

# REPORT DES FORSCHUNGSINSTITUTS

**FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT  
EISENHÜTTENSCHLACKEN E. V.**

Bliersheimer Str. 62  
47229 D U I S B U R G  
Telefon: 02065/9945 - 0  
Telefax: 02065/9945 - 10

Dezember 1997

ISSN 0948-4795

4. Jahrgang Nr. 2

## Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz

Prof. Dr.-Ing. J. Geiseler

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) trat am 7.10.1996 in Kraft. Nach etwas mehr als einem Jahr erscheint es angebracht, ein erstes Resümee zu ziehen. Da das umfangreiche untergesetzliche Regelwerk erst kurz vor dem Inkrafttreten des Gesetzes veröffentlicht wurde, stand keine ausreichende Zeit zur Verfügung, sich mit diesen Regelungen vertraut zu machen. Wesentlich schwerer wiegt, daß bis heute zu wichtigen Punkten dieses Gesetzes keine verlässlichen Interpretationen vorliegen.

Für die Stahlindustrie sind unter anderem die Abgrenzung von Produkt und Abfall sowie die Dauer der Abfalleigenschaft von besonderer Bedeutung. Im Laufe dieses Jahres hat es mehrere Interpretationen zum KrW-/AbfG gegeben, allerdings trägt die Vielzahl der Interpretationen zu einer

erheblichen Verunsicherung in den betroffenen Kreisen bei. Immer häufiger kommt es zu einer überzogenen Auslegung des Gesetzes. Eine Ursache besteht darin, daß diese Interpretationen noch zu stark vom Denken im bisherigen Abfallbegriff und zuwenig vom neuen Kreislaufdenken bestimmt werden. Wer die Kreislaufwirtschaft intensivieren will, muß den Kreislaufstoff in den Wirtschaftskreislauf einführen. Dazu sind die Gesetze des Markts und nicht die Regulierungen der Abfallwirtschaft zugrunde zu legen. Deshalb muß die Abfalleigenschaft eines Stoffes mit seiner Aufarbeitung zu einem Produkt mit anforderungsgemäßen Eigenschaften enden, nicht aber erst, wenn er als Rohstoff oder Einsatzstoff genutzt wird.

Zur Abgrenzung von Produkt und Abfall

wurden in verschiedenen Entwürfen zur Interpretation des KrW-/AbfG Kriterien formuliert. Leider gibt es immer noch Stellen, die nicht bereit sind, diese Kriterien konsequent anzuwenden und normgemäße Eishüttenschlacken als Produkte anzuerkennen, wenn diese durch gezielte Maßnahmen bei der Erzeugung gewonnen wurden. Für eine Intensivierung der Kreislaufwirtschaft müssen gemeinsam von Erzeugern, Verarbeitern und Behörden sachgerechte Interpretationen des KrW-/AbfG erarbeitet werden, mit denen das Erreichte gesichert und weitere Absatzmöglichkeiten für Nebenprodukte unter Berücksichtigung der Gesetze des Markts entwickelt werden. Es ist zu hoffen, daß die lang anhaltende Diskussion im kommenden Jahr zu einem vernünftigen Ende gebracht werden kann.

Das bevorstehende Jahresende ist ein willkommener Anlaß, unseren Mitgliedern und Geschäftspartnern für die vertrauensvolle Zusammenarbeit in den zurückliegenden Monaten zu danken. Besonderer Dank gilt all denjenigen, die sich in den Gremien der Gemeinschaftsorganisationen für Eishüttenschlacken engagieren und ihre Ideen und Beiträge zur Lösung anstehender Fragen einbringen.

Die steigende Zahl unserer Leser und die Resonanz auf die verschiedenen Beiträge sind Ausdruck des Interesses an den Ergebnissen unserer Arbeit und gleichzeitig Verpflichtung für uns, den Gedankenaustausch mit unseren Fachkollegen fortzusetzen.

Wir wünschen allen Lesern und ihren Angehörigen

**FROHE WEIHNACHTSTAGE SOWIE GESUNDHEIT  
UND PERSÖNLICHES WOHLERGEHEN FÜR 1998**

Vorstand und Geschäftsführung der Forschungsgemeinschaft Eishüttenschlacken e. V. und des Fachverbands Eishüttenschlacken e. V.

Inhalt	Seite
Kreislaufwirtschafts-/Abfallgesetz J. Geiseler	1
Einfluß einer Verfestigung von Hüttensand auf seine Eigenschaften E. Lang	2
Hüttensandkartei der FEHS A. Ehrenberg	6
HOZ der Festigkeitsklasse 32,5 für Spannbeton mit sofortigem Verbund E. Lang	8
Auslaugeuntersuchungen von Mineralstoffgemischen R. Bialucha und P. Gunkel	8
Großformatige Wasserbausteine aus Stahlwerksschlacken P. Drissen u. M. Kühn	10

# Einfluß einer Verfestigung von Hüttensand auf seine Eigenschaften

Dr.-Ing. E. Lang

## Einleitung

Der relativ konstanten Hüttensanderzeugung steht ein jahreszeitlich bedingter, diskontinuierlicher Bedarf an Hüttensand gegenüber. Dies erfordert eine Lagerung des Hüttensands beim Erzeuger oder Verarbeiter. Eine zeitlich begrenzte Lagerung wird aus Kostengründen sogar angestrebt, weil dabei der Hüttensand (HS) ohne zusätzlichen Energieaufwand weiter entwässert und sich erfahrungsgemäß der Energieaufwand beim Mahlen verringert.

Hüttensande, die bis zu ihrer Weiterverarbeitung zu Hüttenzementen zwischengelagert werden, unterliegen einem Alterungsprozeß. Dieser Prozeß ist, wie langjährige Erfahrungen zeigen, nicht nur eine Funktion der Zeit und der Lagerungsbedingungen, sondern auch vom Hüttensand selbst abhängig. Der Frischzustand des Hüttensands kann wiederum Auswirkungen auf seine Hydraulizität haben, darf aber nicht mit ihr gleichgesetzt werden. In einer früheren Untersuchung wurde ein Prüfverfahren entwickelt, das die Bestimmung des Frischzustands ermöglicht. Für die Beurteilung der Hydraulizität des Hüttensands in Abhängigkeit von der Verfestigung und des Frischzustands fehlen aber noch geeignete Kriterien.

Ziel der Arbeit war es daher, den Einfluß der Verfestigung und des Frischzustands auf die Eigenschaften von Hüttensanden für die Zementherstellung zu untersuchen.

## Untersuchungsprogramm

Für die Untersuchungen wurden je 100 t Hüttensand von fünf verschiedenen Herstellern im Freien ausgelagert. Sofort nach der Auslagerung sowie nach 1, 2, 3, 6 und 9 Monaten wurden die Lager beprobt. Die Proben wurden hinsichtlich der wichtigsten Parameter untersucht: Chemische Zusammensetzung und Glasgehalt, Gehalt an chemisch gebundenem Wasser und Kohlenstoffdioxid, Kornverteilung der aufgemahlene Hüttensande, Mahlbarkeit, Hydraulizität (Festigkeitsentwicklung nach FEhS-Hüttensandkartei und hydraulische Haupt- und Nebenkennzahlen), physikalische Prüfungen der Hochofenzemente und Bestimmung des Frischzustands mittels Stempel-eindringversuch. Die Untersuchungen

erfolgten nach den in der Literatur [1 bis 7] angegebenen Methoden.

## Ergebnisse

### Einfluß der Lagerung auf die chemische Zusammensetzung und den Glasgehalt

Ein Einfluß der Lagerung auf die Hauptbestandteile des Hüttensands ist nicht zu erwarten. Die chemischen Analysen dienten vorrangig dazu, die Homogenität zu kontrollieren, so daß die weiteren Untersuchungen mit vergleichbaren Hüttensanden durchgeführt werden, die sich nur durch ihre Lagerungsdauer unterscheiden.

Durch die Lagerung ist mit einer Erhöhung des Gehalts an gebundenem Wasser, an Kohlenstoffdioxid und aufgrund von Oxidationsvorgängen auch mit einem Ansteigen des  $SO_3$ -Gehalts bei konstanten Gesamtschwefelgehalten zu rechnen. Insgesamt zeigt sich, daß die Hüttensandlager in sich eine hohe Gleichmäßigkeit in der Zusammensetzung aufweisen.

Das erwartete Ansteigen des  $SO_3$ -Gehalts läßt sich nur in der Anfangsphase der Auslagerung nachweisen, im weiteren Verlauf gehen die Gehalte wieder leicht zurück. Aufgrund der insgesamt niedrigen Werte sind bei einer Wiederholstandardabweichung von 0,07 % für die  $SO_3$ -Bestimmung diese Veränderungen aber nicht wesentlich.

Die Veränderung des Gehalts an gebundenem Wasser und an  $CO_2$  ist ein wesentli-

ches Kriterium für die Beurteilung des Frischzustands des Hüttensands. Bild 1 enthält eine Zusammenstellung der Gehalte an gebundenem  $H_2O$  und  $CO_2$  in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer.

Aus Bild 1 geht hervor, daß mit zunehmender Lagerungsdauer die Gehalte an gebundenem  $H_2O$  und  $CO_2$  ansteigen, gewisse Unstetigkeiten sind auf Prüfstreuungen und den Einfluß der Probenahme zurückzuführen. Auffällig sind die höheren Werte der HS 3 und 5, insbesondere nach der 9monatigen Auslagerung.

