}$	M.-%	6,23	2,77	4,38	2,39
Mineralogie					
Larnit	$\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$			25	20
γ -Dicalciumsilikat	$\gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$	60	55	30	25
Eluate					
$\text{Cr}_{\text{ges.}}$	mg/l	0,005	0,015	0,006	0,028
Cr^{6+}	mg/l	$< 0,01$	0,01	$< 0,01$	0,01
Mo	mg/l	0,031	0,028	0,280	0,237
F	mg/l	1,5	3,2	4,8	4,8
Physik					
Kornanteil $< 63 \mu\text{m}$	M.-%	44,7	12,6	20,0	6,4
Proctordichte	Mg/m ³	1,59	1,65	1,89	2,35
Opt. Wassergehalt	M.-%	25,5	21,31	16,5	12,45
Durchlässigkeitsbeiwert k_f	m/sec	$1,8 \times 10^{-8}$	$3,4 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-7}$
Volumenzunahme Dampfversuch, 168 Std.	Vol.-%	9,1	11,7	4,0	3,5

Tabelle 5: Auswirkungen der Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung

- ◆ Verbesserte Reduktionsarbeit, um Schwermetalle vermehrt in das Metallbad zu überführen.
- ◆ Höhere Al_2O_3 -Gehalte, um bei höheren Fe-Gehalten die Spinellbildung zu unterstützen.
- ◆ Absenkung des CaO-Gehalts bzw. der Basizität CaO/SiO_2 zur Verminderung des Anteils an γ -Dicalciumsilikat.
- ◆ Verringerung des MgO-Gehalts zur Verbesserung der Raumbeständigkeit.

Tabelle 5 zeigt eine Gegenüberstellung der durch diese Maßnahmen beeinflussten Parameter für die Ausgangsmaterialien A und B und die optimierten Materialien A_{opt.} und B_{opt.}.

Die verbesserte Metallseparation bewirkte eine deutliche Absenkung der metallischen Anteile in den optimierten Edelstahlschlacken A_{opt.} und B_{opt.} um rund 50 %. Der geringere Anteil metallischer Bestandteile ist auch mit Blick auf einen verbesserten Schutz von Kunststoffdichtungsbahnen, die als Abdichtungskomponenten im Deponiebau eingesetzt werden, positiv zu bewerten.

Die durchgeführten Maßnahmen zur Verbesserung der Reduktionsarbeit sind anhand der geringeren Feststoffgehalte an $\text{Fe}_{\text{ges.}}$, Mo und Ni der Edelstahlschlacken A_{opt.} und B_{opt.} sowie für die Edelstahlschlacke B_{opt.} auch anhand des Cr_2O_3 -Gehalts erkennbar. Eine geringfügige Absenkung der entsprechenden Eluatkonzentrationen konnte für Molybdän nachgewiesen werden. Bezüglich Cr und Ni entsprechen die Eluatparameter den Anforderungswerten für DK 0 und bezüglich Mo für DK I gemäß DepVereinV.

Da aus metallurgischen Gründen auch während der Erprobung der Optimierungsmaßnahmen nicht auf die verflüssigende Wirkung von Fluorid verzichtet werden konnte, wurde für Fluor keine Absenkung der Eluatkonzentrationen erzielt. Allerdings wurde bei der praktischen Erprobung der Materialien auf Demonstrationsflächen im Gegensatz zu den Laboruntersuchungen eine deutliche Absenkung der Eluatkonzentrationen für den Parameter F, aber auch für Cl und SO_4 , festgestellt. Durch diese ergriffenen Maßnahmen wurde eine Verbesserung der Umweltverträglichkeit erzielt, auch wenn eine Neueinstufung bezüglich der Deponieklassen nicht möglich war.

Da zum Schutz der feuerfesten Zustellungen der MgO-Gehalt nur minimal gesenkt und somit kein geringerer Periklasgehalt eingestellt werden konnte, wurde die Raumbeständigkeit nicht verbessert. Durch die Absenkung der Schlackenbasizität CaO/SiO_2 konnte eine geringere Ausbildung des den Zerfall fördernden Minerals γ -Dicalciumsilikat und damit eine signifikante Verringerung des Feinanteils erreicht werden. Durch die veränderte Sieblinie mit geringerem Feinanteil wird auch eine höhere Proctordichte bei gleichzeitig geringerem optimalen Wassergehalt erzielt. Als Folge des geringeren Feinanteils konnte auch der zur Vermeidung von Verstaubungen erforderliche Einsatz von Wasser vermindert werden. Eine durch die Absenkung des Freikalkgehalts und der Verringerung des Feinanteils befürchtete verminderte Neigung zur Selbsterhärtung wurde anhand von CBR-Versuchen nicht bestätigt (Bild 2). Die Überprüfung der Verfestigungsneigung belegt eine frühe Festigkeitsentwicklung durch die rasche Carbonatisierung des noch vorhandenen Freikalks, respektive des Portlandits, und eine weitergehende Festigkeitsentwicklung, die offenbar durch Ca-Ionen aus den kalksilikatischen Mineralen getragen wird.

In Hinblick auf bautechnische Eigenschaften wurde durch die Optimierungsmaßnahmen somit insgesamt eine deutliche Verbesserung erzielt.

Praktische Erprobung

Die weiterführende praxisnahe Erprobung der Edelstahlschlacken als Baustoff für die Herstellung von Ausgleichsschichten bzw. zur Profilierung auf Deponien sowie für tragfähige Bodenpolster auf Industriebrachen erfolgte durch den Bau von Demonstrationsflächen mit den Edelstahlschlacken $A_{\text{opt.}}$ und $B_{\text{opt.}}$. Neben bautechnischen Besonderheiten der Edelstahlschlacken waren sowohl die Entwicklung einer ausreichend hohen Tragfähigkeit für die genannten Anwendungen als auch das Auslaugeverhalten bzw. das potentielle Austreten belasteter Sickerwässer aus mit Edelstahlschlacke errichteten Bauwerken von Interesse. Für die praxisnahe Erprobung wurde die Erstellung von Demonstrationsflächen auf verschiedenen Deponien diskutiert. Da dies aufgrund unvorhergesehener Entwicklungen außerhalb des Forschungsvorhabens jedoch nicht möglich war, wurden zwei Demonstrationsflächen mit jeweils etwa 100 m² Größe in Zusammenarbeit mit der Firma Hermann Rauen GmbH & Co. angelegt.

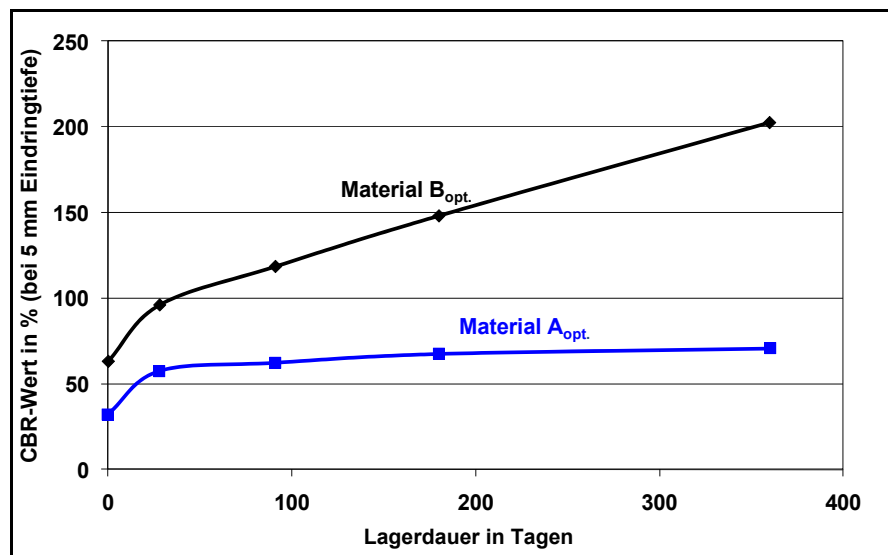


Bild 2: Mittlere CBR-Werte der optimierten Materialien $A_{\text{opt.}}$ und $B_{\text{opt.}}$ in Abhängigkeit von der Lagerdauer

