



Institut für Werkstoffe des Bauwesens
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Eisenhüttenschlacken und Hüttensand

Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel

Herbsttrimester 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Eisenhüttenschlacke und Hüttensand	5
2.1	Einleitung	5
2.2	Gewinnung [Lit 13]	5
2.3	Marktbedeutung	8
2.4	Zusammensetzung [Lit 26]	10
2.4.1	Hochofenstückschlacke (HOS)	10
2.4.2	Stahlwerksschlacke (SWS)	12
2.5	Umwelttechnische Parameter	14
2.5.1	Hochofenstückschlacke (HOS)	14
2.5.2	Stahlwerksschlacke (SWS)	15
2.6	Bautechnische Eigenschaften und Anforderungen	17
2.6.1	Hochofenstückschlacke (HOS)	17
2.6.2	Stahlwerksschlacke (SWS)	18
2.7	Einsatzgebiete	19
2.8	Hüttensand	24
2.8.1	Herstellung	24
2.8.2	Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff Typ II [Lit 11, Lit 17]	26
2.8.3	Herstellung von Hochofenzement	27
2.8.4	Hüttensandhaltige Zemente	29
2.8.5	Eigenschaften und Einflüsse	31
2.9	Sonstige Metallschlacken	38
2.9.1	Schlacke aus der Kupfererzeugung (CuS)	38
2.9.2	Gießereirestsand (GRS)	44

2.9.3	Gießerei-Kupolofenstückschlacke (GKOS)	47
3	Literatur	49

1 Einleitung

In vielen Industrien fallen bei der Herstellung neben den eigentlichen Produkten Stoffe an, die oftmals teuer entsorgt werden müssen. Schon früh wurde erkannt, dass sich diese Nebenprodukte zum Teil durchaus für andere Zwecke nutzen und somit kommerziell verwerten lassen. Ein weites und schon sehr früh betretenes Feld stellt hier die Verwertung der bei der Stahlerzeugung anfallenden Schlacken dar.

Die anfangs vornehmlich finanziell motivierte Nutzung aller in der Produktion anfallenden Stoffe wird seit 1994 durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz auch politisch gefordert. Ziel dieses Gesetzes ist es unter anderem, das Entstehen von Abfällen zu vermeiden. Dies gelingt durch den Aufbau eines Stoffkreislaufes mit möglichst geringen Verlustmengen (Abfall). In der Folge der politischen Entwicklungen wurden von der Industrie vermehrt Anstrengungen unternommen, aus dem ursprünglichen Abfall Nebenprodukte zu generieren.

Der nächste Schritt besteht konsequenterweise darin, bereits im Einsatz befindliche Materialien nach dem Ende ihrer Nutzungsdauer einem erneuten Einsatz zuzuführen. Hierfür bietet sich der Bau als ein ideales Einsatzgebiet an, weil dort größere Quantitäten benötigt werden. Der daraus entstandene Gedanke des Baustoffrecyclings greift inzwischen nicht erst zum Zeitpunkt des Abbruchs eines Bauwerks oder Bauteils. Er wirkt sich vielmehr zunehmend auf die Planung von Gebäuden aus. Eine für das Recycling günstige Konstruktion, die ein sortenreines Trennen gestattet, wird in Zukunft über die Wirtschaftlichkeit und vielleicht einmal sogar über die Genehmigungsfähigkeit von Bauwerken entscheiden.

Der Einsatz von Nebenprodukten und Recyclaten ist ein wichtiger Betrag der Bauindustrie zum Umweltschutz. Es wird sowohl Deponieraum gespart als auch vorhandene Ressourcen geschont.

Das vorliegende Vorlesungsskript wurde auf Basis der in der Literatur aufgeführten Unterlagen erstellt. Es zeigt die Vielfalt der aus industriellen Nebenprodukten und Recyclaten hergestellten Baustoffe auf. Beleuchtet werden deren Herstellung, Zusammensetzung, Eigenschaften und Einsatzgebiete.

2 Eisenhüttenschlacke und Hüttensand

2.1 Einleitung

Die Nutzung der Eisenhüttenschlacken hat bereits eine lange Tradition. Erste Hinweise finden sich bereits im Altertum. Der wesentliche Anwendungsbereich war und ist das Bauwesen. So schrieb Friedrich Accum 1826 in seinem Buch über die physische und chemische Beschaffenheit der Baumaterialien: "Schlacken, oder die geschmolzenen erdigen oder glasartigen Massen, welche sich in verschiedenen Hüttenwerken, besonders bei der Verschmelzung der Eisenerze, erzeugen, werden, wo sie wohlfeil genug zu haben sind, als Baustein über und unter der Erde benutzt, weil sie in der Regel sehr dauerhaft sind." [Lit 14].

Am 17. Oktober 1861 wurden auf Veranlassung des Generaldirektors der Friedrich-Wilhelmshütte in Troisdorf, Emil Langen, verschiedene Mörtelproben hergestellt. Unter anderem enthielten diese Mörtel körnige oder gemahlene "Hohofenschlacke, nach einem besonderen Verfahren des Herrn Langen präpariert". Dieses Verfahren bestand aus dem Abschrecken der flüssigen Schlacke mit Wasser, die so zu einem glasigen Granulat, dem Hüttensand, zerteilt wurde. Am 12. März 1862 begutachtete eine Kommission Sachverständiger die an Luft und im Erdreich gelagerten Probewürfel und kam zu dem Schluss, dass die "präparierte Hohofenschlacke sowohl für Luft-, wie Wasserbauten ein äußerst schätzbares Material bietet, welches bei sehr geringem Kalkzusatze einen außergewöhnlich festen Mörtel liefert".

Seit 1865 wurde Hüttensand zur Herstellung von Mauersteinen und seit 1879 zur Herstellung von Zement verwendet. Damit begann eine Entwicklung, die 1909 zur Normung des Eisenportlandzements mit maximal 30 % Hüttensand und 1917 des Hochofenzements mit maximal 85 % Hüttensand führte. Heute, 140 Jahre nachdem Emil Langen die Hydraulizität der granulierten Hochofenschlacke erkannte, haben hüttensandhaltige Zemente, die nach der europäischen Zementnorm maximal 95 % Hüttensand enthalten können, in Deutschland einen Marktanteil von ca. 30 % erreicht [Lit 10]. Der Einsatz der Hochofenschlacke als Hüttensand im Zement ist heutzutage das wichtigste Einsatzgebiet.

2.2 Gewinnung [Lit 14]

Unter Eisenhüttenschlacken versteht man die bei der Produktion von Roheisen und Stahl entstehenden nichtmetallischen Schmelzen (Bild 1). Nach ihrer langsamen Abkühlung an Luft liegen sie als ein künstliches, kristallines Gestein vor. Ihre Entstehung entspricht somit der natürlicher magmatischer Gesteine wie Basalt oder Granit. Schlacken übernehmen wichtige metallurgische Aufgaben und unterscheiden sich daher grundsätzlich von den Aschen, den Rückständen aus Verbrennungsprozessen.

Zu Beginn der Eisenerzverhüttung mussten Schlacken durch "Schlagen" vom Metall getrennt werden. Davon leitet sich der Begriff "Schlacke" ab. Heute entstehen Schlacken im Schmelzfluss, werden durch ihre geringere Dichte vom Metall getrennt und durch verschiedene Maßnahmen bei der Abkühlung und der anschließenden Aufbereitung in ihren Eigenschaften zielgerichtet beeinflusst.