Der Glasgehalt in deutschen Hüttensanden ist sowohl aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung als auch aufgrund der leistungsfähigen, steuerbaren Granulationseinrichtungen sehr hoch und liegt im Normalbetrieb über 98 %. Im Verlauf der Auslagerung sank der Glasgehalt um maximal 0,6 %. Diese Veränderung ist vernachlässigbar.

### Einfluß der Lagerung auf die Mahlbarkeit

Aus der allgemeinen Zementwerkspraxis ist bekannt, daß sich Hüttensande nach längerer Lagerungsdauer leichter mahlen lassen. Neben diesen empirischen Erfahrungen fehlen allerdings konkrete Meßwerte über die Veränderung der Mahlbarkeit. Die Beurteilung der Mahlbarkeit erfolgte nach dem modifizierten Zeisel-Verfahren [4] anstelle des Zeisel-Tests [5] [6] und anhand der Mahldauer zur Erreichung einer einheitlichen spezifischen Oberfläche.

Auslagerungsdauer in Monaten	HS 1		HS 2		HS 3		HS 4		HS 5	
	$CO_2$	$H_2O$	$CO_2$	$H_2O$	$CO_2$	$H_2O$	$CO_2$	$H_2O$	$CO_2$	$H_2O$
0	0,23	0,14	0,18	0,16	0,53	0,34	0,12	0,14	0,22	0,33
1	0,20	0,17	0,22	0,18	0,71	0,57	0,23	0,11	0,20	0,29
2	0,39	0,24	0,22	0,13	0,63	0,49	0,27	0,09	0,51	0,48
3	0,45	0,31	0,38	0,23	0,66	0,73	0,27	0,15	0,55	0,61
6	0,51	0,28	0,21	0,51	0,77	1,09	0,24	0,18	0,67	0,78
9	0,53	0,33	0,38	0,26	1,24	1,08	0,66	0,23	1,04	1,09

**Bild 1:** Gehalte an Kohlenstoffdioxid und gebundenem Wasser im Hüttensand in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer, Masseanteile in %

Zur Herstellung der Zemente war die Mahlung der ausgelagerten Hüttensande auf eine gleiche Feinheit erforderlich. Dies erfolgte in einer Laborkugelmühle. Sowohl die Einwaagemenge als auch die Mahlkörpergattung wurden konstant gehalten, so daß die Mahldauer zur Erreichung einer gleichen spezifischen Oberfläche ein indirektes Maß für die Mahlbarkeit darstellt. Für die Bestimmung der Hydraulizität (Festigkeitsentwicklung) nach der Hüttensandkartei wurde eine Feinheit von  $4200 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$  angestrebt. Bild 2 zeigt die Mahldauer, die benötigt wurde, um die fünf ausgelagerten Hüttensande jeweils auf die gleiche Feinheit zu mahlen. Da eine Mahlung auf eine exakt gleiche spezifische Oberfläche praktisch nicht zu verwirklichen ist, wurde die Mahldauer auf eine Oberfläche von  $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$  bezogen. Die einzelnen Meßwerte der spezifischen Oberflächen lagen im Rahmen der oben angegebenen maximalen Schwankungsbreite.

Bild 2 verdeutlicht, daß für vier Hüttensande etwa die gleiche Mahldauer benötigt wurde. Für HS 4 ist dagegen eine längere Mahldauer erforderlich, um die gleiche Feinheit einzustellen. Auffällig ist des weiteren, daß die Hüttensande nach dem ersten Auslagerungsmonat etwas schwerer mahlbar sind als die frischen Hüttensande. Diese Werte bleiben bis zur Auslagerungszeit von 9 Monaten auch weitgehend unverändert. Lediglich der HS 4, für den zunächst bis zu 6 Monaten Lagerzeit eine deutlich längere Mahldauer eingestellt werden mußte, erreicht nach 9 Monaten die Mahlbarkeit der übrigen Hüttensande.

Die Durchführung des modifizierten Zeiselverfahrens erwies sich als sehr aufwendig. Teilweise waren über 30 Mahlstufen erforderlich, bis die Schwankungen des Feinanteils  $< 125 \mu\text{m}$  zwischen den geforderten Grenzwerten von 49,3 und 50,6 % lagen. Bestimmt wurden die drei Parameter, die zur Charakterisierung der Mahlbarkeit nach dem modifizierten Verfahren dienen, und zwar die Mahlbarkeitskennzahl, die Mahlbarkeit und der spezifische Arbeitsaufwand. Eine signifikante Abhängigkeit zur Auslagerungsdauer war nicht zu erkennen. Die schlechtere Mahlbarkeit des HS 4 zu Beginn der Auslagerung (s. Bild 2) ist aber auch mit dem modifizierten Zeiselttest erkennbar. Insgesamt sind die Mahlbarkeitsprüfungen mit diesem Verfahren aber als unbefriedigend anzusehen. Auf die Wiedergabe der Ergebnisse wird daher verzichtet.

#### Herstellung und Prüfung von Hochofenzementen mit ausgelagerten Hüttensanden nach FEhS-Hüttensandkartei

Die Hüttensande wurden nach der Probenahme getrocknet und, wie bereits beschrieben, auf eine Feinheit von  $4200 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$  nach Blaine aufgemahlen. Für die Hüttensande 1 bis 3 und 5 wurden weder über die Auslagerungszeit noch im Vergleich der Hüttensande untereinander signifikante Unterschiede in der Kornverteilung festgestellt. Sowohl das Steigungsmaß  $n$  als auch die mittlere Korngröße  $d'$  weichen praktisch nicht voneinander ab. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit der etwa gleichen Mahlbarkeit

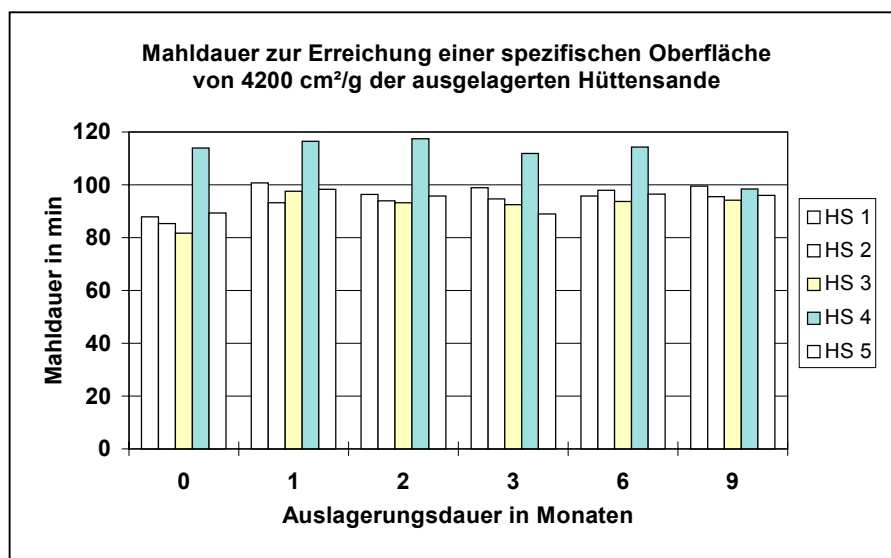
dieser Hüttensande. Bei Einhaltung konstanter Mahlbedingungen werden somit, unabhängig von der Art dieser vier Hüttensande und von der Lagerungsdauer, vergleichbare Kornverteilungen erzielt.

Der HS 4 ist bis zu einer Auslagerung von 6 Monaten schwerer mahlbar als die übrigen Hüttensande, nach 9monatiger Lagerung haben sich die Werte angeglichen. Die Steigungsmaße der bis zu drei Monate ausgelagerten Proben des HS 4 liegen unter denen der übrigen gemahlten Hüttensande. Die etwas flachere Kornverteilung beruht vorrangig auf einem erhöhten Feinanteil, der durch die längere Mahldauer erhalten wird, die zur Erzielung einer gleichen spezifischen Oberfläche notwendig ist.

Die gemahlten Hüttensande wurden mit einem Standardklimkermehl im Verhältnis 60/40 und 75/25 zuzüglich Sulfatträger (Anhydrit/Gips-Gemisch) homogenisiert. Die so erhaltenen Hochofenzemente, die einem CEM III/A bzw. einem CEM III/B entsprechen, wurden bezüglich ihrer Eigenschaften untersucht, um Einflüsse der Lagerungsdauer festzustellen. Im folgenden wird auf einige Besonderheiten hingewiesen.

#### Wasseranspruch und Erstarren

Da sowohl die Blaine-Werte als auch die Rückstände auf den Sieben 0,09 mm und 0,063 mm relativ konstant sind (gleiche Blaine-Werte als Zielvorgabe) ist auch der Wasseranspruch konstant. Ein zusätzlicher Einfluß des Lagerungsalters auf den Wasseranspruch konnte nicht festgestellt werden. Zwischen den fünf untersuchten Hüttensanden bestehen geringe Unterschiede. Während die Zemente mit HS 1 bis 3 einen sehr einheitlichen Wasseranspruch von 28,5 % mit Abweichungen von 0,5 % aufweisen, haben die Zemente mit HS 5 einen Wasseranspruch, der um mindestens 1 % darüber liegt. Die Zemente mit HS 4 haben bis zur Auslagerung von 3 Monaten mit 27 % im Mittel den geringsten Wasseranspruch. Dies läßt sich mit dem niedrigeren Steigungsmaß erklären. Nach 6 und 9 Monaten Auslagerung des HS 4 hatte sich die Mahlbarkeit verändert, und die Steigung der Kornverteilung des aufgemahlten Hüttensands erreichte mit den anderen Hüttensanden vergleichbare Werte. Zwischen den Zementen mit 60 oder 75 % HS bestehen keine wesentlichen Unterschiede bezüglich des Wasseranspruchs.