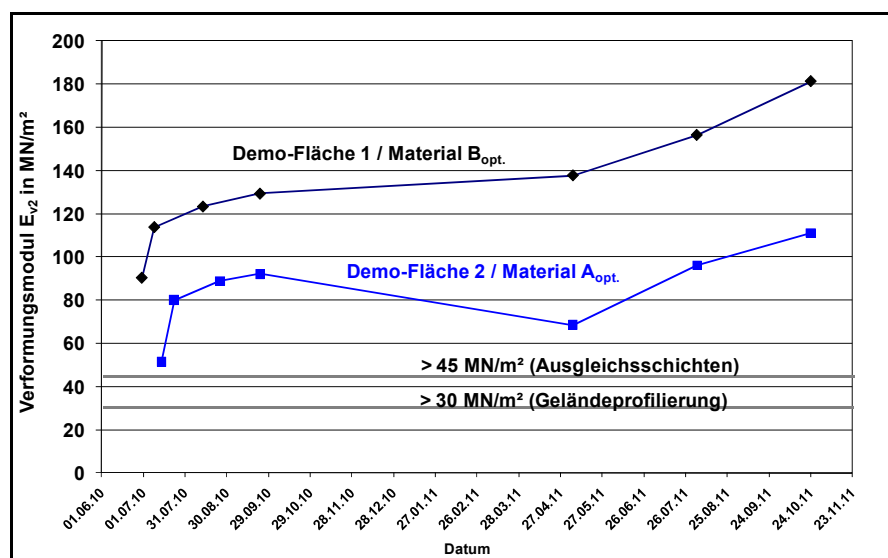


Bild 3: Zeitliche Entwicklung des mittleren Verformungsmoduls E_{v2} der Demonstrationsflächen

Bei der Bauausführung zeigte sich, dass insbesondere bei anhaltend trockener Witterung der Einbaufeuchte besondere Bedeutung zukommt, da eine zu niedrige Einbaufeuchte keine optimale Verdichtung zulässt. Hier wirkt sich der vergleichsweise höhere Feinanteil der Edelstahlschlacke $A_{\text{opt.}}$ kritisch aus.

Trotz der relativ niedrigen Einbaudichten von 90 % der Proctordichte für die Edelstahlschlacke $A_{\text{opt.}}$ bzw. 95 % für Edelstahlschlacke $B_{\text{opt.}}$ wiesen die Demonstrationsflächen bereits unmittelbar nach Einbau hohe Tragfähigkeiten auf. Sie überschritten die in Ausschreibungen üblichen Anforderungen von $E_{v2} > 30 \text{ MN/m}^2$ für Geländeprofilierungen bzw. $> 45 \text{ MN/m}^2$ für Ausgleichsschichten auf Deponien (Bild 3).

In den nachfolgenden Monaten erfolgte ein weiterer Anstieg der Tragfähigkeit, der aber nicht mehr so ausgeprägt war, wie in den ersten Tagen.

Auch eine witterungsbedingte Austrocknung in der Nutzungsphase ist zu vermeiden. Nach rund 8 Monaten Liegezeit wurden im Mai 2011 auf den Demonstrationsflächen staubförmige Beläge festgestellt. Diese staubförmigen Beläge führten insbesondere auf der Demonstrationsfläche 2 mit der Edelstahlschlacke $A_{\text{opt.}}$ zu einer deutlichen Setzung bei der Zweitbelastung im Lastplattendruckversuch und einem entsprechend niedrigen Wert für den Verformungsmodul E_{v2} . Anhand chemischer und mineralischer Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die staubförmigen

Beläge im Vergleich zu Proben aus den verfestigten Demonstrationsflächen deutlich niedrigere Feuchten und Gehalte an chemisch gebundenem Wasser $H_2O_{geb.}$ aufweisen, dafür aber deutlich höhere Gehalte an $CO_2_{geb.}$ besitzen. Dies belegt eine oberflächennahe Austrocknung und eine verstärkte Carbonatisierung. Der Abgleich mit Wetterdaten zeigte, dass in den Monaten vor dem Prüftermin im Mai 2011 eine lang anhaltende Trockenperiode herrschte. Somit stand keine ausreichende Feuchte zur Verfügung, um die staubförmigen Carbonatbildungen an der Oberfläche der Demonstrationsflächen zu binden.

Die Verringerung der E_{V2} -Werte nach rund 8 Monaten Liegezeit ist folglich auf ein Zusammenspiel mehrerer ungünstiger Faktoren zurückzuführen. Aufgrund der nachfolgenden Liegezeit bei feuchterer Witterung im Spätsommer und Herbst 2011 wurde dann der erwartete positive Anstieg der E_{V2} -Werte bestätigt. Im Vergleich beider Demonstrationsflächen wird deutlich, dass die grobkörnigere Edelstahlschlacke $B_{opt.}$ insgesamt höhere Tragfähigkeiten aufweist und hinsichtlich Schwankungen des Feuchtegehalts weniger sensibel reagiert als die feinkörnigere Edelstahlschlacke $A_{opt.}$. Sowohl der zeitliche Verlauf als auch die relativen Unterschiede der Festigkeitsentwicklung beider Materialien auf den Demonstrationsflächen (Bild 3) zeigen eine gute Korrelation zu den im Labor ermittelten CBR-Werten (Bild 2).

Während ein Austrocknen der Edelstahlschlacken bei der Nutzung als Ausgleichsschicht auf Deponien aufgrund der üblicherweise raschen Überbauung nicht zu befürchten ist, ist dies bei einer Nutzung zu Profilierungen oder als Bodenpolster zu beachten. Befürchtungen, dass aufgrund der begrenzten Raumbeständigkeit der beiden Materialien Schädigungen in der Geometrie der Demonstrationsflächen auftreten würden, konnten im Beobachtungszeitraum von 16 Monaten nicht bestätigt werden.

Somit ist insgesamt eine positive Einschätzung der technischen Eignung der Edelstahlschlacken, speziell der Entwicklung der Tragfähigkeit, für die Nutzung als Baustoff für Ausgleichsschichten und Profilierungen auf Deponien gegeben.

Hinsichtlich des Umweltverhaltens der Edelstahlschlacken zeigte sich auch unter praktischen Bedingungen, dass die Eluatkonzentrationen der meisten Spurenelemente über den gesamten Beobachtungszeitraum unterhalb der analytischen Nach-

weisgrenzen bzw. unterhalb der Zuordnungswerte für die DK 0 liegen. Allerdings ist aufgrund der Fluorkonzentrationen im Eluat eine Zuordnung der Edelstahlschlacken $A_{opt.}$ und $B_{opt.}$ lediglich zur DK I möglich – für die Edelstahlschlacke $B_{opt.}$ auch aufgrund der Molybdänkonzentration. Zwar gehen die Fluorkonzentrationen bis zum Ende des Untersuchungszeitraums nach etwa 16 Monaten um rund 20 bis 40 % zurück, entsprechen aber auch dann immer noch dem Zuordnungswert der DK I. Sickerwässer konnten im Beobachtungszeitraum auch bei der Simulation eines Starkregenereignisses nicht festgestellt werden. Dies ist in der relativ geringen Wasserdurchlässigkeit der Materialien sowie in ihrem hohen Bindevermögen für Wasser begründet. Eine Beeinträchtigung tiefer gelegener Deponiematerialien durch Auswaschungen des Baustoffs Edelstahlschlacke ist somit in der Praxis noch weniger gegeben, als die ohnehin niedrigen Eluatkonzentrationen der Laboruntersuchungen erwarten lassen. Die Besiedlung der Demonstrationsflächen mit Regenwürmern, Erdkröten, Nacktschnecken und Waldeidechsen bestätigen den insgesamt positiven Eindruck.

Ausblick

In Hinblick auf eine künftige Nutzung der Edelstahlschlacken als Baustoff für Ausgleichsschichten und Profilierungen von Deponien sowie für Bodenpolster auf Industriebrachen ist somit bezüglich ihrer bautechnischen Eigenschaften und ihrer Umwelteinflüsse eine positive Bilanz zu ziehen.

Für die Edelstahlschlacken $A_{opt.}$ und $B_{opt.}$ ist ein Einsatz bis hin zu Anforderungswerten entsprechend der DK I uneingeschränkt möglich. Sofern in der betrieblichen Praxis die durchgeführten Optimierungsmaßnahmen konsequent umgesetzt und ggf. weitere Einflussgrößen, wie etwa die Kreislaufwässer, mit in ein Optimierungskonzept eingebettet werden, erscheint ein Einsatz bis hin zu Anforderungswerten entsprechend der DK 0 realistisch.