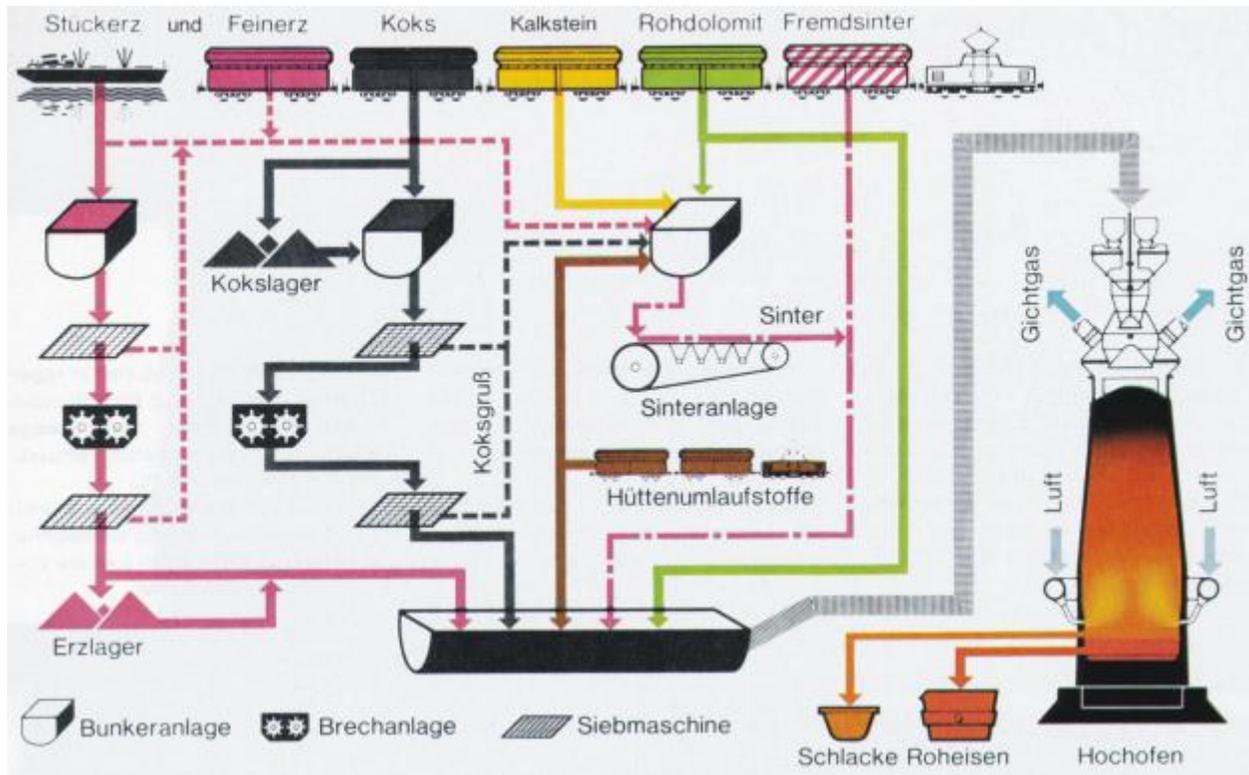


Bild 1: Ablaufschema der Roheisenherstellung [Lit 3]

Nach ihrem Ursprung werden die verschiedenen Schlacken unterschieden:

- Die **Hochofenschlacke** entsteht als Gesteinsschmelze bei ca. 1500 °C während des Reduktionsprozesses im Hochofen aus den Begleitmineralen des Eisenerzes und den als Zuschlag verwendeten Schlackenbildnern, wie Kalkstein oder Dolomit. Im Laufe der Jahre wurde eine Vielzahl von Verarbeitungsverfahren entwickelt. Hiervon kommen heute nur noch die langsame Abkühlung in Beeten zu kristalliner Hochofenstückschlacke (HOS) und die schnelle Abkühlung mit Wasser bzw. Luft zu glasigem Hüttsand (HS) zur Anwendung.
- Die **Stahlwerksschlacke** entsteht ebenfalls als Gesteinsschmelze bei etwa 1650 °C während der Verarbeitung von Roheisen, Eisenschwamm oder Schrott zu Stahl. Sie bildet sich aus den oxidierten Begleitelementen des Roheisens und anderer metallischer Einsatzstoffe sowie dem zur Schlackenbildung zugesetzten Kalk oder gebrannten Dolomit. Je nach Stahlerzeugungsverfahren unterscheidet man LD-Schlacken (LDS) aus dem Konverterprozess nach dem Linz-Donawitz-Verfahren, Siemens-Martin-Schlacken oder Elektroofenschlacken (EOS) aus dem Elektrolichtbogenprozess. LDS und EOS charakterisieren hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Eigenschaften die heute produzierten Stahlwerksschlacken aus der Erzeugung von Massen- und Qualitätsstählen. Die Schlacke wird entweder in Beeten langsam abgekühlt (Bild 2) und anschließend bewittert, um das Reaktionspotenzial des freien Kalks abzubauen. Oder der flüssigen Schlacke wird Sauerstoff und Quarzsand zugegeben, wodurch der Kalk gebunden wird, sodass die Bewitterung nach der langsamen Abkühlung entfällt. In einigen Bundesländern wurden vor 1991 Stahlwerksschlacken geordnet gelagert. Sie werden als Stahlwerkslagerschlacken bezeichnet.

- An die Rohstahlerzeugung kann sich eine weitere Verfahrensstufe anschließen, um die Anforderungen an die Stahlqualität zu erfüllen. In dieser Stufe entsteht die **Sekundärmetallurgische Schlacke (SEKS)**.
- **Metallhüttenschlacken** werden bei der Gewinnung von NE-Metallen gebildet.



Bild 2: Abguss von Stahlwerksschlacke ins Beet [Lit 14]

Hochofenstückschlacke, Hüttensand, Stahlwerks- und andere Schlacken unterscheiden sich hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung. Ihre chemischen Hauptbestandteile sind

- CaO ,
- SiO_2 ,
- Al_2O_3 ,
- MgO und
- Fe_2O_3 .

Durch unterschiedliche Wärmebehandlung (Abkühlung) können die physikalischen Eigenschaften und die Korngrößen der jeweiligen Produkte so beeinflusst werden, dass sie für sehr unterschiedliche Anwendungsbereiche geeignet sind.

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts hat sich der Stahlherstellungsprozess entscheidend verändert. Damit ging natürlich auch ein Wandel in der Erzeugung von Schlacken einher. So wurde die spezifische Schlackenmenge bei der Erzeugung von Roheisen in den letzten 50 Jahren von 1 Tonne Schlacke/Tonne Roheisen auf 250 kg Schlacke/Tonne Roheisen gesenkt. Eine weitere Reduktion des Schlackenanfalls ist aus verfahrens- und produktionstechnischen Gründen praktisch kaum mehr möglich.

Bei den Stahlwerksschlacken wurde die spezifische Menge von 200 auf 120 kg/Tonne Rohstahl vermindert [Lit 27]. Die chemische Zusammensetzung der Schlacke ist stark vom jeweiligen Stahlerzeugungsverfahren, den Zuschlagstoffen, etc. abhängig. Im Wesentlichen unterscheidet sie sich im Kalk-, Phosphat-, Silikat- und Eisenanteil [Lit 15]. Bild 3 vermittelt einen Eindruck von der für ein integriertes Hüttenwerk charakteristischen Reststoff- und Abfallbilanz. Die anfallenden Mengen sind abhängig von den spezifischen Einsatzstoffen und Prozessfahrweisen.

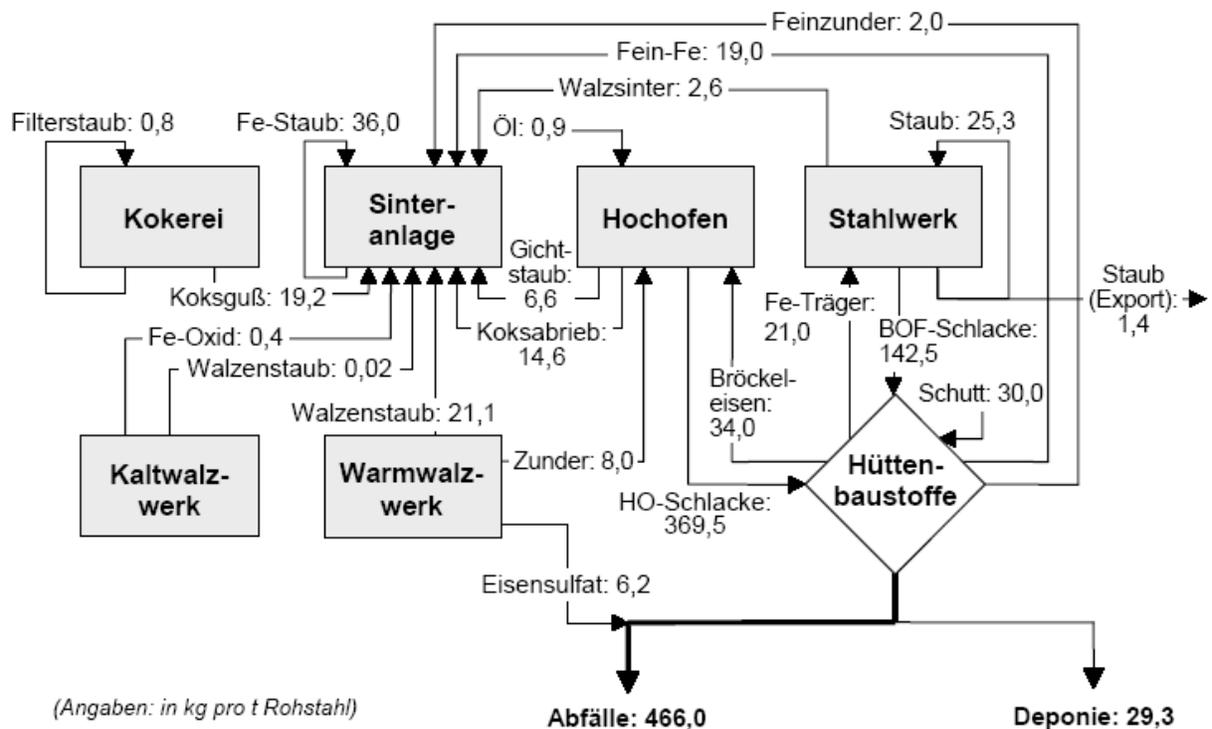


Bild 3: Charakteristische Reststoff- und Abfallbilanz eines integrierten Hüttenwerkes [Lit 23]