**Bild 2:** Mahldauer zur Erreichung einer spezifischen Oberfläche von  $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$  in Abhängigkeit von der Auslagerungsdauer für die Hüttensande 1 bis 5

Tendenziell haben die Zemente mit länger ausgelagerten Hüttensanden auch längere Erstarrungszeiten. Die Erstarrungszeiten der Zemente mit 75 % HS sind insgesamt länger als bei den hüttensandärmeren Zementen, dies entspricht den üblichen Erfahrungen.

### Biegezug- und Druckfestigkeiten, dynamischer E-Modul

Die Biegezugfestigkeiten der Zemente 60/40 liegen unabhängig von der Art des Hüttensands und von der Auslagerungsdauer zu den einzelnen Prüfterminen auf einem annähernd gleichen Festigkeitsniveau. Auch die Druckfestigkeiten lassen keinen Zusammenhang zum Auslagerungsalter erkennen. Die Zemente mit HS 5 weisen im Vergleich zu den übrigen 4 Hüttensanden etwas niedrigere Druckfestigkeiten zu allen Prüfterminen auf, während die mit HS 4 insbesondere nach 7 und 28 Tagen Erhärtungsdauer etwas höhere Druckfestigkeiten aufweisen.

Für die Zemente mit dem Hüttensand/Klinker-Verhältnis 75/25 treffen diese Aussagen in gleicher Weise zu, erwartungsgemäß aber auf einem insgesamt etwas niedrigeren Festigkeitsniveau. Der immer wieder diskutierte Abfall der Hydraulizität mit längerer Lagerungsdauer kann anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht bestätigt werden. In Bild 3 sind die minimalen und maximalen Druckfestigkeiten für die Zemente mit einem Hüttensand/Klinker-Verhältnis 75/25 und der Auslagerungsdauer 0 bis 9 Monate angegeben.

Mit zunehmender Druckfestigkeit verringert sich die Prüfstreuung, so daß die relative Spannweite mit höherem Prüfalter

geringer wird. Die Entwicklung des dynamischen Elastizitätsmoduls wird in starkem Maß von der Festigkeitsentwicklung bestimmt. Auch bei diesem Parameter ist kein Einfluß durch die Auslagerung der Hüttensande zu erkennen. Die Bestimmung der hydraulischen Haupt- und Nebenkennzahlen bestätigt die Ergebnisse der Untersuchungen an den Zementen nach FEhS-Hüttensandkartei.

### Stempeleindringversuche

CBR-Körper wurden von allen 5 Hüttensanden zu jedem Probenahmetermin hergestellt und bis 270 Tage gelagert. Unmittelbar nach der Herstellung sowie nach 28, 56, 91, 182 und 270 Tagen wurde die erforderliche Kraft gemessen, die zum Eindringen des Stempels bis auf 2,5 und 5,0 mm notwendig war. Daraus wurde der CBR-Wert in % errechnet. Die Werte bei einer Eindringtiefe von 5,0 mm zeigten die geringeren Streuungen. In den Bildern 4 bis 6 sind daher die CBR-Werte für das Stempeleindringen von 5,0 mm dargestellt. Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen:

- Unmittelbar nach der Herstellung der CBR-Körper betragen die CBR-Werte etwa 20 bis 30 % des Referenzwerts unabhängig von der Art des Hüttensands und auch unabhängig von seinem Alter. Bis zu 28 Tagen, vielfach auch bis zu 56 Tagen bleiben die Werte weitgehend unverändert. Trotz günstiger Bedingungen (Verdichtung unter Zugabe einer definierten Wassermenge und Lagerung bei 100 % r.F.) tritt in diesem Zeitraum keine oder nur eine geringe Verfestigung ein, letzteres z.B. bei der 0-Probe und der jeweils 1 Monat gelagerten Hüttensande 3 und 5.

- Mit zunehmendem Alter der CBR-Körper ist auch mit einer zunehmenden Verfestigung der Hüttensande zu rechnen. Zwischen den einzelnen Hüttensanden zeigen sich teilweise wesentliche Unterschiede. Die Hüttensande 1 und 2 verhalten sich allerdings sehr ähnlich. Dies stimmt auch mit den praktischen Erfahrungen überein. Die CBR-Körper mit diesen beiden Hüttensanden verfestigen sehr stark und auch relativ schnell, der HS 2 noch etwas stärker als HS 1. Dies trifft auch für die längere Zeit ausgelagerten Proben zu. Die 6 und 9 Monate nach der Auslagerung entnommenen Proben dieser beiden Hüttensande haben zwar eine langsamere und auch im Endwert geringere Verfestigung als die bis zu 3 Monate gelagerten Proben, aber mit CBR-Werten um 100 % weisen sie doch noch eine starke Verfestigung auf.
- Der HS 3 verhält sich ähnlich, allerdings auf einem insgesamt deutlich niedrigeren Festigkeitsniveau. Bei diesem HS ist der Einfluß der Auslagerungsdauer (0 bis 9 Monate) auf die Verfestigung der CBR-Körper relativ deutlich ausgeprägt.
- Ein anderes Verhalten zeigt der HS 4 (Bild 3). Die Verfestigung ist nicht nur sehr gering, sondern setzt auch erst sehr spät ein. Die nach 3, 6 und 9 Monaten Auslagerung entnommenen Proben haben auch nach einem Alter der CBR-Körper von 270 Tagen praktisch die gleichen CBR-Werte wie die frisch hergestellten Probekörper.
- Die frischen Proben des HS 5 (gezogen 0 und 1 Monat nach der Auslagerung) verfestigen als CBR-Körper sehr schnell und sehr stark, während die längere Zeit ausgelagerten Proben praktisch keine Verfestigung mehr zeigen.

Während bei den Untersuchungen zur Hydraulizität der Hüttensande in Abhängigkeit vom Auslagerungsalter keine signifikanten Abhängigkeiten festgestellt wurden, zeigt die Verfestigung der Hüttensande im Stempeleindringversuch sowohl in Abhängigkeit vom Auslagerungsalter als auch von der Art des Hüttensands deutliche Unterschiede.

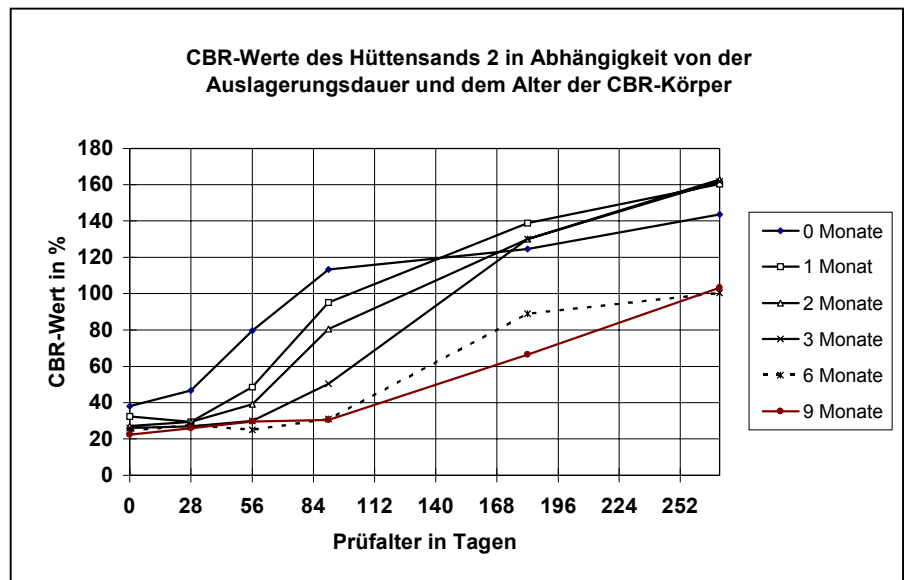
Prüfalter in d	Spannweite der Druckfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>				
	HS 1	HS 2	HS 3	HS 4	HS 5
2	9,2 - 12,4	9,0 - 10,8	6,8 - 9,2	7,3 - 10,0	4,6 - 6,7
7	26,7 - 29,8	27,2 - 28,4	27,7 - 30,8	29,3 - 33,5	21,3 - 24,7
28	39,8 - 42,8	40,0 - 41,0	42,0 - 44,8	42,9 - 45,0	34,9 - 38,7
91	49,0 - 51,2	47,3 - 49,2	49,5 - 52,0	49,3 - 51,7	42,4 - 44,5

**Bild 3:** Spannweite der Druckfestigkeiten für die Zemente mit den bis zu 9 Monaten ausgelagerten Hüttensanden und einem HS/KI-Verhältnis 75/25