Insofern ist zu erwarten, dass die entsprechenden Qualitäten der Edelstahlschlacken eine höhere Marktakzeptanz auf den genannten Gebieten erzielen werden als bisher. Damit wird die Wettbewerbsfähigkeit für rund 50 % der in Deutschland erzeugten Edelstahlschlacken, entsprechend einer Menge von knapp 300.000 t/a, verbessert. Bezogen auf Nordrhein-Westfalen, wo auch künftig mit einem erheblichen

Materialbedarf im Deponiebau bzw. bei der Erschließung und Nutzbarmachung von Industriebrachen zu rechnen ist, betrifft dies sogar rund 82 % der erzeugten Edelstahlschlacken. Dies trägt zu einer weiteren Verringerung deponierender Mengen und einer Einsparung natürlicher Rohstoffe bei.

Das Ziel des Forschungsvorhabens, potentielle Nutzungswege aufzuzeigen, die aufgrund der gegebenen Rahmenbedingungen und Materialanforderungen einen Einsatz der Edelstahlschlacken als Bauprodukte erlauben, wurde somit erreicht.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 15938 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 Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert, wofür an dieser Stelle gedankt sei.

Literatur

- [1] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Merkblatt über die Verwendung von Hüttenmineralstoffgemischen, sekundärmetallurgischen Schlacken sowie Edelstahlschlacken im Straßenbau, Ausgabe 1998
- [2] Drissen, P.: Entwicklung von Baustoffen aus Edelstahlschlacken für Flächensanierungen und Deponiebau, Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 15938, März 2012
- [3] PDF-1 Datei, International Centre for Diffraction Data, Swarthmore/USA, 2002
- [4] Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts – DepVereinfV 29. April 2009, BGBl. S. 900ff
- [5] DIN EN 12457-4: Charakterisierung von Abfällen – Auslaugung; Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen – Teil 4: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 l/kg für Materialien mit einer Korngröße unter 10 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung), Deutsche Fassung EN 12457-4: 2002

Eignung von Schlacken als Bindemittel für Bodenverfestigungen

Dipl.-Ing. S. Janssen, Dr.-Ing. Th. Merkel

Verkehrswege sind Bauwerke, die in enger Wechselwirkung mit dem anstehenden Untergrund stehen. Ist der Untergrund bautechnisch nicht für die Aufnahme der zu erwartenden Belastungen geeignet, stellen Bodenbehandlungen in Form von Bodenverbesserungen und Bodenverfestigungen im Allgemeinen die einzigen Möglichkeiten dar, einen kosten- und materialaufwändigen Bodenaustausch ressourcenschonend zu vermeiden.

Neben der mechanischen Verbesserung der Böden, beispielsweise durch Einbringen geeigneter Körnungen, ist der Einsatz von Bindemitteln zur Bodenverbesserung gebräuchlich. An sich ungeeignete Böden werden so erst verarbeitbar und verdichtungsfähig. Mit der Zugabe höherer Bindemittelanteile tritt eine Verfestigung des Bodens ein, die sich in der Entwicklung einer gewissen Druckfestigkeit, vor allem jedoch in einer ausreichend geringen Frostempfindlichkeit des Bodens äußert. Böden werden damit dauerhaft tragfähig und frostbeständig.

Die "Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau – ZTV E-StB" [1] als maßgebendes Regelwerk sehen als Standardbindemittel für Bodenbehandlungen hydraulische Bindemittel (Zemente, hydraulische Tragschichtbinder) und Baukalk (Feinkalk, Kalkhydrat) sowie Gemische dieser Bindemittel vor. Bei Erbringung eines entsprechenden Eignungsnachweises kann jedoch auch der Einsatz anderer Bindemittel zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer vereinbart werden.

Hochhofenschlacke und Stahlwerksschlacken werden bereits seit Jahrzehnten erfolgreich im Straßenbau eingesetzt [2-5]. Infolge der sich überlagernden hydraulischen und carbonatischen Erhärtung ergeben sich eine Verfestigung und höhere Tragfähigkeit der eingebauten Tragschicht.

Bei der Verwendung feinkörniger Stahlwerksschlacken wurden in verschiedenen Untersuchungen ebenfalls carbonatische und hydraulische Prozesse nachgewiesen [6-8]. Inwieweit sich die genannten positiven Effekte auf die Behandlung von Böden übertragen lassen, war bislang fraglich. Offen war, ob insbesondere mit den für

Bodenverfestigungen üblichen Bindemittelgehalten eine ausreichende Erhärtung des Boden-Bindemittel-Gemisches zu erreichen wäre. Im Rahmen eines IGF-Vorhabens sollten daher in Langzeituntersuchungen sowohl die Festigkeitsentwicklung als auch die daraus entstehenden Veränderungen in Bezug auf die Auslaugbarkeit nachgewiesen werden. Letztendlich war aufzuzeigen, ob sich für die großteils den kmU zuzurechnenden Hersteller und Vertreiber der verwendeten Bindemittel auf Schlackenbasis zusätzliche Absatzfelder ergeben würden.

In die Untersuchungen wurden ein feinkörniger (UL) und zwei verschiedene gemischtkörnige Böden (ST*, SU*) einbezogen, die als "sehr frostempfindlich" (F3) einzustufen sind. Neben den Referenzbindemitteln Portlandzement (PZ) CEM I 32,5 R, Hochofenzement mit niedriger Anfangsfestigkeit (HOZ-L) CEM III 32,5 L und Feinkalk CL 90 wurden als neue Bindemittel ein vollständig gemahlener Hüttensand ("Hüttensandmehl", HSM) und ein teilweise gemahlener Hüttensand ("Hüttensandgrieß", HSG) sowie jeweils eine Gießpfannenschlacke (sekundärmetallurgische Schlacke, GPS) und eine LD-Schlacke (LDS) untersucht. Tabelle 1 enthält eine Übersicht der verwendeten Ausgangsstoffe.

Die Ausgangsmaterialien wurden zunächst hinsichtlich ihrer bautechnischen Eigenschaften und ihres Auslaugverhaltens untersucht sowie chemisch-mineralogisch cha-

rakterisiert. Für die anschließende Durchführung von Eignungsprüfungen mit dem Ziel einer Bodenverfestigung sieht das technische Regelwerk je nach Bindemitteltyp prinzipiell zwei unterschiedliche Verfahrensweisen vor. Ist der Einsatz von Feinkalk oder Kalkhydrat als Bindemittel vorgesehen, ist nach den TP BF-StB Teil B 11.5 "Eignungsprüfung bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat" [9] zu verfahren. Bei Verwendung von hydraulischen Bindemitteln sind die Vorgaben der TP BF-StB Teil B 11.1 "Eignungsprüfungen für Bodenverfestigungen mit hydraulischen Bindemitteln" [10] zu beachten. Die Vorgehensweise bei der Eignungsprüfung der neuen Bindemittel wurde analog der Vorgehensweise bei der Prüfung hydraulischer Bindemittel gewählt. Nach Herstellung und 28-tägiger Lagerung entsprechender Probekörper waren diese in Frosthebeversuchen hinsichtlich einer ausreichenden Frostbeständigkeit zu prüfen. Parallel dazu wurden an weiteren Probekörpern Druckfestigkeitsversuche nach 7 und 28 Tagen Lagerungsdauer durchgeführt. Die Bindemittel wurden dafür in jeweils drei unterschiedlichen Anteilen in die Böden eingebracht. Anhaltswerte für die zu wählenden Bindemittelmengen in Abhängigkeit von der Bodenart enthalten verschiedene technische Regelwerke [1, 9-11]. Es wurden vergleichsweise hohe Bindemittelgehalte gewählt, um auch möglicherweise geringfügige Effekte bei den neuen Bindemitteln sichtbar werden zu lassen, Tabelle 2.

Böden	Bindemittel	
	Referenzbindemittel	Neue Bindemittel
- Sand-Ton-Gemisch ST* - Leicht plastischer Schluff UL - Sand-Schluff-Gemisch SU*	- PZ Portlandzement CEM I 32,5 R (DIN EN 197-1) - HOZ-L Langsam erhärtender HOZ CEM III 32,5 L (DIN EN 197-4) - Feinkalk Weißfeinkalk CL 90 (DIN EN 459-1)	- HSM Hüttensandmehl/vollständig gemahlener Hüttensand (in Anlehnung an DIN EN 14227-12) - HSG "Hüttensandgrieß"/teilweise gemahlener Hüttensand (in Anlehnung an DIN EN 14227-12) - LDS LD-Schlacke - GPS Gießpfannenschlacke

Tabelle 1: Verwendete Ausgangsstoffe

Im Ergebnis zeigen die Eignungsprüfungen, dass alle Böden mit den Standardbinde-mitteln PZ und HOZ-L so weit verfestigt werden können, dass eine ausreichende Frostbeständigkeit der Boden-Bindemittel-Gemische erreicht wird. Bei den Boden-Bindemittel-Gemischen mit den neuen Bindemitteln konnte dagegen zwar eine gewisse Erhärtungswirkung festgestellt werden; diese reichte jedoch bei keiner Variante aus, eine ausreichende Frostbe-ständigkeit zu erzielen.