2.3 Marktbedeutung

Im Jahr 2003 wurden 13,25 Millionen Tonnen Hochofen- und Stahlwerksschlacken produziert. Bild 4 zeigt, in welchen Bereichen bzw. bei welchen Verfahren die einzelnen Teilmengen anfallen. Die anfallenden Schlacken werden zu etwa 94 Prozent im Bauwesen und als Düngemittel verwendet. 6 Prozent mussten im Jahr 2003 noch deponiert werden, da sie aufgrund ihrer Feinkörnigkeit die im Bauwesen geforderten Eigenschaften nicht aufwiesen. 48 Prozent wurden im Verkehrsbau, also im Straßen-, Wege- und Erdbau eingesetzt. 36 Prozent der gesamten Eisenhütten Schlacken (das entspricht 66 Prozent aller Hochofenschlacken) werden als Hütten sand für die Herstellung von hütten sandhaltigen Zementen genutzt. 6 Prozent, dies sind ausschließlich Stahlwerksschlacken, werden als Kreislaufstoffe in den metallurgischen Prozess zurückgeführt. Der Absatz von Düngemitteln ist infolge der Einstellung der Thomasstahlerzeugung zwar bundesweit auf 3 Prozent gesunken, hat aber regional, zum Beispiel im Umfeld der Stahlwerke in Nordrhein-Westfalen, nach wie vor eine beträchtliche Bedeutung [Lit 26]. Bild 5 zeigt, wie sich die Erzeugung und die Nutzung der Schlacken aus der Eisen- und Stahlherstellung seit 1982 entwickelt haben [Lit 34].

Bereits seit einer Reihe von Jahren liegt der Anteil des schnell abgekühlten, glasig erstarrten Hütten sands bei etwa 70 % der Gesamtmenge der Hochofenschlacke. Hauptabsatzgebiet des Hütten sands ist die Zementindustrie (siehe Kapitel 2.8), während die kristallin erstarrte Hochofenstückschlacke im Wesentlichen als Mineralstoffgemisch für Tragschichten im Straßenbau Verwendung findet (Bild 7). Alle anderen Einsatzgebiete sind von untergeordneter Bedeutung. Hierzu gehört die Nutzung als Gesteinskörnung für Beton insbesondere bei Bauwerken, die einer hohen Wärmebeanspruchung ausgesetzt sind.

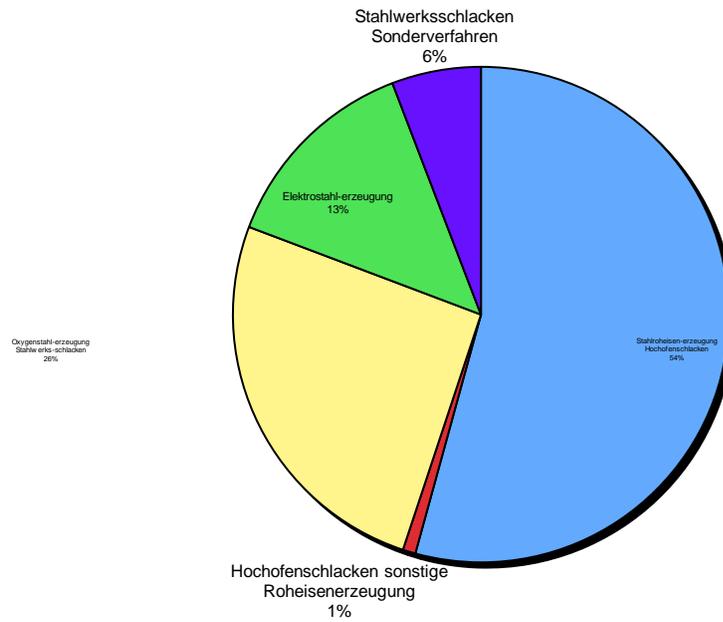


Bild 4: Erzeugung von Eisenhüttenschlacken in Deutschland in 2003 (13,25 Mio. t) [Lit 26]

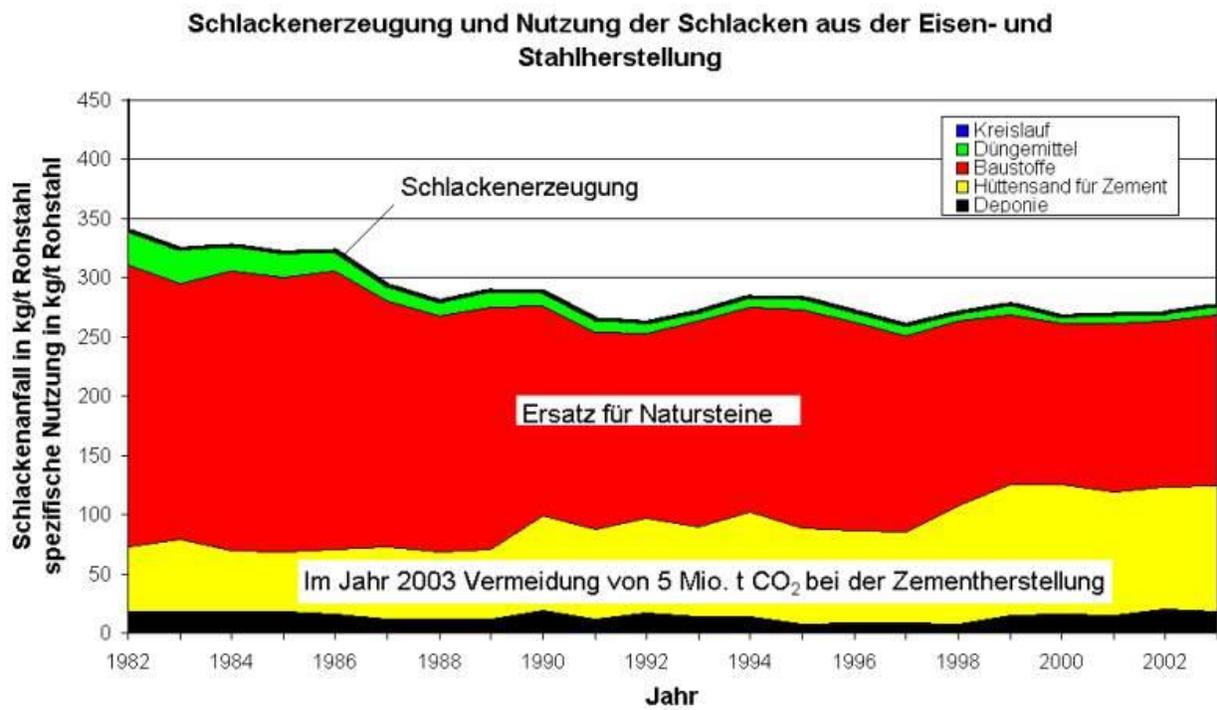


Bild 5: Nutzung der Schlacken aus der Eisen- und Stahlerzeugung [Lit 34]

2.4 Zusammensetzung [Lit 28]

2.4.1 Hochofenstückschlacke (HOS)

Hochofenstückschlacke besteht im Wesentlichen aus SiO_2 , CaO , Al_2O_3 und MgO . Den üblichen Bereich und Maximalwerte enthält Tabelle 1.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Hauptbestandteile von Hochofenstückschlacke (Feststoffanalyse)

	Dimension	Spannweiten	Spannweiten [Lit 16]	Maximalwerte [Lit 22]
SiO_2	[M.-%]	35-40	35-39	40
Al_2O_3	[M.-%]	8-12	8-12	12
Fe_{ges}	[M.-%]	< 0,3	< 0,5	0,7
MnO_2	[M.-%]	< 1,5	< 0,5	1,3
CaO	[M.-%]	33-40	36-43	43
MgO	[M.-%]	8-10	4-12	16
S	[M.-%]	< 1,5	1,2-1,6	1,9

Durch das langsame Abkühlen der Hochofenstückschlacke entsteht ein kristallines Gefüge, in dem folgende kalksilikatische Mineralphasen dominieren:

- Melilith $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \dots 2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$,
- Merwinit $3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ und
- Monticellit $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$

Kalk liegt ungebunden vor.