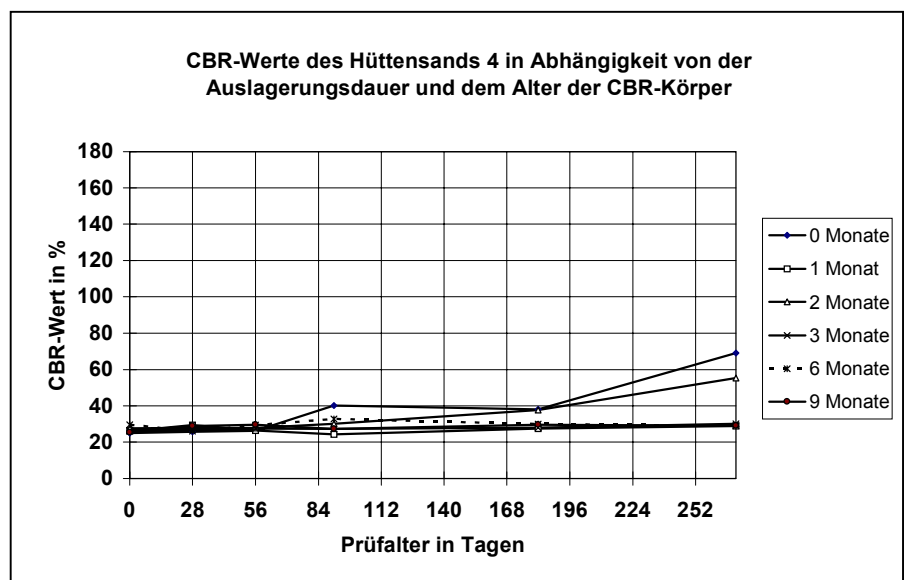
## Zusammenfassung

Die Verfestigung von Hüttensand im Lager ist ein außerordentlich komplexer Vorgang, der durch eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren beeinflusst wird. Die Erfahrungen in der Praxis sind aber teilweise sehr widersprüchlich. In dieser Arbeit wurden je 100 Tonnen von fünf unterschiedlichen Hüttensanden ausgelagert und der Einfluß der Lagerung mit den folgenden Ergebnissen untersucht:

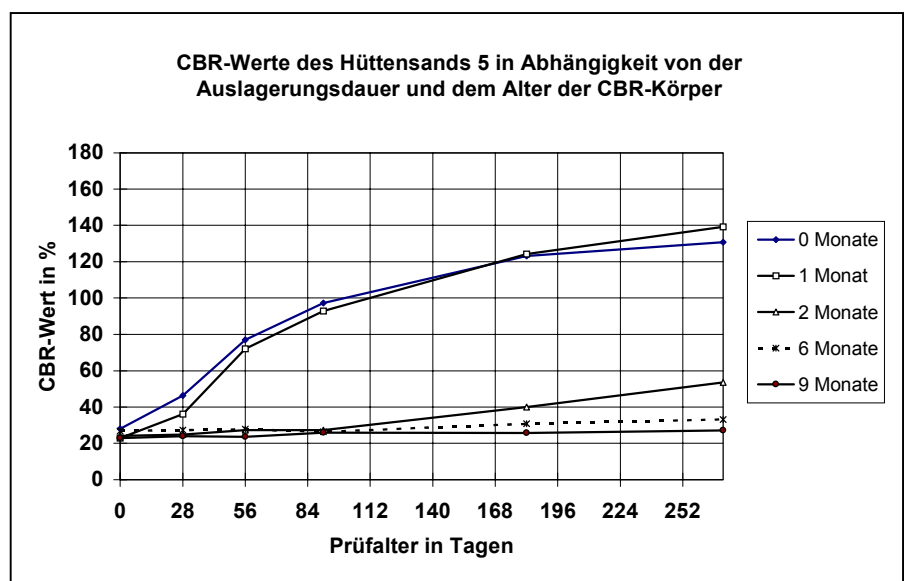
- Der Gehalt an  $\text{CO}_2$  und gebundenem Wasser nimmt mit der Auslagerungsdauer zu, ansonsten bleibt die chemische Zusammensetzung unverändert.
- Der Glasgehalt der Hüttensande bleibt während der Auslagerung nahezu unverändert. Der Rückgang beträgt im Verlauf von 9 Monaten maximal 0,6 %.
- Die Mahlbarkeit (bestimmt mit dem modifizierten Zeiselverfahren und anhand der Mahldauer) bleibt bei vier der fünf ausgelagerten Hüttensande über den Auslagerungszeitraum konstant. Ein HS ist im Vergleich zu den vier anderen Hüttensanden schwerer mahlbar. Dieser HS wird aber nach 2 bzw. 9monatiger Auslagerung leichter mahlbar (je nach Prüfverfahren), während die übrigen Hüttensande sich nahezu nicht verändern. Aufgrund dessen liegen die Mahlbarkeiten der fünf Hüttensande dann auf etwa gleichem Niveau.
- Die Zemente, die unter Verwendung der ausgelagerten Hüttensande hergestellt wurden, besitzen mit zunehmendem Lagerungsalter der Hüttensande längere Erstarrungszeiten. Der Wasseranspruch zur Erzielung der Normsteife bleibt aber konstant. Eine Ausnahme bildet der HS, dessen Mahlbarkeit sich bei längerer Auslagerung verbessert. Bei diesem HS verändert sich trotz gleicher spezifischer Oberfläche das Kornband. Das führt zu einer Zunahme des Wasseranspruchs nach 6- und 9monatiger Auslagerung. Die Kornbänder der übrigen vier untersuchten Hüttensande sind nach der Mahlung in der Kugelmühle unabhängig vom Alter vergleichbar.
- Die Biegezug- und Druckfestigkeit sowie der dynamische E-Modul der Zemente werden durch die Lagerung der Hüttensande bis zu 9 Monaten



**Bild 4:** CBR-Werte des Hüttensands 2



**Bild 5:** CBR-Werte des Hüttensands 4



**Bild 6:** CBR-Werte des Hüttensands 5

unter den gewählten Lagerungsbedingungen praktisch nicht beeinflusst. Die Hydraulizität der Hüttensande bleibt über den Auslagerungszeitraum von 9 Monaten unverändert erhalten. Dies wurde sowohl bei der Prüfung nach FEhS-Hüttensandkartei als auch bei der Bestimmung der hydraulischen Kennzahlen festgestellt.

- Die Stempeldringversuche zeigen signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Hüttensanden im Verfestigungsverhalten auf.

Aus den Untersuchungen kann gefolgert werden, daß die Verdichtung der Hüttensande im Lager im Vergleich zu den übrigen drei Haupteinflussfaktoren (Eigenschaften und Struktur der Schlacke, Körnung und Umwelteinflüsse) einen sehr großen Einfluß auf die Verfestigung hat. Trotz einer Auslagerung von je etwa 100 Tonnen Hüttensand für die Auslagerungsversuche reichte diese Menge anscheinend nicht aus, um ohne zusätzliche Verdichtung im Auslagerungszeitraum von 9 Monaten eine starke Verfestigung zu erreichen und damit signifikante Einflüsse auf die Mahlbarkeit zu erfassen. Aus diesem Grund wird die Auslagerung fortgesetzt.

Bei der Herstellung von CBR-Körpern wurden die Hüttensande unter vergleichbaren Bedingungen verdichtet und gelagert, das heißt, die Einflußfaktoren Umwelt und Verdichtung sind konstant. Dabei zeigt sich ein starker Einfluß der Eigenschaften, Struktur und Körnung des Hüttensands auf die Verfestigung. Die Wichtung, für die einzelnen Faktoren, die für die Hüttensandverfestigung maßgeblich sind, können somit in Abhängigkeit von den Randbedingungen sehr stark schwanken.

Dieses Forschungsvorhaben (AiF-Nr. 10 269) wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert, wofür an dieser Stelle gedankt sei.

#### Literatur

- [1] DIN EN 196: Prüfverfahren für Zement, Teile 1, 2, 3, 6, 7, 21 sowie DIN V ENV 196, Teil 4
- [2] Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau - TP BF-StB, Teil B 7, CBR-Versuch, Ausgabe Juli 1983

- [3] Schiller, B.: Mahlbarkeit der Hauptbestandteile des Zements und ihr Einfluß auf den Energieaufwand beim Mahlen und die Zementeigenschaften Schriftenreihe der Zementindustrie (1992) Heft 54, Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf
- [4] Zeisel, H. G.: Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Mahlbarkeit Schriftenreihe der Zementindustrie (1953) Heft 14, S. 31/72, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf
- [5] Lehmann, H., u. U. Haese: Der Mahlbarkeitsprüfer, ein Gerät zur Untersuchung der Mahleigenschaften harter Stoffe TIZ-Zbl. 79 (1955) Heft 7/8, S. 91/94
- [6] Kühl, H.: Zement-Chemie VEB Verlag Technik Berlin (1958) Band II, S. 699
- [7] Grindo-Sonic Typ MK 42 Firmenschrift und Bedienungsanleitung J.W. Lemmens GmbH (1986)

## Überblick über die "Hüttensandkartei" der FEhS

Dipl.-Ing. A. Ehrenberg

Die "Hüttensandkartei", eine Datensammlung chemischer und mörteltechnischer Kennwerte für Hüttensande unterschiedlichster Herkunft, erfaßt seit 1970 inzwischen mehr als 100 Hüttensande und daraus hergestellte Hochofenzemente mit einem Hüttensand/Klinker-Verhältnis von 60/40 und 75/25. Über Zweck, Aufbau und Fortführung dieser Datensammlung wurde regelmäßig berichtet [1][2]. Zur Beurteilung der Hydraulizität werden die nach DIN EN 196, Teil 1, ermittelten Mörtel-druckfestigkeiten herangezogen. Dabei wird davon ausgegangen, daß unter sonst gleichen Bedingungen Hochofenzemente mit einem Hüttensand höherer Hydraulizität auch höhere Mörtelfestigkeiten liefern.