Es wurden daraufhin Bindemittelgemisch-Varianten konzipiert, deren Erhärtungs-potential durch das Verfahren der Wärme- kalorimetrie abgeschätzt wurde. Mit Hilfe der Wärmekalorimetrie können Hydrati-onsreaktionen eines Bindemittels durch kontinuierliche Messung der durch diese Reaktion erzeugten Wärme erfasst werden. Die Erfassung von Carbonatisierungsvor-gängen ist mit diesem Verfahren allerdings nicht möglich. Sinnvolle Alternativprüfver-fahren, die innerhalb kurzer Zeit mit ver-gleichbar geringem Aufwand durchzuführen sind, standen nicht zur Verfügung. Nach der Prüfung der bislang in die Untersuchungen einbezogenen Bindemittel wurden Mischun-gen aus HSM und LDS, PZ und GPS, PZ und LDS sowie HSM und GPS in unter-schiedlichen Mengenverhältnissen herge-stellt und geprüft. Die größten Wärme-entwicklungen wurden bei den Varianten 25 % PZ + 75 % GPS, 10 % PZ + 90 % GPS, 25 % PZ + 75 % LDS und 80 % HSM + 20 % LDS gemessen, Bild 1. Diese Bindemittelgemisch-Varianten wurden anschließend im Rahmen von weiteren Eignungsprüfungen hinsichtlich ihres Frostwi-derstandes und ihrer Druckfestigkeit unter-sucht.

Die Ergebnisse zeigen deutliche Unter-schiede in Abhängigkeit von der Bodenart und dem Bindemittelgemisch. Die ge-mischtkörnigen Böden konnten mit keinem der gewählten Bindemittelgemische genü-gend erhärten. Ausreichende Frostbestän-digkeiten und korrespondierende Druck-festigkeiten bewirkten dagegen die Vari-anten 25 % PZ + 75 % GPS, 25 % PZ + 75 % LDS und 80 % HSM + 20 % LDS in den jeweils höchsten Bindemittelgehalten bei dem feinkörnigen Boden. Diese Vari-anten wurden daher in das weitere Untersuchungsprogramm aufgenommen.

Die Entwicklung der Druckfestigkeiten bis zu einer Lagerdauer von 180 Tagen zeigt für die Varianten mit 25 % PZ + 75 % GPS und 25 % PZ + 75 % LDS ähnliche Festigkeitsentwicklungen. Zwischen 91 und

180 Tagen ist nur noch eine relativ geringe Festigkeitszunahme zu verzeichnen. Ins-gesamt erreicht die Variante 25 % PZ + 75 % GPS etwas höhere Druckfestigkeiten. Deutlich höhere Druckfestigkeiten mit einer deutlichen Zunahme auch zwischen 91 und 180 Tagen Lagerzeit weist die Variante mit

80 % HSM + 20 % LDS auf. Die Prüfung der Druckfestigkeiten nach 7 und 28 Tagen ergibt Werte, die noch oberhalb der Ergeb-nisse derjenigen Boden-Bindemittelge-misch-Varianten liegen, die mit den Referenzbindemitteln PZ und HOZ-L erstellt wurden, Bild 2.

Boden	Bindemittelgehalt [M.-%]		
	TP BF-StB B 11.1	Merkblatt Bodenverfestigung und -verbesserung	gewählt
SU*, ST*	7 - 12	4 - 12	8 / 10 / 12
UL	7 - 12	7 - 16	12 / 14 / 16

Tabelle 2: Empfohlene und gewählte Bindemittelgehalte (hydraulische Bindemittel)

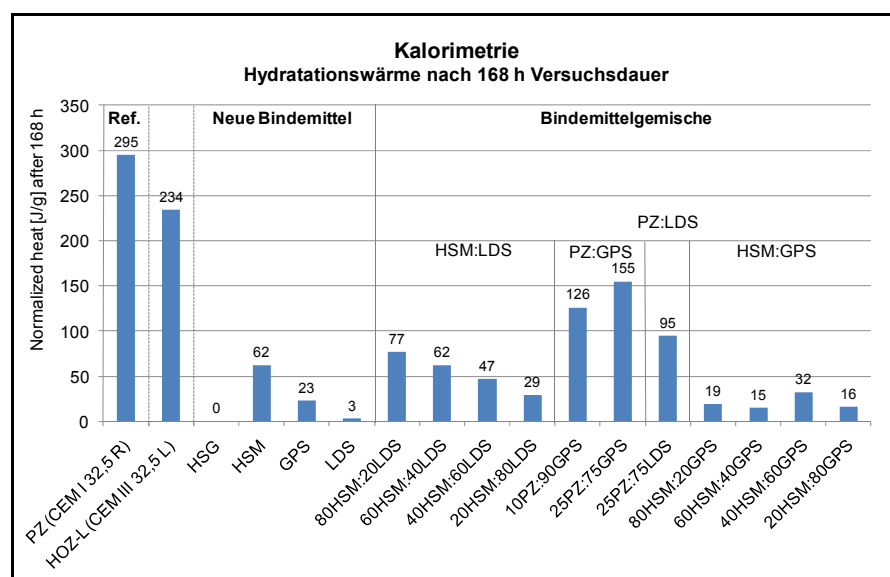


Bild 1: Hydrationswärme nach 168 h Versuchsdauer aller geprüften Varianten

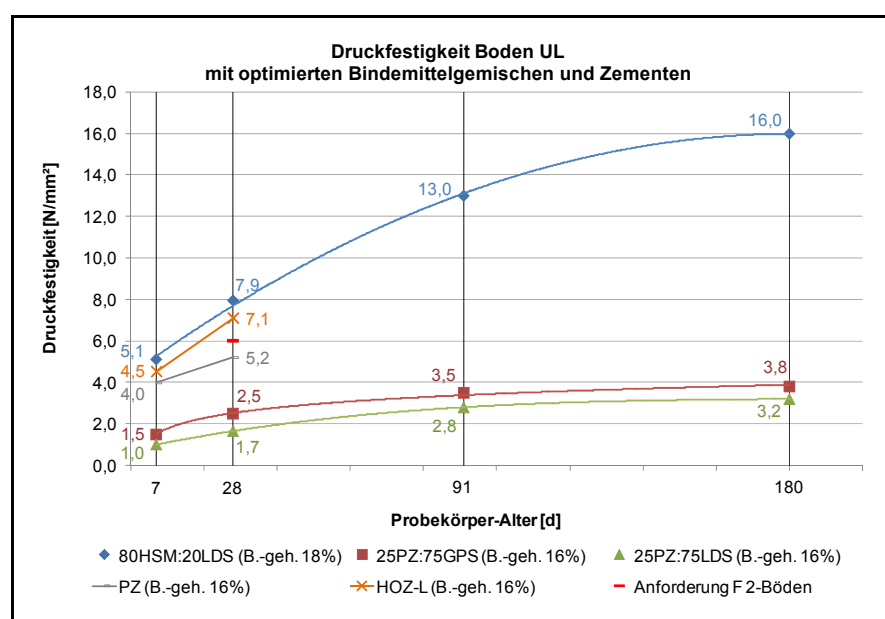


Bild 2: Druckfestigkeit, Langzeitentwicklung der optimierten Boden-Bindemittel-Varianten

Kennwert	Feinkalk	PZ	HOZ-L	HSG	HSM	GPS	LDS
Durchgang [M.-%] bei 0,063 mm	97,1	96,6	99,1	99,3	100,0	49,9	12,7
Durchgang [M.-%] bei 0,002 mm	19,5	8,3	10,1	21,3	25,2	9,7	3,9
Größtkorn	0,5	0,5	0,125	0,125	0,05	4	4
Spezifische Oberfläche nach Blaine [cm ² /g]	8634	3850	4040	1332	4184	¹⁾	¹⁾
¹⁾ Ermittlung aufgrund zu hohen Größtkornanteils versuchstechnisch nicht möglich							

Tabelle 3: Feinheit der Bindemittel

Der Einsatz industrieller Nebenprodukte für Bodenbehandlungen setzt neben der technischen Eignung auch die Umweltverträglichkeit der daraus hergestellten Baustoffgemische voraus, insbesondere vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an Baustoffe hinsichtlich der Auslaugbarkeit. Die Auslaugewerte der frisch hergestellten, unverfestigten Boden-Bindemittelgemisch-Varianten werden erwartungsgemäß durch das Auslaugverhalten der Böden bestimmt. Die an sich schon geringen Analysenwerte der Ausgangsstoffe wurden durch die Probekörperherstellung weiter deutlich reduziert. Einerseits ist dies auf die Verringerung der Oberfläche zurückzuführen, andererseits auf Verfestigungsreaktionen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Bindemittel auf Schlackenbasis unter bestimmten Voraussetzungen für den Einsatz in Bodenverfestigungen geeignet sind. Die alleinige Verwendung der reinen aus Schlacken hergestellten Bindemittel ist jedoch in der Regel nicht zielführend.