Für die Verwendung der Hochofenstückschlacken sind auch Nebenbestandteile von Bedeutung, da sie sich bei der umwelttechnischen Prüfung der Einsatzzeichnung in den Eluaten wiederfinden. Die Beurteilung der Eluate erfolgt unter anderem Anhand der Zuordnungswerte der LAGA (Tabelle 2).

Tabelle 2: Zuordnungswerte Eluat für Recyclingbaustoffe / nicht aufbereiteten Bauschutt nach TR LAGA Bauschutt

Parameter Eluat	Dimension	Zuordnungswerte			
		Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
pH-Wert		7,0 – 12,5			
elektr. Leitföh.	$\mu\text{S/cm}$	500	1500	2500	3000
Chlorid	mg/l	10	20	40	150
Sulfat	mg/l	50	150	300	600
Arsen	$\mu\text{g/l}$	10	10	40	50
Blei	$\mu\text{g/l}$	20	40	100	100
Cadmium	$\mu\text{g/l}$	2	2	5	5
Chrom (gesamt)	$\mu\text{g/l}$	15	30	75	100
Kupfer	$\mu\text{g/l}$	50	50	150	200
Nickel	$\mu\text{g/l}$	40	50	100	100
Quecksilber	$\mu\text{g/l}$	0,2	0,2	1	2
Zink	$\mu\text{g/l}$	100	100	300	400
Phenolindex	$\mu\text{g/l}$	< 10	10	50	100

Z 0: uneingeschränkter Einbau
 Z 1: eingeschränkter offener Einbau
 Z 2: eingeschränkter Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen

Tabelle 3: Zusammenstellung der Nebenbestandteile von Hochofenstückschlacke (Feststoffanalyse)

	Dimension	Maximalwerte [Lit 22]	Spannweiten [Lit 4]
As	[mg/kg]	< 1	0,2 - < 1
Cd	[mg/kg]	< 1	0,1 - < 1
Cr	[mg/kg]	40	24 - 40
Co	[mg/kg]	8	2 – 8
Cu	[mg/kg]	10	9 – 10
Hg	[mg/kg]	< 1	< 0,1 - < 1
Mo	[mg/kg]	< 2	< 2
Ni	[mg/kg]	< 2	< 2
Pb	[mg/kg]	< 21	6 - 21
Se	[mg/kg]	2	2
Ti	[mg/kg]	< 1	< 0,5 - < 1
V	[mg/kg]	50	50
Zn	[mg/kg]	< 100	70 - < 100

2.4.2 Stahlwerksschlacke (SWS)

Stahlwerksschlacke besteht im Wesentlichen aus CaO, Fe, und SiO₂. Weiterhin sind größere Anteile an Al₂O₃ und MgO enthalten. Den üblichen Bereich und Maximalwerte enthält Tabelle 4.

Durch das langsame Abkühlen der Stahlwerksschlacke entsteht ein kristallines Gefüge, in dem folgende kalksilikatische Mineralphasen dominieren:

- Dicalciumsilikat 2CaO*SiO₂,
- Tricalciumsilikat 3CaO*SiO₂,
- Dicalciumferrit 2CaO*Fe₂O₃ und
- Wüstit (Ca, Fe, Mg, MnO).

Daneben treten Freikalk CaO_{frei} und Periklas MgO_{frei} auf.

Für die Verwendung der Stahlwerksschlacke sind auch Nebenbestandteile von Bedeutung, da sie sich in den Eluaten wiederfinden.

Tabelle 4: Zusammenstellung der Hauptbestandteile von Stahlwerksschlacke (Feststoffanalyse)

	Dimension	LDS		EOS		SEKS	
		Spannweite n [Lit 16]	Maximalwerte [Lit 22]	Maximalwerte [Lit 1]	Spannweite n [Lit 16]	Maximalwerte [Lit 22]	Spannweite n [Lit 16]
SiO ₂	[M.-%]	11 - 18	14	11,62	8 - 18	18,5	8 - 23
Al ₂ O ₃	[M.-%]	1 - 4	5,0	1,02	3 - 10	9,5	3 - 20
Fe _{ges}	[M.-%]	14 - 19	22	18,88	20 - 30	30	0,5 - 12
Mn _{ges}	[M.-%]	1 - 4	6,0 (MnO ₂)	4,05	2 - 5	9,8 (MnO ₂)	0,5 - 3
CaO	[M.-%]	45 - 54	53	50,45	25 - 35	36	30 - 52
CaO _{frei}	[M.-%]	1 - 10	9,5	k.A.	0 - 4	0,8	1 - 10
MgO	[M.-%]	1 - 4	6,0	2,11	3 - 9	7,5	6 - 12
P ₂ O ₅	[M.-%]	k.A.	2,7	1,52	k.A.	0,2	k.A.
S _{ges}	[M.-%]	k.A.	1,0	k.A.	k.A.	0,4	k.A.

Tabelle 5: Zusammenstellung der Nebenbestandteile von Stahlwerksschlacke (Feststoffanalyse)

	Dimension	LDS	EOS	SWS
		Maximalwerte [Lit 22]	Maximalwerte [Lit 22]	Spannweiten [Lit 4]
As	[mg/kg]	< 1	13	0,2 - < 1
Cd	[mg/kg]	< 1	30	0,1 - < 1
Cr	[mg/kg]	5.000	30.000	340 - 2.550
Co	[mg/kg]	10	10	4 - 10
Cu	[mg/kg]	50	300	16 - 50
Hg	[mg/kg]	< 1	< 1	0,1 - < 1
Mo	[mg/kg]	80	200	80
Ni	[mg/kg]	9	70	< 2 - 9
Pb	[mg/kg]	8	90	5 - 8
Se	[mg/kg]	< 1	< 1	0,4
Ti	[mg/kg]	2	1	< 0,5 - 2
V	[mg/kg]	600	2.500	600
Zn	[mg/kg]	150	900	30 - 150
F	[mg/kg]	3800	1.800	
CN _{ges}	[mg/kg]	< 10	< 10	

2.5 Umwelttechnische Parameter

2.5.1 Hochofenstückschlacke (HOS)

Die umwelttechnische Eignung der Hochofenstückschlacken für die verschiedenen Einsatzgebiete wird anhand der Eluate festgelegt. Die für Hochofenstückschlacke gemessenen Bereiche der Eluatwerte enthält Tabelle 6.

Tabelle 6: Zusammenstellung der Bereiche für Eluatwerte von Hochofenstückschlacke

Eluatanalyse				
	Dimension	Mittelwerte [Lit 16]	Maximalwerte [Lit 22]	Spannweiten [Lit 4]
As	[µg/l]	2	5	< 1 - 1
Cd	[µg/l]	< 0,1	< 0,1	0,1 - < 0,5
Cr	[µg/l]	< 2	2	< 1 - 1
Cu	[µg/l]	< 1	< 1	< 1 - 1
Hg	[µg/l]	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Ni	[µg/l]	< 2	< 2	< 2 - 4
Pb	[µg/l]	< 1	1	< 1
Zn	[µg/l]	< 10	20	< 2 - < 10
Chlorid	[mg/l]	k.A.	10	n.b.
Fluorid	[mg/l]	0,47	1,0	n.b.
Sulfat	[mg/l]	168	598	16 - 150
pH-Wert		11	11,4	10,9 - 11
elektrische Leitfähigkeit	[µS/cm]	2.500	1.260	560

Damit Hochofenstückschlacken eingesetzt werden können, sind zum Beispiel die in Tabelle 7 aufgeführten wasserwirtschaftlichen Anforderungen für die Eluatanalyse nach TL Min-StB 2000 [Lit 40] und Zuordnungswerte nach LAGA-Mitteilung 20 [Lit 19] einzuhalten. Durch die in der TL Min-StB 2000 vorgenommenen Unterteilung in die Klassen HOS-1 und HOS-2 wird aus hydrologischer Sicht ein differenzierter Einsatz ermöglicht.

Die Grenzwerte in [Lit 40] für die elektrische Leitfähigkeit und den Sulfatgehalt dürfen geringfügig (um maximal 20 %) überschritten werden, wenn dies nicht systematisch erfolgt. Eine systematische Überschreitung liegt vor, wenn der zulässige Grenzwert eines Merkmals bei zwei aufeinander folgenden Fremdüberwachungsprüfungen überschritten wird.