In der Vergangenheit wurden zahlreiche Versuche unternommen, chemische Kennwerte des Hüttensands mit der Festigkeitsentwicklung der HOZ zu korrelieren [2][3]. Unabhängig davon, ob einzelne Parameter, wie zum Beispiel der  $Al_2O_3$ -Gehalt, oder zusammengefaßte Parameter, wie der F-Wert [4], die einfache  $(CaO/SiO_2)$  oder

die erweiterte Basizität nach DIN 1164, Teil 1  $((CaO+MgO)/SiO_2)$  betrachtet wurden, konnten derartige Zusammenhänge allenfalls für einen eingeschränkten Datensatz zufriedenstellend bestimmt werden. Die Wirkung einzelner chemischer Komponenten des Hüttensands exakt zu beurteilen wird durch die Überlagerung der zahlreichen chemischen und physikalischen Einflußgrößen erschwert. Außerdem kann ohne die Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Hüttensand, Klinker und Sulfatträger, die in gewissen Grenzen die Relation zwischen Hüttensanden höherer und niedrigerer Hydraulizität durchaus umkehren kann, keine zuverlässige Prognose über die Festigkeitsentwicklung eines HOZ mit einem unbekanntem Hüttensand gemacht werden. Dennoch erlauben es die konstanten Randbedingungen (spezifische Oberfläche, Sulfatgehalt, Sulfatträger, Klinker) der "Hüttensandkartei" zumindest, qualitative Aussagen über einen Hüttensand zu treffen und ihn in die Spannweite der vorliegenden Erfahrungen einzuordnen.

Bild 7 gibt einen Überblick über die chemische Zusammensetzung der im Rahmen der "Hüttensandkartei" untersuchten Hüttensande. Bild 8 zeigt die Festigkeitsentwicklung von mehr als 100 Hochofenzementen mit 75 % Hüttensand und einer spezifischen Oberfläche der Hauptbestandteile von  $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Der Sulfatgehalt betrug 4,5 %. Angegeben sind der mittlere, der maximale und der minimale Wert sowie die Standardabweichung. Die Spannweite der erreichten Festigkeiten ist sehr groß. Betrachtet man zum Beispiel die Anfangsfestigkeiten nach 2 Tagen, so reichen die Werte von 3,0 bis  $24,0 \text{ N/mm}^2$ . Auch bei den Festigkeiten nach 91 Tagen ist noch eine Differenz von etwa  $30 \text{ N/mm}^2$  feststellbar ( $32,8$  bis  $65,3 \text{ N/mm}^2$ ).

Zwar lassen sich aus den bisherigen Erfahrungen keine allgemeingültigen "Hydrauleformeln" ableiten, jedoch lassen sich tendenzielle Einflüsse sehr wohl erkennen. So wurden die minimalen Werte bei den Zementen mit 75 % Hüttensand von einem osteuropäischen Hüttensand erzielt, der

einen unterdurchschnittlichen Glasgehalt von 80,2 Vol.-% und mit 6,7 % den niedrigsten Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt sowie mit 1,23 auch den niedrigsten F-Wert innerhalb der "Hüttensandkartei" besaß (vgl. Bild 7). Die maximalen Werte zu den verschiedenen Prüfterminen wurden von Hochofenzementen mit jeweils verschiedenen Hüttensanden erreicht, wobei sich die maximalen 2- und 7-Tage-Festigkeiten mit einem westeuropäischen Hüttensand ergaben, der den maximalen F-Wert von 1,95 aufwies.

Die "Hüttensandkartei" wird auch in Zukunft weitergeführt und beispielsweise Hüttensande einschließen, bei denen einzelne chemische Parameter labor- oder großtechnisch gezielt variiert werden. Durch die Variation einer chemischen Komponente werden zwangsläufig die absoluten Anteile der übrigen Komponenten verändert, auch wenn deren Relation untereinander konstant bleibt.

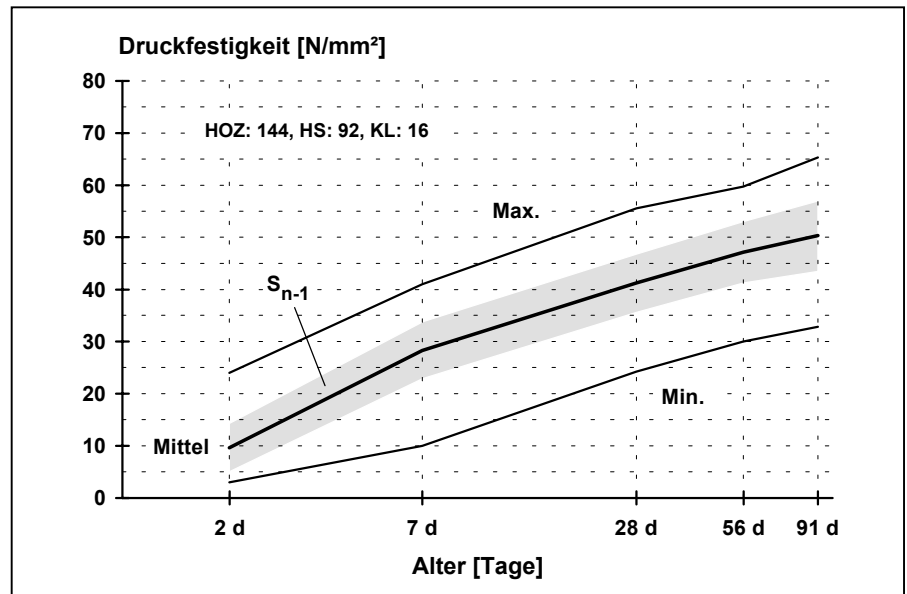
Kennwert		Mittel	Max.	Min.	S <sub>(n-1)</sub>	n
Unl. Rückst.	%	0,43	3,98	0,03	0,53	57
SiO <sub>2</sub>	%	35,56	39,41	30,53	2,05	90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	11,78	17,58	6,71	1,95	90
FeO	%	0,63	2,35	0,12	0,42	90
TiO <sub>2</sub>	%	0,67	3,16	0,16	0,47	86
MnO	%	0,51	1,70	0,07	0,31	89
CaO	%	40,15	45,90	32,10	2,37	90
MgO	%	7,99	17,27	1,67	2,43	90
Na <sub>2</sub> O	%	0,49	1,73	0,13	0,26	76
K <sub>2</sub> O	%	0,68	1,42	0,08	0,24	90
SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	%	0,12	0,70	0,00	0,16	31
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,07	1,51	0,00	0,23	42
S <sup>2-</sup>	%	1,31	2,30	0,58	0,35	86
CO <sub>2</sub>	%	0,16	0,76	0,00	0,17	70
H <sub>2</sub> O	%	0,25	1,23	0,00	0,23	70
Reindichte	g/cm <sup>3</sup>	3,00	2,97	2,80	0,82	53
Glasgehalt	Vol.-%	97,5	100,0	80,2	3,50	65
CaO/SiO <sub>2</sub>	-	1,13	1,35	0,87	0,10	90
$\frac{CaO + MgO}{SiO_2}$	-	1,36	1,57	1,03	0,10	90
F-Wert (Keil) *	-	1,58	1,95	1,23	0,14	90

$$* (CaO + 0,5 \times S^{2-} + 0,5 \times MgO + Al_2O_3) / (SiO_2 + MnO)$$

**Bild 7:** Chemische Zusammensetzung von Hüttensanden

#### Literatur

- [1] Smolczyk, H.-G.: Zum Einfluß der Chemie des Hüttensands auf die Festigkeit von Hochofenzementen Zement-Kalk-Gips 31 (1978) Heft 6, S. 294/96
- [2] Kollo, H., u. J. Geiseler: Beurteilung der Qualität von Hüttensand anhand von Kennwerten Beton-Informationen 27 (1987) Heft 4, S. 48/51
- [3] Kollo, H.: Einfluß der chemischen Zusammensetzung von Hüttensand auf dessen Hydraulizität Beton-Informationen 31 (1991) Heft 2, S. 22/23
- [4] Keil, F.: Hochofenschlacke, 2. Auflage, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf (1963) S. 95 ff



**Bild 8:** Festigkeitsentwicklung von HOZ mit einem HS/KL-Verhältnis von 75/25 (4200 cm<sup>2</sup>/g)

# Hochofenzement der Festigkeitsklasse 32,5 für Spannbeton mit sofortigem Verbund

Dr.-Ing. E. Lang

In der deutschen Norm für Spannbeton DIN 4227 sind für Betone mit sofortigem Verbund von den Hochofenzementen derzeit nur solche der Festigkeitsklasse 42,5 zulässig. Welche Gründe zum Ausschluß der Festigkeitsklasse 32,5 führten, ist heute nicht mehr eindeutig feststellbar.