Die Bestandteile der untersuchten Böden reichten alleine nicht aus, um eine hydraulische Reaktion des HSM zu initiieren. Hier ist die Zugabe eines Anregers erforderlich, der in den vorliegenden Untersuchungen alkalisch in Form einer kalkreichen LDS bestand. Die Zugabe von PZ zur GPS und LDS konnte ausreichende Erhärtungsreaktionen bewirken. Insbesondere bei der Variante 25 % PZ + 75 % LDS ist im Hinblick auf die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen jedoch fraglich, welcher Anteil der erzielten Festigkeiten letztlich auf den PZ-Anteil zurückzuführen ist.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen für die geprüften Bindemittelgemisch-Varianten, dass eine generelle Verwendung für Bodenverfestigungen nicht vorgesehen werden kann, sondern abhängig von der Bodenart ist. Die Eignung der Bindemittelgemische ist daher für jeden Einzelfall in sorgfältig durchzuführenden Eignungsprüfungen

nachzuweisen. Zudem sind positive Ergebnisse stark abhängig von der Ermittlung des richtigen Bindemittelgehaltes. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Zementen haben sich die untersuchten Bindemittelgemisch-Varianten als sehr abhängig gegenüber Bindemittelschwankungen erwiesen.

Insgesamt wird deutlich, dass der Einsatz nach dem Entstehungsprozess nicht weiter aufbereiteter bzw. lediglich durch Absiebung erzeugter feinkörniger Schlacken nur sehr eingeschränkt sinnvoll ist. Für die oft klein- und mittelständischen Aufbereiter und Vermarkter wäre dies eine optimale Möglichkeit zur Abrundung ihres Produktportfolios gewesen. Letztlich zeigt sich jedoch, dass zur Erzeugung einer hohen Reaktionsfähigkeit der Bindemittel eine hohe spezifische Oberfläche erforderlich ist, vgl. auch Tabelle 3. Dies ist nur durch eine kostenintensive Aufmahlung der Bindemittel zu realisieren, die entsprechende Investitionen erfordert.

Weiteres Forschungspotential ist in einer Optimierung der Bindemittelgemische hinsichtlich ihrer Mischungsverhältnisse sowie der Entwicklung neuer Varianten unter Berücksichtigung ggf. aufzunehmender Schlacken zu sehen. Ob eine teilweise Aufmahlung wie beim HSG ausreicht, um in Verbindung mit einem geeigneten Anreger entsprechende Erhärtungsreaktionen zu erzeugen, sollte in diesem Zusammenhang ebenfalls untersucht werden. Auch der Einsatz feinkörniger, ggf. aufgemahlener Schlackengemische als Bindemittel für (qualifizierte) Bodenverbesserungen – das heißt bei geringeren Anforderungen als an die hier untersuchten Bodenverfestigungen – ist eine Möglichkeit, der in Zukunft nachgegangen werden sollte.

Dieses IGF-Vorhaben Nr. 15761 der Forschungsvereinigung VDEh-Gesellschaft zur Förderung der Eisenforschung mbH wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemein-

schaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Literatur

- [1] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau – ZTV E-StB, Ausgabe 2009
- [2] Waechter, G.: Geschichte der Hochofenschlacke im Straßenbau seit 1945, Straße + Autobahn 52 (2001) Heft 10/11, S. 580-583, 636-642
- [3] Geiseler, J.: Eisenhüttenschlacken – Nebenprodukte der Stahlindustrie, Eisenhüttenschlacken – Eigenschaften und Nutzung, Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken (2000) Heft 6, S. 9-39
- [4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Merkblatt über die Verwendung von Eisenhüttenschlacken im Straßenbau, Ausgabe 1999
- [5] Motz, H., Geiseler, J.: Selbsterhärtende Tragschichten aus Hochofenschlacke, Straßen- und Tiefbau 41 (1987) Heft 4, S. 24-33
- [6] Krass, K., Nendza, H., Stalman, V.: Abdichtung von Deichen mit Stahlwerksschlacken, Wasser und Boden 36 (1984) Heft 4, S. 158-163
- [7] Motz, H., Palapys, M.: Feinkörnige Schlacken als Dichtungsbaustoffe, Straßen- und Tiefbau 44 (1990), Heft 9, S. 37-40
- [8] Motz, H., Merkel, Th.: Feinkörnige Schlacken als Dichtungsbaustoffe - Untersuchungen im Labor und in der Praxis, EGKS-Forschungsauftrag Nr.: 7210-CB/115-92-C1.03a (Bericht EUR 18525 DE), Luxemburg, 1998
- [9] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau – TP BF-StB, Teil B 11.5: Eignungsprüfung bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat, Ausgabe 1991

[10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau – TP BF-StB, Teil B 11.1: Eignungsprüfungen für

Bodenverfestigungen mit hydraulischen Bindemitteln, Ausgabe 2005

[11] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Merkblatt über Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln, Ausgabe 2004

Stabilisierung sekundärmetallurgischer Schlacken aus der Qualitätsstahlerzeugung

Dr.-Ing. P. Drissen, Dr.-Ing. D. Mudersbach (FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.)

Dr.-Ing. K. Schulbert, Dipl.-Ing. T. Zehn (Georgsmarienhütte GmbH)

Einleitung und Problemstellung

Die Eisen- und Stahlerzeugung gliedert sich heute in primärmetallurgische Prozesse, wie die Reduktion im Hochofen beziehungsweise die Direktreduktion, die Rohstahlerzeugung im LD-Konverter oder im Elektroofenprozess, und in die sogenannte sekundärmetallurgische Behandlung des Rohstahls zur Feineinstellung der gewünschten Stahlqualität oder zur Erreichung der für das Vergießen notwendigen Stahltemperatur.

Schlacken aus den sekundärmetallurgischen Prozessen weisen häufig die folgenden verfahrensbedingten Eigenschaften mit den daraus entstehenden Konsequenzen auf, die ihre Handhabung in den Aufbereitungsbetrieben und ihre Nutzung erheblich erschweren:

- ♦ Die Neigung, bereits bei der Abkühlung feinkörnig zu zerfallen, kann bei Aufbereitung, Transport und Umschlag eine Staubentwicklung bewirken.
- ♦ Der feinkörnige Zerfall führt bei der Aufbereitung häufig zu Anbackungen und zum Verstopfen der Siebe.
- ♦ Aufgrund ihrer Feinkörnigkeit stehen sekundärmetallurgische Schlacken in Konkurrenz zu einer Vielzahl anderer feinkörniger Baustoffe.
- ♦ Aufgrund der Feinkörnigkeit können ggf. umweltrelevante Spurenelemente leichter freigesetzt werden, was weitere Einschränkungen bei der Vermarktung im Bauwesen zur Folge haben kann.

Ursache für den schon während der Abkühlung einsetzenden Zerfall ist ein Modifikationswechsel des Dicalciumsilikats (C_2S), welches aus metallurgischen Gründen wesentlicher Bestandteil der sekundärmetallurgischen Schlacken ist. Beim Abkühlen geht die β -Modifikation (Larnit) bei Temperaturen $< 500^\circ C$ in die γ -Modifikation (Calcio-Olivin) über. Diese Umwandlung ist mit einer Volumenzunahme von etwa

12 % verbunden. Da das β - C_2S weitgehend homogen in der bereits erstarrten Schlacke verteilt ist, führt dies zu einer Zerstörung des gesamten Korngefüges und damit zu einem vollständigen Zerrieseln der ursprünglich kompakten Schlacke meist schon im Schlackenkübel oder -beet [1-3].