Tabelle 7: Richt- und Grenzwerte für wasserwirtschaftliche Anforderungen an Hochofenstückschlacke

Eluatanalyse				
	Dimension	HOS-1 nach [Lit 40]	HOS-2 nach [Lit 40]	Z1 / Z2 nach [Lit 19]
Ni	[µg/l]			20
Cr	[µg/l]			20
Sulfat	[mg/l]	300	800	
pH-Wert		10 - 12	10 - 12	5 - 12
elektrische Leitfähigkeit	[µS/cm]	1.500	1.500	1000

2.5.2 Stahlwerksschlacke (SWS)

Die umwelttechnische Eignung der Stahlwerksschlacken für die verschiedenen Einsatzgebiete wird anhand der Eluate festgelegt. Die für Stahlwerksschlacke gemessenen Bereiche der Eluatwerte enthält Tabelle 8.

Damit Stahlwerksschlacken eingesetzt werden können, sind zum Beispiel die in Tabelle 9 aufgeführten wasserwirtschaftlichen Anforderungen für die Eluatanalyse nach TL Min-StB 2000 [Lit 40] und Zuordnungswerte nach LAGA-Mitteilung 20 [Lit 19] einzuhalten. Durch die in der TL Min-StB 2000 vorgenommene Unterteilung in die Klassen SWS-1 bis SWS-3 wird aus hydrologischer Sicht ein differenzierter Einsatz ermöglicht.

Die Grenzwerte in [Lit 40] für die elektrische Leitfähigkeit und den Sulfatgehalt dürfen geringfügig (um maximal 20 %) überschritten werden, wenn dies nicht systematisch erfolgt. Eine systematische Überschreitung liegt vor, wenn der zulässige Grenzwert eines Merkmals bei zwei aufeinander folgenden Fremdüberwachungsprüfungen überschritten wird.

Tabelle 8: Zusammenstellung der Bereiche für Eluatwerte von Stahlwerksschlacke

Eluatanalyse					
	Dimension	LDS Mittelwerte [Lit 16]	EOS Mittelwerte [Lit 16]	SEKS Maximalwerte [Lit 22]	[Lit 4]
As	[µg/l]	< 1	< 10	1	< 1 - 10
Cd	[µg/l]	< 0,1	< 0,5	0,2	0,1 - < 0,5
Cr	[µg/l]	3	< 50	3	< 50
Cu	[µg/l]	1	< 2	< 1	1 - < 20
Hg	[µg/l]	< 0,6	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Ni	[µg/l]	< 2	< 5	3	< 2 - 5
Pb	[µg/l]	< 1	< 2	2	< 1 - 5
Zn	[µg/l]	< 10	< 10	10	10
Chlorid	[mg/l]	k.A.	k.A.	k.A.	n.b.
Fluorid	[mg/l]	2,0	< 0,5	2,0	n.b.
Sulfat	[mg/l]	< 10	25	< 10	25
pH-Wert		12,1	11,5	12,0	11,5 - 12,4
elektrische Leitfähigkeit	[µS/cm]	2.500	2.500	2.500	2710

Tabelle 9: Richt- und Grenzwerte für wasserwirtschaftliche Anforderungen an Stahlwerksschlacke

Eluatanalyse					
	Dimension	SWS-1 nach [Lit 40]	SWS-2 nach [Lit 40]	SWS-3 nach [Lit 40]	Z1 / Z2 nach [Lit 19]
Ni	[µg/l]				20
Cr _{ges}	[µg/l]	30	75	100	20
V	[µg/l]	50	100	250	
Fluorid	[mg/l]	0,75	2	5	
pH-Wert		10 - 13	10 - 13	10 - 13	5 - 12
elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	1.500	1.500	1.500	1000

2.6 Bautechnische Eigenschaften und Anforderungen

2.6.1 Hochofenstückschlacke (HOS)

Die Kontrolle der Abkühlbedingungen gestattet es, aus der flüssigen Hochofenschlacke unterschiedliche Produkte zu erzeugen. Bei langsamer Abkühlung in Schlackenbeeten entsteht die kristalline Hochofenstückschlacke (HOS). Sie wird in Abhängigkeit von der Porosität in vier Qualitätsklassen A bis D untergliedert. HOS-A bis HOS-C werden aufgenommen und in Aufbereitungsanlagen durch Brechen und Sieben zu Gemischen aus Gesteinskörnung oder Schotter, Splitt, Edelsplitt, Brechsand und Edelbrechsand verarbeitet. HOS-D wird in den beim Aufbrechen in den Beeten entstandenen Körnungen im Erdbau eingesetzt.

Als Maßstab für die Porigkeit der Hochofenstückschlacke werden die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck $W_{m,a}$ und die Schüttdichte ermittelt. Hochofenstückschlacke für den Straßenbau müssen die Werte der Tabelle 10 einhalten.

Tabelle 10: Kennwert für die Porigkeit der Hochofenstückschlacke [Lit 40]

Qualitätsklasse	Wasseraufnahmegrad $W_{m,a}$ M.-%	Schüttdichte	
		Schotter 32/45 mm g/cm ³	Splitt 8/11 mm g/cm ³
HOS-A	≤ 4	≥ 1,2	≥ 1,2
HOS-B	≤ 6	≥ 0,9	≥ 1,0
HOS-C	≤ 8	≥ 0,9	≥ 0,9

Für den Einsatz im Straßenbau darf Hochofenstückschlacke keinen Kalk- oder Eisenzerfall aufweisen. Weitere Eigenschaften enthält Tabelle 11.

Tabelle 11: Erfahrungswerte für bautechnische Eigenschaften von Hochofenstückschlacke

Eigenschaft	Dimension	Hochofenstückschlacke		
		HOS-A	HOS-B	HOS-C
Rohdichte ρ_R	[g/cm ³]	2,40 – 2,80	2,10 – 2,60	2,10 – 2,60
Druckfestigkeit β_D	[N/mm ²]	-	-	Keine Prüfung und Kennwerte
Widerstandsfähigkeit gegen Schlag				
- Schotter SD 10	[M.-%]	15 - 24	20 – 33	
- Splitt/Kies SZ _{8/12}	[M.-%]	18 - 25	22 - 34	
Polierresistenz		13		

2.6.2 Stahlwerksschlacke (SWS)

Stahlwerksschlacke zeichnet sich für den Einsatz im Erd-, Straßen-, Wege-, Wasser- und Gleisbau durch eine hohe Tragfähigkeit infolge der kantigen Körner mit ihrer rauen Oberfläche aus.

Die Raumbeständigkeit von SWS kann durch chemisch ungebundenen Kalk (freier Kalk) (CaO_{frei}) und/oder durch chemisch ungebundenes Magnesiumoxid (MgO_{frei}) beeinträchtigt werden. Kalk und Dolomit werden als Schlackebildner bei der Stahlherstellung zugesetzt, aber im Verlauf des Schmelzprozesses nicht immer vollständig aufgelöst und mineralisch gebunden. Zur Absenkung der Freikalkgehalte werden von den Erzeugerwerken verschiedene Behandlungsmethoden angewandt, die zu einer Verbesserung der Raumbeständigkeit der Schlacke führen. Nicht ausreichend raumbeständige Stahlwerksschlacken können im Betongefüge im Gegensatz zu Asphaltgemischen bereits durch geringe Volumenzunahmen zu Schädigungen des Bauwerks führen. Für bestimmte Anwendungsgebiete ist daher eine ausreichende Raumbeständigkeit nachzuweisen:

- Für den Einsatz von Stahlwerksschlacke in Asphaltsschichten (Bild 6) darf die Volumenzunahme nicht mehr als 1 Vol.-% für den Einsatz in Asphaltdeckschichten bzw. nicht mehr als 2,5 Vol.-% für den Einsatz in Asphaltbinder- und Asphalttragschichten betragen. Werden LD-Schlacken nach dem Gehalt an freiem Kalk sortiert und getrennt gelagert, gelten sie ohne Nachweis der Volumenzunahme für Asphaltdecken und –tragschichten als ausreichend raumbeständig, wenn der Gehalt an freiem Kalk nicht mehr als 4 M.-% beträgt.
- Für den Einsatz von Stahlwerksschlacke in Tragschichten ohne Bindemittel unter Asphaltsschichten darf die Volumenzunahme mehr als 5 Vol.-% nicht überschreiten. Werden LD-Schlacken nach dem Gehalt an freiem Kalk sortiert und getrennt gelagert, gelten sie ohne Nachweis der Volumenzunahme für Asphaltdecken und –tragschichten als ausreichend raumbeständig, wenn der Gehalt an freiem Kalk nicht mehr als 7 M.-% beträgt.
- Beim Einsatz von Stahlwerksschlacken unter Betondecken ist die ausreichende Raumbeständigkeit im Einzelfall nachzuweisen, wenn die Stahlwerksschlacke in Schichten unmittelbar unter Betondecken verwendet wird.
- Im ländlichen Wegebau entfällt der Nachweis der Raumbeständigkeit beim Einsatz von Stahlwerksschlacke in Deckschichten ohne Bindemittel sowie in Tragschichten ohne Bindemittel unter solche Deckschichten.