Der naheliegendste Grund ist die niedrigere Anfangsfestigkeit hüttensandreicher Hochofenzemente. Aufgrund dieser niedrigeren Anfangsfestigkeit sind längere Zeiten für das Aufbringen der Vorspannung im Spannstahl erforderlich, und insofern gab es keinen Bedarf, Hochofenzemente niedrigerer Festigkeitsklassen einzusetzen. Ungeachtet dessen wurde und wird bis heute von einigen Vertretern immer wieder behauptet, daß die mögliche Korrosionsgefahr durch den Sulfidgehalt des Hüttensands die Ausschlußursache ist. Die Festlegung der Festigkeitsklasse wäre somit als eine indirekte Begrenzung des Hüttensandgehalts zu sehen. Diese Ansicht hält sich hartnäckig, obwohl andererseits seit Jahrzehnten bekannt ist, daß aufgrund von Untersuchungen der FEhS, durch einen 1974 vom RILEM veröffentlichten State of Art Report und durch die Normregelungen in anderen Ländern, wie Niederlande, Belgien, Großbritannien, bekannt ist, daß vom Sulfidgehalt des Hüttensands keine korrosionsfördernde Wirkung ausgeht [1 bis 4].

Da inzwischen die sogenannte Besenverankerung dem sofortigen Verbund zugerechnet wird - und das ist durchaus ein Anwendungsgebiet auch für CEM III 32,5 -, und um der zukünftigen europäischen Norm Rechnung zu tragen, die eine Unterscheidung

in sofortigen und nachträglichen Verbund nicht vorsieht, wurde beim Deutschen Ausschuß für Stahlbeton (DAfStB) die Aufhebung der Anwendungsbeschränkung beantragt. Von einem Unterausschuß des DAfStB wurde ein Prüfplan erarbeitet. Das Institut für Bauforschung Aachen (ibac) wurde mit der Bearbeitung dieses Prüfplans durch die FEhS in Kooperation mit dem VDZ beauftragt. Der Unterausschuß des DAfStB hat stellvertretend für alle Hochofenzemente einen CEM III/A 32,5 NW mit Hüttensand aus Österreich und einen CEM III/B 32,5 NW/HS/NA mit Hüttensand des Ruhrgebiets für die Untersuchungen vorgegeben.

Der Prüfplan beinhaltet mehrere unterschiedliche Untersuchungen. Neben der Charakterisierung der verwendeten Zemente und des Spannstahls erfolgten Untersuchungen an ausgepreßten Porenlösungen, Zeitstandversuche an vorgespanntem Spannstahl in Extraktionslösungen der Zemente und Zeitstandversuche an vorgespanntem Spannstahl mit Feinstbetonumhüllung in Extraktionslösungen.

Die Ergebnisse werden noch ausführlich veröffentlicht. An dieser Stelle wird daher nur auf die zusammenfassende Beurteilung des Abschlußberichts hingewiesen: "In den durchgeführten Korrosionsuntersuchungen erfüllten alle Versuche die vorgegebenen Anforderungen. In keinem Fall wurden Anzeichen einer wasserstoffinduzierten Spannungsrißkorrosion festgestellt.

Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen, daß die Verwendung von Hochofenzement mit hohem Hüttensandgehalt in Beton keinen

erkennbaren Einfluß auf eine wasserstoffinduzierte Spannungsrißkorrosion von Spannstählen ausübt" [5].

Damit sind die Voraussetzungen für eine Normenänderung geschaffen.

## Literatur

- [1] Smolczyk, H.-G., u. P. Gunkel: Die Möglichkeiten einer Wasserstoffversprödung von Spannstahl bei Einwirkung von Kohlensäure auf sulfidhaltigen Zementstein  
Werkstoffe und Korrosion 22 (1971) Heft 10, S. 856/63
- [2] Gunkel, P., u. H.-G. Smolczyk: Untersuchung der Reaktionsmöglichkeiten von Sulfiden bei der Einwirkung von Kohlensäure und Sauerstoff auf sulfidhaltigen Zementstein  
Werkstoffe und Korrosion 27 (1976), Heft 5, S. 297/303
- [3] RILEM CRC Committee "Corrosion of Reinforcement in Concrete"  
State of Art Report 1974
- [4] Gunkel, P.: Zur Korrosionsgefährdung von Spannstahl in Beton durch Hochofenzement  
Beton-Informationen 36 (1996) Heft 5, S. 71/79
- [5] Schießl, P., J. Moersch u. P. Schröder: Verwendung von Hochofenzement (CEM III) in Spannbeton mit sofortigem Verbund  
Abschlußbericht F 566, Oktober 1997

## Auslaugeuntersuchungen von Mineralstoffgemischen aus güteüberwachten industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen

Dr.-Ing. R. Bialucha und Dr.-Ing. P. Gunkel

Voraussetzung für die Verwendung von güteüberwachten industriellen Nebenprodukten und Recyclingbaustoffen im Straßenbau ist der Nachweis der Umweltverträglichkeit durch regelmäßige Prüfung der wasserwirtschaftlichen Merkmale im Rahmen der Güteüberwachung. Je nach Bundesland existieren unterschiedliche Prüfvorschriften und Grenzwerte für die Beurteilung der wasserwirtschaftlichen Merkmale. Allen gemeinsam ist jedoch, daß

sich diese Vorschriften bisher ausschließlich auf die "reinen" Mineralstoffe beziehen.

Eine Mischung mehrerer Mineralstoffe kann sehr sinnvoll sein, um die technologischen Eigenschaften des fertigen Gemischs zu verbessern, z. B. im Hinblick auf Verdichtbarkeit oder Standfestigkeit. Weiterhin kann durch die Zugabe des latent hydraulischen Hüttensands erreicht werden, daß

eine Erhärtung des jeweiligen Gemischs eintritt und damit die Tragfähigkeit weiter verbessert wird. Den Mineralstoffen stehen damit breitere Anwendungsgebiete offen.

Neben dieser Verbesserung der technologischen Eigenschaften sind die wasserwirtschaftlichen Auswirkungen solcher Gemische aus verschiedenen Mineralstoffen zu ermitteln. Durch den Zusatz verfestigend wirkender Stoffe, wie z. B. Hüttensand,



kann nicht nur eine Verbesserung der technologischen Eigenschaften erreicht werden, sondern meist auch eine Verringerung der Auslaugbarkeit der Gemische. Kommt es bei der Mischung verschiedener Mineralstoffe nicht zu einer Verfestigung, so ist, zumindest theoretisch, vorstellbar, daß die Auslaugbarkeit erhöht wird, wenn das Eluat einer Komponente des Gemischs auf eine andere Komponente einwirkt. Daher wurden Versuche mit dem Ziel durchgeführt, die Auslaugbarkeit hüttensandhaltiger sowie hüttensandfreier Gemische festzustellen.

Untersucht wurden insgesamt 26 Mineralstoffgemische, bestehend aus jeweils 2 oder 3 der folgenden Ausgangsstoffe: Hochofenschlacke (HOS), Hüttensand (HS), LD-Schlacke (LDS), Elektroofenschlacke aus der Qualitätsstahlerzeugung (EOS), Recyclingbaustoff (RCL), Hausmüllverbrennungsasche (HMVA) und Waschberge (WB). Die Zusammensetzung der erhärtenden Gemische mit Hüttensand, auf die im folgenden näher eingegangen wird, sind in **Bild 9** aufgeführt. Aus diesen Gemischen mit Hüttensand wurden Proctorkörper hergestellt, die 3 bzw. 12 Monate in feuchter Atmosphäre gelagert wurden. Als Auslaugeverfahren für die Ausgangsstoffe, die unverfestigten sowie die erhärteten Gemische (Proctorkörper), wurde das Trogverfahren [1] gewählt. Bisher liegen die Ergebnisse der 3 Monate gelagerten Proctorkörper vor, diejenigen der 12 Monate gelagerten stehen noch aus.

Die Ergebnisse der bisher durchgeführten Versuche zeigen, daß sich die einzelnen Mineralstoffkomponenten hinsichtlich ihres Auslaugeverhaltens kaum gegenseitig beeinflussen. Beispiele hierfür zeigen die **Bilder 10 bis 12**, die zum Vergleich die Grenz- bzw. Richtwerte der Trinkwasserverordnung (TVO) [2] enthalten. In den Fällen, in denen eine gegenseitige Beeinflussung beobachtet wurde, verschoben sich die Werte zum Positiven. So liegen beispielsweise die pH-Werte der unverfestigten Mischung M10 niedriger als die pH-Werte der Ausgangsstoffe. Die bisherigen Ergebnisse lassen den Schluß zu, daß die Eluatwerte eines Mineralstoffgemischs berechnet werden können, wenn die Eluatkonzentrationen der einzelnen Komponenten bekannt sind.