Zur Vermeidung des Dicalciumsilikatzerfalls bestehen betrieblich zwei Möglichkeiten, deren Umsetzung im Rahmen eines AiF-Forschungsauftrags untersucht wurde:

- ♦ Stabilisierung der β -Modifikation des C_2S durch Zusätze (Konditionierung)
- ♦ Beschleunigte Abkühlung der Schlacke in einem bestimmten Temperaturfenster

– Konditionierung

Durch die Gegenwart bestimmter Elemente, wie Bor oder Phosphor, kann die β -Modifikation des C_2S stabilisiert werden. Die β -Modifikation des C_2S bleibt dann bis zu normalen Umgebungstemperaturen stabil, so dass ein Zerfall der C_2S -haltigen Schlacke bei der Abkühlung vollständig unterbleibt. Für die Stabilisierung zerfallsverdächtigter Schlacken reichen meist Gehalte in der Größenordnung von 1 M.-% B_2O_3 beziehungsweise P_2O_5 aus.

Die Vermeidung des Schlackenzerfalls durch Stabilisierung des β - C_2S mit Bor oder Phosphor stellt eine sehr effiziente und bekannte Methode dar [3]. Für eine erfolgreiche Stabilisierung ist es allerdings zwingend erforderlich, dass eine homogene dünnflüssige Schlacke vorliegt, die eine gleichmäßige Verteilung der bor- oder phosphorhaltigen Konditionierungsmittel ermöglicht.

Die praktische Umsetzung dieser Methode scheitert in der Praxis daher zumeist daran, dass die Schlacken unzureichend aufgeschmolzen sind, bei der Behandlung ein unzureichender Abstand zur Erstarrungstemperatur der Schlacken vorliegt, die

Schlacken nicht dünnflüssig genug sind oder durch betrieblich bedingte Verzögerungen zumindest schon teilweise erstarrt sind. Die praktische Umsetzung dieser Methode erfordert daher ein auf die betrieblichen Gegebenheiten genau abgestimmtes Vorgehen.

– Schnelle Abkühlung

Durch eine schnelle Abkühlung erfolgt die Ausbildung eines feinkristallinen, im Idealfall sogar eines glasigen Gefüges. Allerdings ist bei Schlacken mit hohen C/S-Basizitäten die Erzeugung eines glasigen Gefüges betrieblich nahezu unmöglich. Beides kann jedoch die Gefügezerstörung verhindern. Aufgrund der schlechten thermischen Leitfähigkeit der kalksilikatischen Schlacken ist die Wärmeableitung jedoch gering. Bei einer betrieblichen Anwendung dieser Maßnahme wird daher zumeist nur an der Oberfläche des Schlackevolumens ein feinkristallines und damit stabiles Gefüge erzeugt. Dies verringert zwar den Anteil feinkörnig zerfallenen Materials, eine Vermeidung des Zerfalls und der damit einhergehenden negativen Begleitumstände ist aber betrieblich sehr schwierig zu realisieren.

– Voruntersuchungen

Im Rahmen des bereits 2006 abgeschlossenen AiF-Forschungsauftrags Nr. 13934 N konnten die unterschiedlichen Stabilisierungsmethoden für die Zerfallsschlacken aus der Edelmetallherzeugung erfolgreich demonstriert und umgesetzt werden [3]. Aufgrund der hohen spezifischen Schlackemengen in der Sekundärmetallurgie der Edelmetallherzeugung bestand zu dieser Zeit ein erheblicher Handlungsdruck.

Für die sekundärmetallurgischen Schlacken aus der Qualitätsstahlerzeugung nach dem LD-Konverter- und bzw. dem Elektroofenverfahren wurde eine derartige stabilisierende Behandlung in der Vergangenheit immer wieder diskutiert, aber bislang in keinem Werk betrieblich durchgehend

erfolgreich erprobt und umgesetzt. Die Ursachen hierfür liegen einerseits darin, dass aufgrund der im Vergleich zu den primärmetallurgischen Schlacken geringeren spezifischen Schlackmengen kein vordringlicher Handlungsbedarf gesehen wurde. Andererseits erfolgte keine systematische und umfassende Anpassung der Behandlung an die spezifischen Gegebenheiten. In einzelnen betrieblichen Anwendungen wurde nur ein mäßiger Erfolg erzielt, welcher teilweise auch in den Schwankungen der Qualität des Konditionierungsstoffs begründet war.

– Aktuelles Forschungsvorhaben

Ausgehend von dieser Situation wurde in Zusammenarbeit mit dem Elektrostahlwerk Georgsmarienhütte GmbH ein Forschungsvorhaben zur Stabilisierung sekundärmetallurgischer Schlacken aus der Qualitätsstahlerzeugung durchgeführt, um die Umweltbelastung durch Verstaubung zu minimieren und die sekundärmetallurgischen Schlacken der Qualitätsstahlerzeugung als grobstückige Gesteinskörnung einer höherwertigen Nutzung zuzuführen [4].

Auswahl und Erprobung von Konditionierungsmitteln

Für die Untersuchungen wurden verschiedene kommerziell verfügbare Materialien ausgewählt, die aufgrund ihrer nominalen B_2O_3 - und P_2O_5 -Gehalte als Konditionierungsmittel zur Stabilisierung sekundärmetallurgischer Schlacken eingesetzt werden könnten (Tabelle 1).

Es handelt sich um weitgehend silikatische Materialien mit unterschiedlichen B_2O_3 - und P_2O_5 -Gehalten. Chemisch gebundenes H_2O oder CO_2 sind nicht enthalten, so dass Verpuffungen bei der Zugabe zur schmelzflüssigen Schlacke nicht zu befürchten waren. Die Konditionierungsmittel sind sowohl als körniges Material mit einigen Millimetern Korngröße als auch als mehlartiges Material verfügbar. Aufgrund der gelieferten Korngrößen war eine gleichmäßige Verteilung und rasches Auflösen in der zu behandelnden schmelzflüssigen Schlacke gewährleistet. Darüber hinaus hängt auch die erfolgreiche pneumatische Zugabe sehr stark von der Korngröße des Materials ab.

Laborversuche

Um die in den geplanten Betriebsversuchen erforderlichen Mengen für eine Stabilisierung abschätzen zu können und die erforderlichen Rahmenbedingungen, wie den

Konditionierungsmittel		B_2O_3 [M.-%]	P_2O_5 [M.-%]
1	Vitribore, Stollberg/DAMET	30	-
2	Glassrock, Stollberg/DAMET	20	10
3	Vitroc, Rio Tinto	68	-
4	BoSi, Schirmbeck	10	-
5	BOOR, AFFILIPS	46	-
6	CPS, AFFILIPS	-	24

Tabelle 1: Konditionierungsmittel und deren Gehalte an B_2O_3 - bzw. P_2O_5



Bild 1: Bei der Abkühlung zerfallene Schlacke (links) und stabilisierte Schlacke (mittig, rechts)
Röntgenographisch ist der Zerfall bzw. die Stabilisierung eindeutig auf die Ausbildung der γ -Modifikation bzw. β -Modifikation bei der Abkühlung zurückzuführen (Bild 2).

Einfluss der Schlackenviskosität auf das Auflösungsverhalten, zu erfassen, wurden zunächst Vorversuche mit den Konditionierungsmitteln 1 und 2 im Labor durchgeführt. Hierfür wurden Proben einer betrieblich erzeugten sekundärmetallurgischen Schlacke im Tammannofen aufgeschmolzen und die Konditionierungsmittel mit einem Chargierrohr zugesetzt.

Die Laboruntersuchungen zeigen, dass bei Zugabe von Bor bereits ab einem B_2O_3 -Gehalt von 0,2 M.-% in der sekundärmetallurgischen Schlacke eine teilweise Stabilisierung erfolgt. Eine vollständige Stabilisierung wird ab einem Gehalt von 0,5 M.-% B_2O_3 erzielt. Bild 1 zeigt links eine im Labor aufgeschmolzene sekundärmetallurgische Schlacke ohne Zugabe von Konditionierungsmitteln, die bei der definiert langsamen Abkühlung vollständig zerfallen ist. Diese Referenzprobe dient auch als Nachweis für die Einhaltung einer

geeigneten Abkühlgeschwindigkeit. Die im Bild 1 sichtbaren kleineren Körnungen der stabilisierten Proben sind beim Herauslösen der Proben aus dem Tiegel entstanden. Auch durch die Zugabe von 0,5 M.-% des Konditionierungsmittels 1 bzw. von 1,0 M.-% des Konditionierungsmittels 2 wurde der Zerfall bei der Abkühlung unterbunden.

Im Röntgendiagramm (Bild 2) der zerfallenen Schlacke sind deutlich Reflexe der γ -Modifikation des C_2S (hier rot markiert, als Calcio-Olivin bezeichnet) zu erkennen, während im Röntgendiagramm der stabilisierten Schlacke Reflexe der β -Modifikation des C_2S (hier hellgrün markiert, als Larnit bezeichnet) zu erkennen sind. Zusätzlich tritt in der stabilisierten Schlacke ein Ca-Mg-Al-Silikat auf (dunkelgrün markiert), das sich aufgrund des silikatischen Eintrags durch das Konditionierungsmittel gebildet hat.