Bild 6: Einsatz von Stahlwerksschlacke als Gesteinskörnung in bitumengebundener Deckschicht [Lit 14]

Weitere Eigenschaften enthält Tabelle 12.

Tabelle 12: Erfahrungswerte für bautechnische Eigenschaften von Stahlwerksschlacke

Eigenschaft	Dimension	LDS	EOS
Rohdichte ρ_R	[g/cm ³]	3,0 - 3,7	3,0 - 3,7
Wasseraufnahme	[M.-%]	0,3 - 1,0	0,3 - 1,0
Korngrößenverteilung		Einzelkörnungen oder Korngemische	
Kornform		kubisch	
Druckfestigkeit β_D	[N/mm ²]	> 100	> 100
Widerstandsfähigkeit gegen Schlag			
- Schotter SD 10	[M.-%]	12 - 29	12 - 29
- Splitt/Kies SZ _{8/12}	[M.-%]	10 - 26	10 - 26
Polierresistenz		48 - 60	50 - 62
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel, Absplitterungen < 5 mm	[M.-%]	≤ 1,0	≤ 1,0

2.7 Einsatzgebiete



Bild 7: Hochofenschlacke im Straßenbau (Tragschicht) [Lit 14]

Der Schlackenstein war als billiger Baustoff zwischen dem 16. und 20. Jahrhundert ein weitverbreitetes und beliebtes Baumaterial. Er war deshalb ein günstiger Baustoff, weil er aus den Reststoffen (Schlacke) des Verhüttungsprozesses der Metall- bzw. Schmelzhütten gewonnen wurde. Durch seine relativ einfache Herstellung verbreitete er sich schnell. Jedoch wies er viele Nachteile (z. B. hohe Porosität, große Sprödigkeit, Radioaktivität) auf. Für die wirtschaftliche Vermarktung wurde die Zusammensetzung des Schlackensteins immer weiter optimiert, woraus sich der spätere Hüttenstein entwickelte [Lit 30]. In neueren Entwicklungen bei den Stahlwerksschlacken wird zum Beispiel LD-Schlacke im noch flüssigen Zustand mit Sauerstoff

und Quarzsand behandelt (Bild 8). Durch den Zusatz dieser beiden Stoffe wird eine ansonsten bei Schlacke mögliche Volumenausdehnung verhindert, was eine dauerhafte Stabilität gewährleistet [Lit 38]. Bild 9 zeigt die deutlichen Unterschiede in der Volumendehnung, die sich durch die Behandlung ergeben.

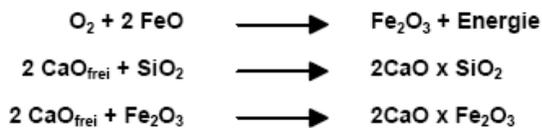
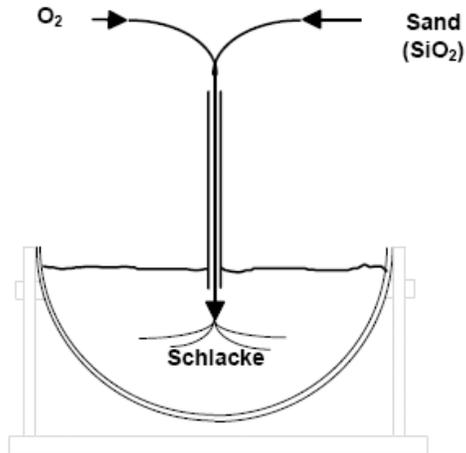


Bild 8: Schema der Schlackenbehandlung [Lit 8]

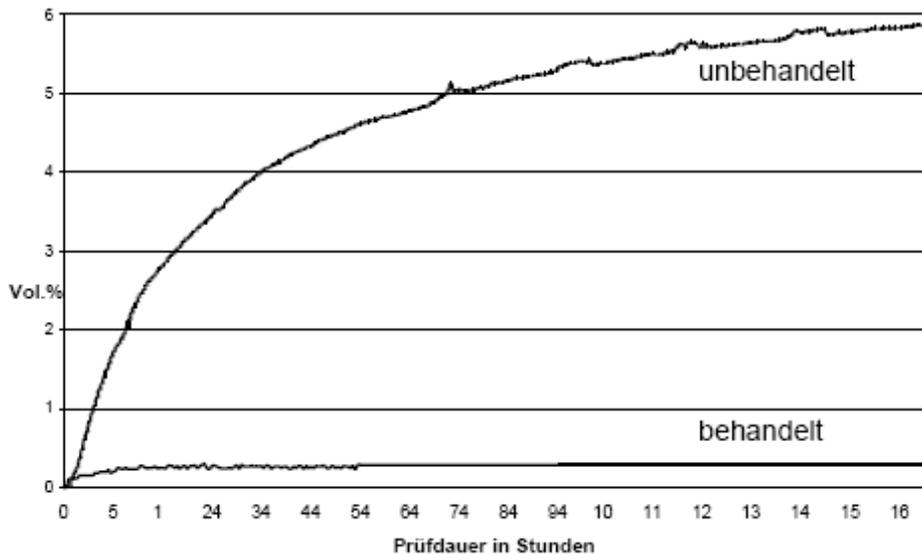


Bild 9: Auswirkung der Schlackenbehandlung [Lit 8]

Der Einsatz von SWS in Beton und Mörtel wurde in [Lit 21] untersucht. Dort wird festgestellt, dass LDS-Granulat und die meisten Elektroofenschlacken für eine Verwendung als Gesteinskörnung im Beton geeignet sind. Natursande können durch Brechsande aus SWS ersetzt werden. Mit Ausnahme des LD-Granulats ist eine Vorsättigung der Brechsande und der Körnung mit Wasser notwendig, um eine ausreichende Verarbeitbarkeit zu gewährleisten. Die erreichbaren

Festigkeitswerte sind mit denen eines Betons mit Rheinsand/-kies vergleichbar (Bild 10). Betone mit behandelter LD-Schlacke zeigen im niederländischen Kochversuch vereinzelt Abplatzungen. Unter Praxisbedingungen sind aber bisher weder visuelle Schäden noch Rückgänge im E-Modul oder bei den Festigkeiten beobachtet worden. Die Verwendbarkeit un behandelter LD-Schlacken ist nur begrenzt im Beton möglich. Durch Auslagerung (Abbau der CaO_{frei} -Gehalte) und zielgerichtete Auswahl können aber auch diese LD-Schlacken im Beton verwendet werden. Der Einsatz sollte auf den bauaufsichtlich unregulierten Bereich beschränkt bleiben. Es erfolgte bereits eine erfolgreiche Herstellung von Pflastersteinen [Lit 21].

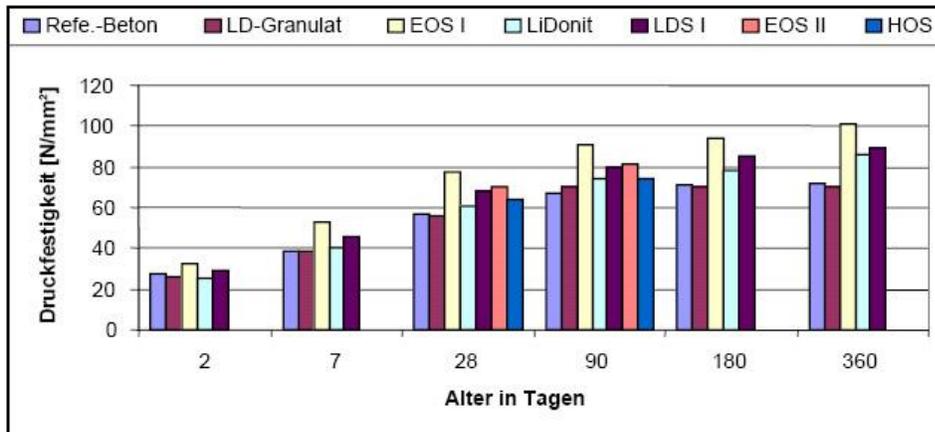


Bild 10: Druckfestigkeitsentwicklung von Betonen der Festigkeitsklasse C45/55 [Lit 21]

Während Hochofenschlacke bis heute außerdem als Rohstoff für die Flaschenglasherstellung und als fasriger Dämmstoff (Hüttenwolle) verwendet wird, wurde ihr Einsatz als gegossener Pflasterstein (Bild 11), als Mauerstein (Hüttenstein) und als grobporige Gesteinskörnung (Hüttenbims) inzwischen eingestellt.