Weiterhin wurde festgestellt, daß durch eine dreimonatige Feuchtlagerung der Gemische mit Hüttensand und die damit verbundene Erhärtung für die meisten Parameter eine sehr deutliche Verringerung der

Bezeichnung	Anteil der Mineralstoffkomponenten in Gew.-%						
	Körnung 0/22 mm						
	HOS	HS	LDS	EOS	RCL	HMVA	WB
M1	80	20					
M2	20	20	60				
M3	60	20	20				
M4		20	80				
M5		20		80			
M6		20			80		
M7		20				80	
M8		20					80
M9		20	20		60		
M10		20	20			60	
M11		20	20				60

**Bild 9:** Zusammensetzung der Mineralstoffgemische mit Hüttensand

		HS	HOS	LDS	M 1		M 2		TVO
					U	V <sub>3</sub>	U	V <sub>3</sub>	
HS	Gew.-%	100			20		20		
HOS	Gew.-%		100		80		20		
LDS	Gew.-%			100			60		
pH		10,3	10,9	11,9	10,7	9,7	12,0	10,3	6,5-9
CSB	mg/l	< 15	132	< 15	94	< 15	30	< 15	5
Al	mg/l	0,5	0,7	2	0,9	< 0,1	1,6	0,2	0,2
Ba	mg/l	0,01	0,33	0,03	0,17	0,01	0,09	0,01	1
S <sub>ges.</sub>	mg/l	19	144	3	115	11	36	9	k.A.
SO <sub>4</sub>	mg/l	24	67	9	66	< 5	21	< 5	240

k.A. = keine Angabe

**Bild 10:** Auslaugbarkeit von HOS bzw. HOS + LDS in Gemischen mit HS (U = unverfestigt, V<sub>3</sub> = 3 Monate verfestigt)

		HS	LDS	EOS	M 4		M 5		TVO
					U	V <sub>3</sub>	U	V <sub>3</sub>	
HS	Gew.-%	100			20		20		
LDS	Gew.-%		100		80				
EOS	Gew.-%			100			80		
pH		10,3	11,9	11,2	11,8	10,1	10,7	9,8	6,5-9
CSB	mg/l	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	5
Al	mg/l	0,5	2,0	2,5	1,6	0,1	1,1	< 0,1	0,2
Ba	mg/l	0,01	0,03	0,08	0,05	< 0,01	0,06	< 0,01	1
Cr	mg/l	< 0,01	< 0,01	0,04	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	0,05
S <sub>es.</sub>	mg/l	19	3	2	< 5	3	4	3	k.A.
SO <sub>4</sub>	mg/l	24	9	9	8	< 5	12	9	240

k.A. = keine Angabe

**Bild 11:** Auslaugbarkeit von LDS und EOS in Gemischen mit HS (U = unverfestigt, V<sub>3</sub> = 3 Monate verfestigt)

Eluatgehalte aus den Mineralstoffgemischen erreicht werden kann. Diese günstige Entwicklung bezüglich der auslaugbaren Gehalte ist zum einen auf die Verringerung der auslaugbaren Oberfläche der Proctorkörper gegenüber dem unverfestigten losen Gemisch zurückzuführen. Zum anderen werden aber auch umweltrelevante Parameter, wie beispielsweise Schwermetalle, in die durch die Reaktion von Hüttensand mit Feuchte neu gebildeten Hydratphasen fest eingebunden.

Dieses Forschungsvorhaben (AiF-Nr. 110 N) wird aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert, wofür an dieser Stelle gedankt sei.

#### Literatur

[1] Bialucha, R., u. G. Spanka: Trogverfahren zur Auslaugung von Mineralstoffen  
Straße + Autobahn 44 (1993) Heft 5, S.297/300

		HS	LDS	HMVA	M 7		M 10		TVO
					U	V <sub>3</sub>	U	V <sub>3</sub>	
HS	Gew.-%	100			20		20		
LDS	Gew.-%		100				20		
HMVA	Gew.-%			100	80		60		
pH		10,3	11,9	10,7	10,0	10,0	9,4	8,9	6,5-9
CSB	mg/l	< 15	< 15	34	< 15	< 15	< 15	< 15	5
Al	mg/l	0,5	2,0	8,2	4,6	0,5	3,5	0,8	0,2
Ba	mg/l	0,01	0,03	0,07	0,05	0,03	0,06	0,02	1
Cr	mg/l	< 0,01	< 0,01	0,03	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,05
Cu	mg/l	< 0,01	< 0,01	0,15	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	3 <sup>1)</sup>
Cl	mg/l	19	3	93	< 5	< 5	7	7	250
SO <sub>4</sub>	mg/l	24	9	354	214	8	115	36	240

<sup>1)</sup> Kein Grenz-, sondern ein Richtwert

**Bild 12:** Auslaugbarkeit von HMVA bzw. HMVA + LDS in Gemischen mit HS (U = unverfestigt, V<sub>3</sub> = 3 Monate verfestigt)

[2] Verordnung über Trinkwasser und Wasser für Lebensmittelbetriebe (Trinkwasserverordnung - TVO) vom 12.12.1990  
Bundesgesetzblatt (1990) S. 2613/29

## Gezielte Herstellung großformatiger Wasserbausteine aus Stahlwerksschlacken

Dr.-Ing. P. Drissen und Dr.-Ing. M. Kühn

Wasserbausteine müssen hohen Anforderungen hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften genügen, die in den "Technischen Lieferbedingungen für Wasserbausteine -TLW", Ausgabe 1997 [1] festgelegt sind. Insbesondere an die Größe und die Dichte der Wasserbausteine werden hohe Anforderungen gestellt, da sie der Strömung und dem Wellenschlag einen ausreichenden Widerstand entgegensetzen müssen.

Stahlwerksschlacken sind aufgrund ihrer hohen Dichte für den Einsatz als Wasserbausteine besonders gut geeignet. Oftmals stehen diesem Einsatzgebiet jedoch die nicht ausreichende Raumbeständigkeit und die geringe Korngröße entgegen.

In einem Forschungsauftrag wurden daher von der FEhS Verfahren entwickelt, um gezielt Stahlwerksschlacken für den Wasserbau zu erzeugen, die eine ausreichende Raumbeständigkeit besitzen, den Anforderungen der TLW entsprechen und zu einem hohen Prozentsatz in Körnungen > 100 mm erzeugt werden können.

Ursachen für die ungenügende Raumbeständigkeit von Stahlwerksschlacken sind die verfahrensbedingten Gehalte an freiem CaO und teilweise auch freiem MgO. Dabei kommt dem freien CaO in LD-Schlacken eine große Bedeutung zu. Zur Erzeugung von LD-Schlacken mit ausreichender Raumbeständigkeit muß das freie CaO möglichst weitgehend abgebaut werden. Dies wurde bisher durch eine intensive Bewitterung über lange Zeiträume sichergestellt. Nachteilig bei der Bewitterung ist, daß der ohnehin begrenzte Anteil großer Schlackensteine durch die Hydratation von freiem CaO weiter verringert wird. Die Schlacken müssen daher nach der Bewitterung erneut abgesiebt werden. Der entstehende Feinanteil läßt sich zudem nur schwer vermarkten.

Aus diesem Grund wurde ein Verfahren zur Absenkung des Freikalkgehalts durch eine Behandlung der flüssigen LD-Schlacken entwickelt. Zunächst wurden in Laborversuchen die Grundlagen für eine Behandlung der flüssigen Schlacken erarbeitet. Bei Zugabe von Quarzsand zur flüssigen LD-Schlacke reagiert dieser mit dem in der Schlacke enthaltenen freien Kalk, und die

CaO/SiO<sub>2</sub>-Basizität wird herabgesetzt. Bei der Abkühlung werden infolgedessen vermehrt stabile Kalksilikate ausgeschieden. Es zeigte sich jedoch, daß eine ausschließliche Zugabe von Quarzsand nicht zu dem gewünschten Resultat führt. Der Wärmeinhalt der flüssigen Schlacken ist nicht groß genug, um eine ausreichende Menge Quarzsand zu lösen. Wird jedoch der Quarzsand mit Sauerstoff eingeblasen, liefert die Oxidation des in der Schlacke gelösten Eisens ausreichende Wärmemengen, um genügend Quarzsand zu lösen. Gleichzeitig bewirkt die Wärmeentwicklung eine Verflüssigung der Schlacken und dadurch eine Verbesserung der Reaktionskinetik. Die entstehenden Eisenoxide können weiteren Freikalk als Calciumferrite binden.

Die Durchführbarkeit dieses Verfahrens wurde in Betriebsversuchen überprüft. Erste Versuche zur Behandlung der Schlacken im Konverter durch Zusatz von Quarzsand mußten abgebrochen werden, da der Verschleiß an Feuerfestmaterial stark zunahm und die Taktzeiten deutlich verlängert wurden. Die Schlackenbehandlung wurde daher aus dem Konverter in die Schlackenpfanne verlegt. Die Zugabe von

Quarzsand während des Abstichs in die Schlackenpfanne erbrachte jedoch noch keine ausreichende Durchmischung und folglich keine ausreichende Abbindung des Freikalks. Erst das Einblasen von Quarzsand in die Schlackenpfanne mit Sauerstoff als Trägergas führte zum gewünschten Erfolg. Durch die Behandlung der Schlacke außerhalb des Konverters werden darüber hinaus nachteilige Einflüsse auf die Stahlqualität vermieden. Das Vorgehen und die ablaufenden Reaktionen sind schematisch in **Bild 13** dargestellt.

Die positiven Ergebnisse führten schließlich zum Bau einer Behandlungsanlage, mit der die gesamte Schlackenerzeugung eines Konverters behandelt werden kann.