Betriebsversuche

Basierend auf den Laborversuchen wurde in Betriebsversuchen eine Stabilisierung der sekundärmetallurgischen Schlacken bei der Georgsmarienhütte GmbH durchgeführt, da dort die sekundärmetallurgische Schlacke in der Stahlpfanne auch nach dem Vergießen des Stahls in der Stranggussanlage noch flüssig vorliegt. Beim Umfüllen der Schlacke in den Schlackentopf wird somit ein homogenes Einbringen der Konditionierungsmittel begünstigt.

– Händische Zugabe

In den ersten drei Versuchsserien wurde zunächst die händische Zugabe von Säcken mit den Konditionierungsmitteln 1, 2 und 3 beim Umfüllen der Schlacke erprobt. Ausgehend von den Erfahrungen der Laborversuche und einer mittleren Schlackenmenge von 2 t sollte durch eine Zugabe von 30 kg zum Beispiel des Konditionierungsmittels 1 ein für die Stabilisierung ausreichend hoher B_2O_3 -Gehalt von etwa 0,5 M.-% eingestellt werden können (Tabelle 2).

Die Bestimmung der aktuellen Schlackenmenge während der Betriebsversuche erwies sich jedoch als ungenau, da mit der Kranwaage auch eine unbestimmte Restmenge an Stahl in der Pfanne mit erfasst wurde. Für die erste Versuchsserie wurde die Zugabemenge daher von 30 auf 60 kg Konditionierungsmittel je Charge angehoben. Die Zugabemenge entspricht damit etwa 1 bis 2 % der Schlackenmenge. Die abgekühlten Schlackenchargen zeigten bereits bei einer Zugabemenge von 30 kg eine deutlich verringerte Verstaubungs- und Zerfallsneigung. Allerdings wurde im Schlackenbeet immer noch ein partieller Zerfall bei der Abkühlung festgestellt. Bei einer Zugabemenge von 60 kg wurde kein Zerfall mehr festgestellt; auch im Schlackenbeet lag ein stückiges Material vor. Eine Verstaubung wurde nicht beobachtet.

Einblasversuche

Da eine händische Zugabe in der betrieblichen Praxis nur mit erheblichem Aufwand realisierbar ist und darüber hinaus das Umfüllen in kleine Gebinde einen nicht unerheblichen Kostenfaktor darstellt, wurde in weiteren sechs Versuchsserien im Stahlwerk die pneumatische Injektion der Konditionierungsmittel 2, 4, 5 und 6 erprobt. Hierzu wurden die Konditionierungsmittel mit Druckluft über eine Lanze in den Gießstrahl beim Umfüllen der Schlacke einge-

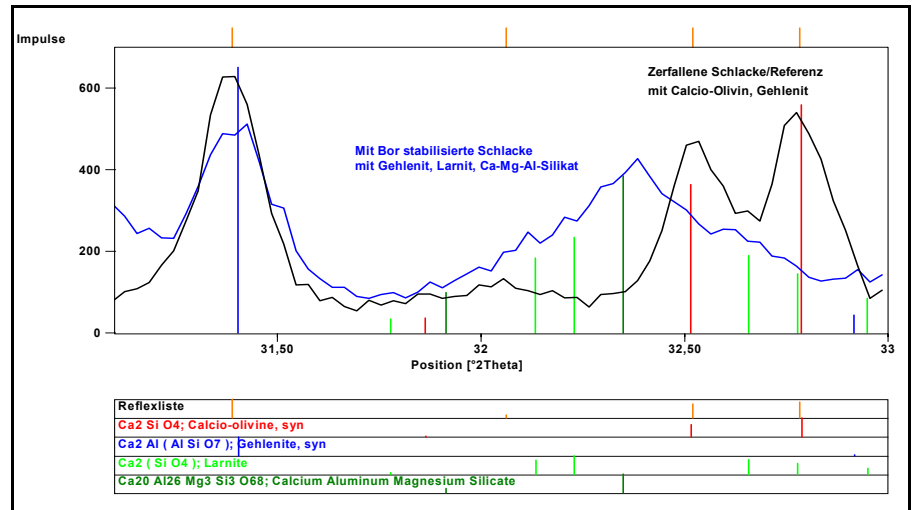


Bild 2: Ausschnitt der Röntgendiagramme einer zerfallenen und einer mit Bor stabilisierten, stückigen sekundärmetallurgischen Schlacke

Versuchs-Serie:	Zugabe Konditionierungsmittel 1	B_2O_3 [M.-%]	P_2O_5 [M.-%]	β - C_2S	γ - C_2S	Zerfall
2.1 (Referenz)	0	0,03	0,08	(X)	X	Ja
2.1.1	30 kg/Charge	0,11	0,07	(X)	(X)	Ja
2.1.2	30 kg/Charge	0,16	0,09	(X)	(X)	Ja
2.1.3	30 kg/Charge	0,14	0,11	(X)	(X)	Ja
2.1.4	60 kg/Charge	0,52	0,12	X		Nein
2.1.5	60 kg/Charge	0,75	0,11	X		Nein
2.1.6	60 kg/Charge	0,51	0,10	X		Nein

Tabelle 2: Kenndaten der Serie 1 von 9 [X = Hauptbestandteil, (X) = Nebenbestandteil]

blasen (Bild 3). Dies ermöglicht auch ein homogeneres Einbringen der Konditionierungsmittel als bei einer händischen Zugabe in Säcken.

Grundsätzlich erwiesen sich alle verwendeten Konditionierungsmittel als förderfähig. Teilweise wurden gezielt höhere Förderraten eingestellt, um einerseits diese Zugabetechnik für Konditionierungsmittel mit niedrigen B_2O_3 - bzw. P_2O_5 -Gehalten und entsprechend höheren Zugabemengen zu erproben und andererseits die Auswirkungen entsprechend höherer Zugabemengen auf die Schlackenviskosität und das Auflösungsverhalten zu überprüfen. Negative Auswirkungen konnten jedoch auch bei Zugabemengen von bis zu 120 kg, entsprechend etwa 9 % der Schlackenmenge, nicht festgestellt werden.

Tabelle 3 zeigt am Beispiel der Versuchsserie 5 mit dem Konditionierungsstoff 5 die Ergebnisse der erfolgreichen C_2S -Stabilisierung mit einem B_2O_3 -haltigen Reststoff.



Bild 3: Einblasen von Konditionierungsmitteln in den Schlackentopf (Kaltvorversuch)

Versuchs-Serie:	Zugabe Konditionierungs- mittel 5	B ₂ O ₃ [M.-%]	P ₂ O ₅ [M.-%]	β-C ₂ S	γ-C ₂ S	Zerfall
2.5 (Referenz)	0	< 0,01	0,02		X	Ja
2.5.1	30 kg/Charge	0,03	< 0,01	(X)	X	Ja
2.5.2	30 kg/Charge	0,07	0,01	(X)	X	Ja
2.5.3	40 kg/Charge	0,28	< 0,01	(X)	(X)	tlw.
2.5.4	40 kg/Charge	0,33	< 0,01	(X)	(X)	tlw.
2.5.5	40 kg/Charge	1,57	< 0,01	X		Nein
2.5.6	50 kg/Charge	1,21	0,03	X		Nein

Tabelle 3: Kenndaten der Serie 5 von 9 [X = Hauptbestandteil, (X) = Nebenbestandteil]



Bild 4: Sofortige schnelle Abkühlung in der Stahlwerkshalle

Die Auswertung der analytischen Ergebnisse aller Betriebsversuche bestätigte bereits die Erfahrungen der Laborversuche. Eine erfolgreiche Stabilisierung wird durch einen B₂O₃-Gehalt $\geq 0,5$ M.-% in der behandelten Schlacke erzielt (Tabelle 2 und Tabelle 3).