Bild 11: Herstellung von Pflastersteinen aus Hochofenschlacke, ca. 1920 [Lit 14]

Hüttenbims [Lit 46]

Hüttenbims wird in Schäumenanlagen durch rasche Abkühlung der Hochofenschlacke erzeugt. Dabei wird die flüssige Schlacke in eine Wanne gekippt, in die seitlich und von unten Wasser eingedüst wird. Dadurch wird ein Aufschäumen verursacht und die Schlacke erstarrt teils kristallin, teils glasig. Hüttenbims wird im Straßenbau und als leichte Gesteinskörnung für Leichtbeton eingesetzt. Das Herstellungsverfahren ist aufwendig und es entstehen dabei große Mengen an SO_2 -

Emissionen. Aus diesen Gründen stellen immer mehr Hüttenwerke die Produktion von Hüttenbims ein.

Hüttenwolle [Lit 46]

Bei diesem Verfahren wird flüssige Hochofenschlacke mit Pressluft verblasen. Obwohl Hüttenwolle gut für die Wärme-, Kälte- und Schallisolierung geeignet ist, wird sie immer seltener hergestellt.

Hochofenschlackenpellets [Lit 46]

Die flüssige Schlacke trifft nach ihrem Austritt auf eine Kohlenstoffplatte, wird dadurch zu einer breiten Schicht verteilt und danach mittels Wasserstrahlen zerschnitten. Diese Schmelzschicht fällt anschließend auf eine wassergekühlte rotierende Trommel, wo sie zerrissen wird. Die weggeschleuderten Schlackepartikel werden abgerundet und dehnen sich aufgrund der eingeschlossenen Gase aus. Je nach Größe der Partikel entsteht fast glasartiges Granulat, teils kristalline, teils glasige Pellets, die durch ihre verschiedenen Flugbahnen getrennt anfallen. Die Pelletierung erfolgt trocken, damit wird die Abwasserproblematik durch dieses Verfahren vermindert. Zugleich wird eine kristalline und keine glasige Struktur erzielt. Die entstehenden Produkte sind im Bauwesen und in der Zementindustrie einsetzbar. In Kanada werden expandierte Hochofenschlackenpellets als Leichte Gesteinskörnung angeboten [Lit 18].

Stahlwerksschlacke kommt im Wasserbau wegen ihrer hohen Rohdichte beim Bau von Bühnen und Leitwerken, bei Kolkverfüllungen und Sohlaufhöhungen sowie als Erosionsschutz zum Einsatz (Bild 12) und hat sich bestens bewährt. Zu den Anwendungsgebieten außerhalb des Verkehrsbaus gehören der Bau von Dränageschichten sowie von mineralischen Abdichtungen.

Aufgrund der enorm hohen Abriebfestigkeit sowie ausgezeichneter Griffigkeit wird ein Großteil der LD-Schlacke im Straßenbau für die bituminöse Verschleißschicht verwendet. Auch bei Erneuerungen von Verschleißbelägen im Dünnschichtverfahren und bei der Spurrillensanierung hat sich LD-Schlacke bestens bewährt. Ferner kommen die hervorragenden qualitativen Eigenschaften des LD-Edelbrechkornes für hochwertigste Beläge in besonderem Maße zum Tragen. In der Zementindustrie wird LD-Schlacke auch als energiesparender Zuschlagstoff mit Flussmittelcharakter eingesetzt [Lit 46].

Grundlage für die Nutzung aller Eisenhüttenschlacken sind verschiedene Regelwerke, in denen die Anforderungen an ihre Eigenschaften gleichberechtigt neben denen anderer Produkte festgelegt werden. Dazu zählen insbesondere die DIN 4301 "Eisenhüttenschlacke und Metallhüttenschlacke im Bauwesen", DIN 1164, DIN EN 197, DIN 398, DIN EN 12620, TL Min-StB, TLW u. a. mehr. Die Produkte aus Eisenhüttenschlacken unterliegen einer umfassenden Gütesicherung.

Der Einsatz von Stahlwerksschlacken als Düngemittel stellt heute, anders als in früheren Jahren, ein Anwendungsgebiet mit nur noch geringen Absatzmengen dar. Seit 1883 wurde vom Apotheker G. Hoyer mann phosphatreiches Thomasmehl, gemahlene Stahlwerksschlacke aus dem Thomasverfahren, als Düngemittel auf den Markt gebracht. Der neue Dünger fand reißenden Absatz und bewährte sich ganz besonders auf kalkarmen und versauerten Böden. Nachdem zeitweilig jährlich über 3 Mio. t Thomasmehl in der deutschen Landwirtschaft verbraucht worden waren, kam es infolge einer Umstellung der verwendeten Eisenerze schließlich zur Einstellung des

Thomasverfahrens und damit der Erzeugung von Thomasmehl. Heutzutage werden geringere Mengen an Düngemitteln aus Hochofen- und LD-Schlacke als Hütten- und Konverterkalk hergestellt.



Bild 12: Wasserbausteine aus Stahlwerksschlacke [Lit 14]

HOS dient als Rohstoff bei der Glas- bzw. Steinwolleherstellung und wird als Strahlmittel eingesetzt.

Bild 13 gibt einen zusammenfassenden Überblick der Behandlungsmöglichkeiten von Hochofen- und Stahlwerksschlacken.

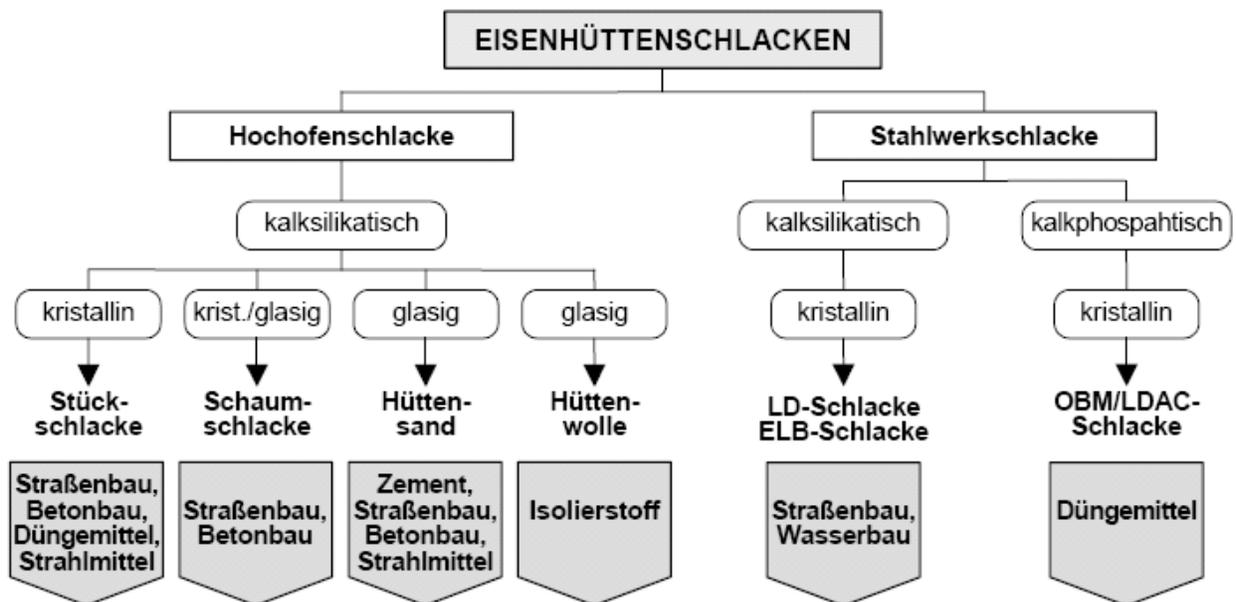


Bild 13: Übersicht der Behandlungsmöglichkeiten von Hochofen- und Stahlwerkschlacken [Lit 12]

2.8 Hüttensand

2.8.1 Herstellung

Hochofenschlacke, die vor allem aus Kalk, Kieselsäure, Aluminium- und Magnesiumoxid besteht, wird heute meist in Granulationsanlagen aufgearbeitet. Durch das Abschrecken der flüssigen Schlacke entsteht ein glasig erstarrter, feinkörniger Hüttensand. Dieser eignet sich besonders als Rohstoff für die Herstellung von hochwertigen Zementen, kann jedoch auch als Betonzusatzstoff vom Typ II genutzt werden.