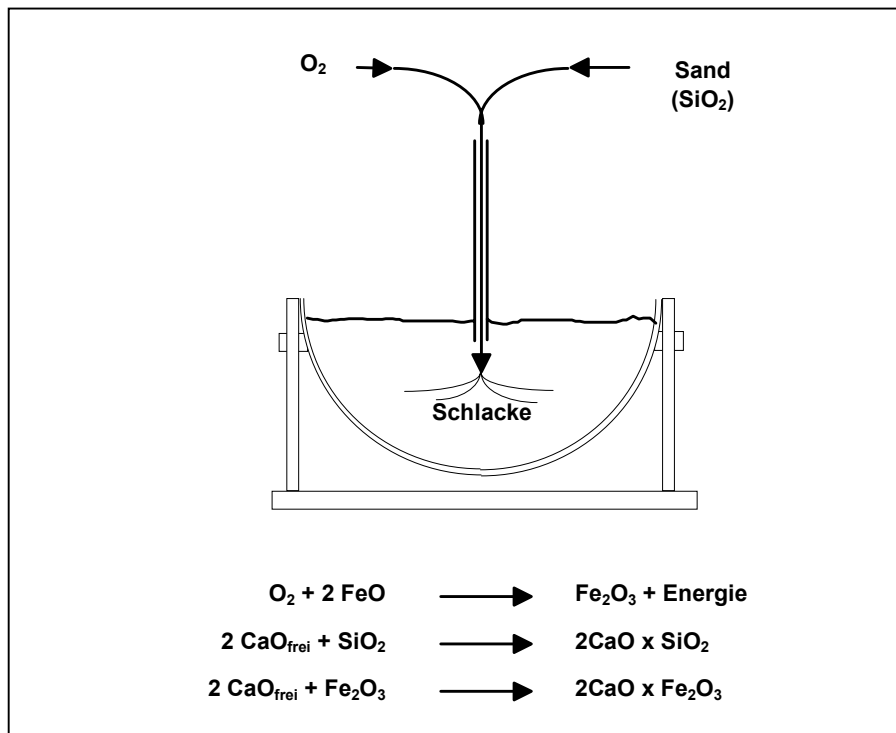
Nach der Optimierung der Anlagen- und Verfahrenstechnik können inzwischen LD-Schlacken mit einer maximalen Basizität  $\text{CaO/SiO}_2 = 5,5$  problemlos behandelt werden. Schlacken mit höheren Basizitäten sind im allgemeinen zu zähflüssig, um eine erfolgreiche Behandlung durchführen zu können. Durch die Behandlung wird die Basizität auf Werte  $< 3$  abgesenkt. Freikalkgehalte  $< 2$  Gew.-% können sicher eingestellt werden; meist werden sogar Werte  $< 1$  Gew.-% erzielt. Mittelwerte der Basizität und des Freikalkgehalts nach der Behandlung aus mehreren Versuchsserien sind in **Bild 14** aufgelistet.

Diese Schlacken zeichnen sich durch eine gute Raumbeständigkeit aus. Die Volumenzunahme derartiger Schlacken liegt deutlich unter 1 Vol.-%, wie **Bild 15** zeigt.

Da mit dem beschriebenen Verfahren raumbeständige LD-Schlacken gezielt hergestellt werden können, wurde in einem zweiten Abschnitt der Betriebsversuche eine spezielle Beettechnik mit dem Ziel entwickelt, den Anteil der Schlackensteine  $> 100$  mm bei der Aufbereitung zu steigern.

Aufgrund der erzielten Untersuchungsergebnisse wird deutlich, daß die gesteuerte Abkühlung der Schlacke im Beet entscheidend für die Ausbildung großformatiger Schlackensteine ist. Durch diese Beettechnik wird der Kornanteil  $> 65$  mm von 18 % bei unbehandelten LD-Schlacken auf etwa 40 % bei behandelten Schlacken, die nach der modifizierten Beettechnik gekippt werden, gesteigert. Diese LD-

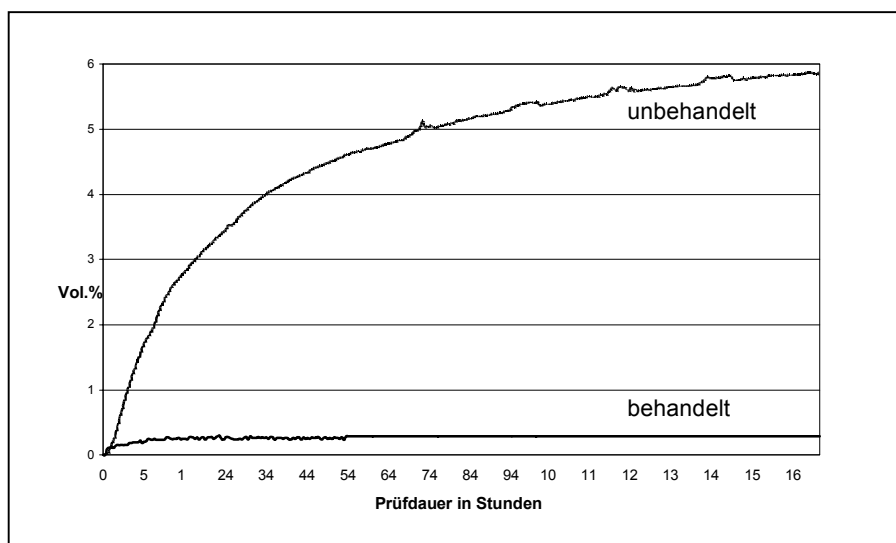
Schlacken zeichnen sich durch eine hohe Raumbeständigkeit aus und entsprechen in



**Bild 13:** Schema der Schlackenbehandlung

Nummer	Basizität $\text{CaO/SiO}_2$			Freikalkgehalt Beetprobe	Anzahl behandelte Schlackenpfannen
	vor Behandlung (berechnet)	nach Behandlung (berechnet)	Probe Schlackenbeet		
1	4,1	2,5	2,3	1,0	19
2	4,3	2,5	2,2	1,1	48
3	4,4	2,8	2,3	1,3	52
4	4,7	2,6	2,9	1,2	34
5	4,8	2,5	1,8	1,4	70
Gesamt					223

**Bild 14:** Einfluß der Behandlung auf Basizität und Freikalkgehalt



**Bild 15:** Volumenzunahme unbehandelter und behandelte LD-Schlacken

allen Punkten den Anforderungen der TLW [1].

Wie die Angaben in **Bild 16** zeigen, sind die technischen und umweltrelevanten Eigenschaften der behandelten Schlacken vergleichbar, teilweise sogar besser als die der klassischen Straßen- und Wasserbaumaterialien Granit und Basalt.

Mit dem beschriebenen Verfahren ist es möglich, Stahlwerksschlacken mit sehr guter Raumbeständigkeit und guten technischen Kennwerten gezielt zu erzeugen. Etwa 40 % der gesamten Schlackenerzeugung eines Konverters können mit diesem Verfahren zu Wasserbausteinen, vorwiegend der Größenklassen 0 und I nach TLW, verarbeitet werden. Aber auch die Schlacken mit Korngrößen < 65 mm können als Wasserbausteine der Klassen A und 0 nach Merkblatt Nr. 7 des Landesumweltamts Nordrhein-Westfalen [5] sowie für hochwertige Verwendungsgebiete im Straßenbau eingesetzt werden. Die Untersuchungen werden mit dem Ziel fortgesetzt, diese Schlacken als Zuschlag für Beton einzusetzen. Ferner werden auch andere Schlackenarten in die Untersuchungen einbezogen.

Dieses Forschungsvorhaben (AiF-Nr. 10 270) wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert, wofür an dieser Stelle gedankt sei.

#### Literatur

- [1] Technische Lieferbedingungen für Wasserbausteine - TLW (1997)  
Bundesministerium für Verkehr, Bonn
- [2] Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau - TL Min-StB  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

Merkmal	Einheit	behandelte LD-Schlacken	Basalt	Granit	Anforderungen im	
					Wasserbau <sup>1)</sup>	Straßenbau
Schlagversuch 8/11 mm	Gew.-%	15 - 20	9 - 20	12 - 27	-	< 18 <sup>2)</sup> < 22 <sup>3)</sup> < 26 <sup>4)</sup>
Polished stone value (PSV)		54 - 57	45 - 56	45 - 58	-	-
Druckfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	> 130	> 250	> 160	> 80	-
Wasseraufnahme	Gew.-%	0,3 - 0,9	< 0,5	0,3 - 1,2	< 0,5	≤ 0,5
Absplitterung im Frost-Tau-Versuch	Gew.-%	< 0,3	< 0,8	0,8 - 2,0	< 0,5	≤ 3,0
ΔV im Dampfversuch (24 h)	Vol.-%	< 1 - < 3	n.b.	n.b.	-	< 5,0 <sup>4)</sup>
Rohdichte	g/cm <sup>3</sup>	> 3,2	~ 2,95	~ 2,70	> 2,3	-
Schüttdichte	g/cm <sup>3</sup>	1,5 - 1,6			-	-
Umweltverträglichkeit					4)	3)
pH-Wert		10,5 - 12	-	-	≤ 11,5	10 - 13
elektr. Leitfähigkeit	mS/m	< 100	-	-	≤ 100	≤ 500
Chrom	mg/l	< 0,01 (Cr <sub>ges.</sub> )	-	-	≤ 0,02 (Cr <sub>ges.</sub> )	≤ 0,02 (Cr <sup>VI</sup> )
				<sup>2)</sup> Deck-schicht	<sup>3)</sup> Binder-schicht	<sup>4)</sup> Trag-schicht

**Bild 16:** Technische Eigenschaften von behandelten LD-Schlacken und Naturgesteinen (nach TLW<sup>1)</sup> [1] und TL Min-StB [2], ZTV Asphalt-StB <sup>2) 3)</sup> [3], TL SWS-StB <sup>4)</sup> [4])

- [3] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt - ZTV Asphalt-StB  
Bundesministerium für Verkehr, Bonn
- [4] Technische Lieferbedingungen für Stahlwerksschlacken im Straßenbau - TL SWS-StB  
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- [5] Anforderungen an die Verwendung von Stahlwerksschlacken im Wasserbau  
Merkblätter des Landesumweltamts Nordrhein-Westfalen Nr. 7 (1996)