– Schnelle Abkühlung

In den Betriebsversuchen wurde zusätzlich die schnelle Abkühlung der sekundärmetallurgischen Schlacke erprobt. Hierfür wurde die Schlacke auf Stahlplatten abgekippt, um eine möglichst rasche Wärmeabfuhr zu gewährleisten (**Bild 4**). Bei der schnellen Abkühlung erwiesen sich eine vergleichsweise geringe Schlackenmenge, ein rasches Kippen und das Auslaufen der Schlacke in dünnen Schichten als wesentliche Para-

meter für eine erfolgreiche Stabilisierung. Auch eine Staubbildung beim Abkühlen und Umschlagen der Schlacken konnte durch die schnelle Abkühlung vermieden werden. Schichtdicken > 10 cm führten hingegen zu keinem Erfolg. Im Gegensatz zur Stabilisierung mit Konditionierungsmitteln hat die schnelle Abkühlung wirtschaftliche Vorteile, da die Beschaffung von Konditionierungsmitteln und das zusätzliche Handling für die Zugabe entfallen. Darüber hinaus kann die CaO- und MgO-haltige und nicht an Konditionierungsmitteln angereicherte Schlacke als Kalk- oder Dolomitorsatz unmittelbar im Elektroofen recycelt werden. Nachteilig hingegen ist, dass entsprechend große Flächen für ein Ausgießen in dünnen Schichten bereitgestellt werden müssen. Außerdem muss gewährleistet sein, dass Stahlplatten immer

mit ausreichend niedriger Ausgangstemperatur zur Verfügung stehen.

Ausblick

Eine Vermeidung des Zerfalls der sekundärmetallurgischen Schlacken aus der Qualitätsstahlerzeugung durch die Zugabe stabilisierender Elemente, wie Bor, oder durch eine schnelle Abkühlung führt zu einem stückigen Schlackenprodukt, das weitgehend vergleichbare physikalische Eigenschaften aufweist wie die Elektroofenschlacke. Hinsichtlich einer Nutzung analog zur Elektroofenschlacke als Gesteinskörnung in anspruchsvolleren Bereichen des Verkehrswegebbaus sind jedoch gewisse Einschränkungen zu beachten.

Sekundärmetallurgische Schlacken enthalten aus metallurgischen Gründen MgO bis zu 10 M.-%. Dieses MgO liegt zumindest teilweise als Periklas (MgO_{frei}) vor und kann zu einer Beeinträchtigung der Raumbeständigkeit führen. Durch eine stabilisierende Behandlung mit Konditionierungsmitteln oder eine schnelle Abkühlung wird der in der Schlacke enthaltene Periklas nicht abgebaut und folglich auch keine Verbesserung der Raumbeständigkeit erzielt.

Höhere Bor-Zugaben können Auswirkungen auf die Beurteilung der Umweltverträglichkeit der sekundärmetallurgischen Schlacken haben, da im Entwurf für die Mantelverordnung für Bor ein Prüfwert für das Grundwasser von 0,74 mg/l genannt wird [5].

Da bei der Stabilisierung mittels schneller Abkühlung kein Bor genutzt wird, kann ein Recycling der stückigen, schnell abgekühlten Schlacke im Elektroofen erfolgen, ohne dass wesentliche Nachteile für die zu erzeugenden Stahlqualitäten zu befürchten sind. Die Möglichkeiten und die metallurgischen Vorteile eines solchen Recyclings sind bekannt [6].

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 16456 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 Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert, wofür an dieser Stelle gedankt sei.

Literatur

- [1] Elstner, I., Leers, K.-J., Niesel, K.: Untersuchungen zum Dicalciumsilikat-Zerfall von Hüttenschlacken, Tonindustrie-Zeitung 94 (1970), Heft 8, S. 317-331
- [2] Drissen, P., Arlt, K.-J.: Entstehung feinkörniger Pfannenschlacken, Report des Forschungsinstituts 7 (2000) Nr. 2, S. 12-16
- [3] Mudersbach, D., Kühn, M.: Stabilisierung von zerfallsverdächtigen Edel-

stahlschlacken, Report des FEhS-Instituts, 13 (2006) Nr. 2, S.4-5

- [4] Drissen, P., Mudersbach, D.: Stabilisierung sekundärmetallurgischer Schlacken aus der Qualitätsstahlerzeugung, Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 16456, Juni 2012
- [5] Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen und das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem

Material, Bundesumweltministerium, Arbeitsentwurf vom 06.01.2011

- [6] Drissen, P., Kühn, M., Cores, A., Jung, H.-P., Mernitz, J., Richter, F., Veneri, N.: Efficient Utilisation of Raw Materials Used in Secondary Metallurgy as Flux in Steelmaking Furnaces, European Commission – Executive Committee C1, Contract No. 7210-PR-203, Final report 2003

Erzeugung und Nutzung von Produkten aus Eisenhüttenschlacke 2011

Dr.-Ing. Th. Merkel

Die Umfragen des Fachverbands Eisenhüttenschlacken e.V. zur Erzeugung und Nutzung der Produkte aus Eisenhüttenschlacke im Jahr 2011 haben zu den in Tabelle 1 und 2 zusammengestellten Ergebnissen geführt. Sowohl bei der Erzeugung von Hochofenschlacke als auch bei der von Stahlwerksschlacke ist ein leichter Anstieg gegenüber dem Jahr 2010 zu verzeichnen, so dass sich die Produktion wieder fast auf dem Niveau der Jahre 2007/2008 bewegt. Dabei ist allerdings im 2. Halbjahr ein doch merklicher Rückgang im Vergleich zum 1. Halbjahr bemerkbar. Insgesamt wurden 2011 etwa 14 Mio. t Hochofen- und Stahlwerksschlacke produziert.

Betrachtet man die Daten im Einzelnen, ist festzustellen, dass der Anteil der granulierten Hochofenschlacke, des Hüttensands, gegenüber dem Vorjahr angestiegen ist, während die kristallin erstarrte Hochofenstückschlacke in etwas geringerer Menge produziert wurde als im Vorjahr. Der Anteil des Hüttensands an der Gesamtproduktion lag bei fast 85 %. Noch deutlicher angestiegen als die Erzeugung von Hüttensand ist die Menge des zur Herstellung von CEM-II- und CEM-III-Zementen eingesetzten Hüttensands. Somit wurden im vergangenen Jahr fast 0,5 Mio. t mehr für diesen Verwendungszweck genutzt. Da auch der Einsatz der Hochofenstückschlacke als Gesteinskörnung bzw. Baustoffgemisch zur Herstellung von Asphalten, Betonen und Tragschichten ohne Bindemittel um 0,4 Mio. t zugenommen hat, konnte die Menge für eine spätere Nutzung zwischengelagerter Hochofenschlacke deutlich reduziert werden.

Bei den Stahlwerksschlacken hat die Erzeugung sowohl der Schlacken aus der Oxygenstahlerzeugung als auch aus der Elektro-

Erzeugung	Mio. t
Schlacke aus Stahlroheisenerzeugung	7,64
Schlacke aus sonstiger Roheisenerzeugung	0,10
Summe	7,74
davon:	
HS	6,49
HOS	1,25

Nutzung	Mio. t
HOS (Gesteinskörnungen)	0,05
HOS (Baustoffgemische)	1,27
HS zur Zementherstellung	5,84
HS für andere Einsatzgebiete	0,18
Eigenverbrauch der Werke	0,07
Zwischenlager	0,33
Summe	7,74

Tabelle 1: Erzeugung und Nutzung von Hochofenschlacke 2011

Erzeugung	Mio. t
Schlacke aus Oxygenstahlerzeugung	3,45
Schlacke aus Elektrostahlerzeugung	1,77
Schlacke aus Sonderverfahren	0,85
Gesamterzeugung	6,07
Lagerabbau	0,15
Summe	6,22

Nutzung	Mio. t
Metallurg. Kreislaufführung	0,88
Düngemittel	0,48
Baustoffe (Straßenbau, Erdbau, Wasserbau etc.)	3,74
Sonstiges	0,43
Deponie	0,69
Summe	6,22

Tabelle 2: Erzeugung und Nutzung von Stahlwerksschlacke 2011

stahlerzeugung und aus Sonderverfahren zugenommen. Um die unterschiedlichen Nutzungsgebiete bedienen zu können, wurden zusätzlich die in den letzten Jahren aufgebauten Zwischenlager teilweise wieder abgebaut. Die Verteilung auf die Hauptnutzungsgebiete (Verwendung im metallurgischen Kreislauf, als Düngemittel sowie als Baustoff) ist ungefähr gleich geblieben; auf allen diesen Gebieten hat es kleinere Zuwächse gegeben. Zugenommen hat jedoch

leider auch die Menge der auf Deponien abgelagerten Stahlwerksschlacken. Diesen Anteil wieder zu verringern, muss Ziel der Schlackenindustrie in den kommenden Jahren sein. Eine Basis hierfür ist der Ausbau und die Sicherung möglichst hochwertiger Einsatzgebiete. Aufwendige Aufbereitung und Qualitätssicherung sind hierfür genauso Voraussetzung wie die Begleitung durch Forschung und Entwicklung, um neue Nutzungsgebiete zu erschließen.