Die Granulationsanlagen bestehen aus einem Granulier- und einem Entwässerungssystem. Das Granuliersystem bestimmt die Qualität des herzustellenden Produktes (Körnung, etc.) (Bild 14). Die Trennung des Wasser-Sandgemisches, die verbleibende Restfeuchte des Hüttensandes und die Reinheit des Abwassers sind vom Entwässerungssystem abhängig. Der Unterschied der eingesetzten Verfahren zur Hüttensandherstellung besteht in der Art der Entwässerung (Tabelle 13). Bild 15 zeigt das fertige Produkt.

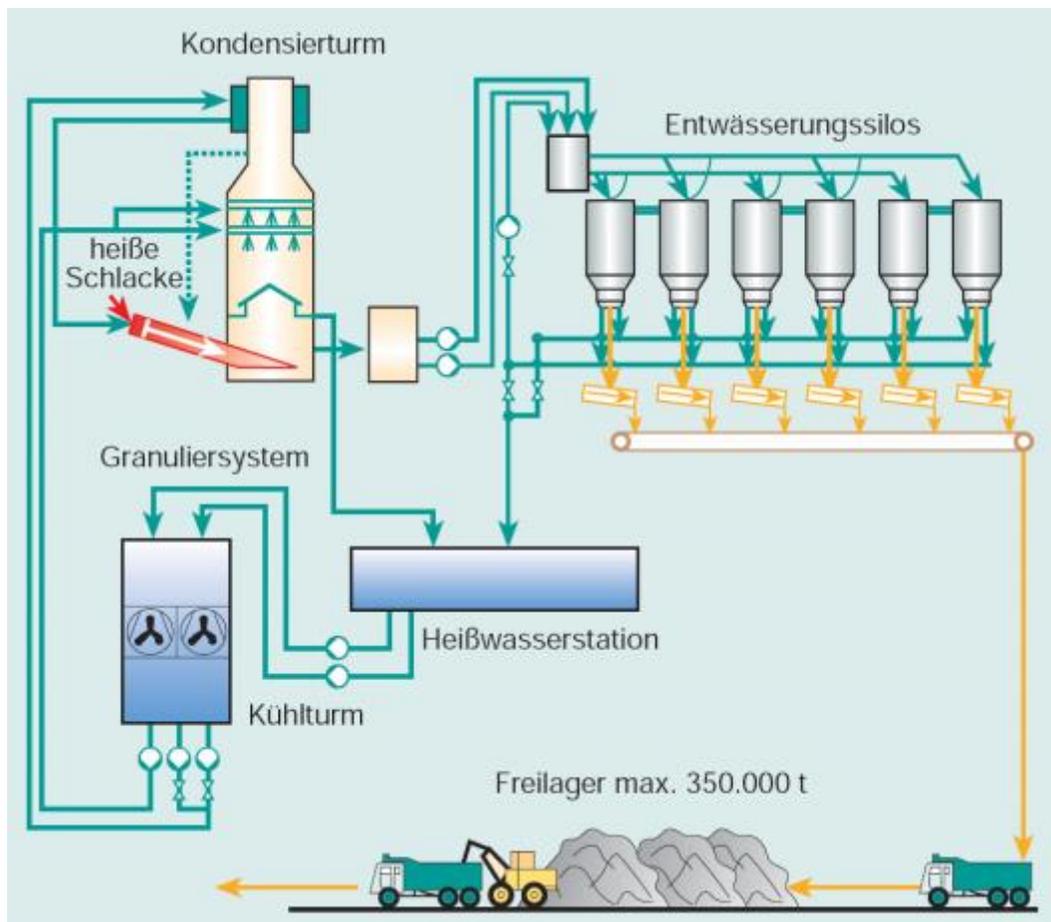


Bild 14: Fließbild der Granulationsanlage zur Erzeugung von Hüttensand im Werk Salzgitter [Lit 48]

Tabelle 13: Verfahrensübersicht zur Hüttensandherstellung [Lit 15]

Verfahren	Prinzip	Trennung des Hüttensand-Wassergemisches	anfallende Reststoffe, Emissionen
Granulation mit OCP Entwässerung (Filterbett)	Granulation erfolgt in einer Rinne mit Wasser, das mit hohem Druck aus Spritzköpfen auf die flüssige Schlacke trifft	im Filterbett aus Kies bzw. OCP-Filterbecken: Wasser sickert durch Kiesschicht nach unten durch, entwässerter Hüttensand bleibt zurück:	Abwasser: geschlossener Wasserkreislauf Schwefelwasserstoff und Schwefeldioxid Wasserdampf Granulation mit Filterbunker
Granulation mit Filterbunker	Wasser-Sandgemisch wird mittels Pumpen in Filterbunker gepumpt	Filterbunker dienen als Entwässerungssilos: Sand setzt sich nach unten ab, Wasser läuft oben über Filter ab.	Abwasser: wird im Kreislauf geführt:
Granulation mit drehendem Schöpfrad	heiße, flüssige Schlacke gelangt im freien Fall in den aus Spritzdüsen austretenden Wasserstrahl	Schöpfrad dreht sich in Wanne. Während der Rotation des Schöpfrades (Entwässerungsrotor) entsteht in seinen Kammern Unterdruck. Dadurch trennt sich das Wasser vom Granulat und fließt durch Öffnung im Siebboden ab:	Abwasser im Kreislauf; über Kühlturm H ₂ S oder SO ₂ ; 60 % der Emissionen werden am im Granulationswasser enthaltenen Kalk gebunden und neutralisiert:
a) Granuliersystem ohne Kühlsystem ohne Emissionsschutz	a) einfache Handhabung, geringer Wartungsaufwand, aber geringerer Glasgehalt des Hüttensandes		Entweichender H ₂ O-Dampf; bei b): wird im oberen Teil des Granulierungsturms mit Wasser bedüst. Der Dampf kondensiert und die restlichen Schadstoffe werden durch Kalk, der dem Sprühwasser zugesetzt ist, gebunden.
b) Granuliersystem mit Kühlsystem und Emissionsschutz	b) 3 % höherer Glasgehalt des Hüttensandes als bei a)		
Granulation mit Trommelentwässerung (INBA) Warm- und Kaltwasservariante möglich	Granulation erfolgt in der Kaltrinne, Sand-Wassergemisch fällt in Auffangbehälter, der die Drehtrommel speist.	Trennung erfolgt in drehender Filtertrommel aus feinem Maschengeflecht, Wasser läuft in Wassertank, eine Schaufelvorrichtung nimmt kontinuierlich Sand auf, nach halber Trommelumdrehung fällt entwässerter Sand auf ein Förderband	Abwasser im Kreislauf: Vorteil: keine zusätzliche Klärvorrichtung notwendig, da der Feinpartikelanteil sehr gering ist. Grund: Sandschicht am Boden der Trommel wirkt als natürlicher Filter und hält auch kleinste Sandteilchen zurück. evtl.: H ₂ S-Emissionen

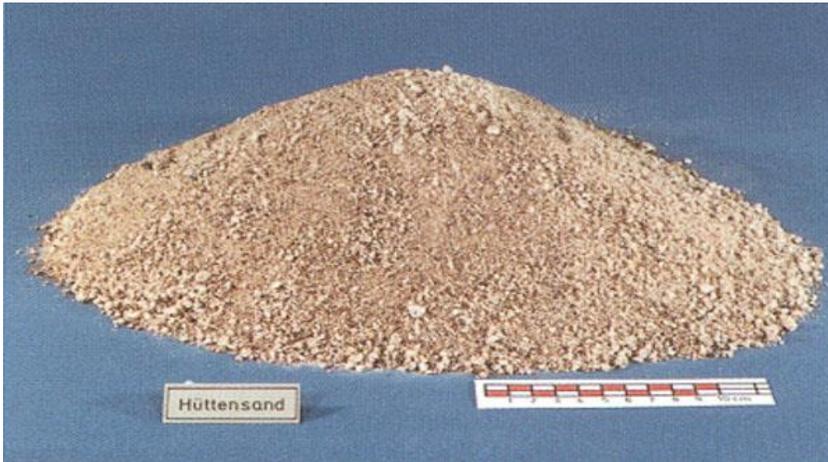


Bild 15: Hüttensand [Lit 39]

2.8.2 Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff Typ II [Lit 11, Lit 17]

Hüttensandmehl wurde zwischen den 1920er und dem Beginn der 1970er Jahren in Deutschland als Betonzusatzstoff genutzt. In anderen Ländern (Großbritannien, Niederlande, Irland, USA, Japan) ist der Einsatz seit Jahrzehnten etabliert. Seit 2006 liegt mit DIN EN 15167 „Hüttensand zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel“ eine harmonisierte europäische Stoffnorm vor. Für die bauaufsichtliche Einführung werden mit Beginn 2011 die entsprechenden Abschnitt der DIN 1045-2 durch folgende Regelungen ergänzt:

- Für Hüttensandmehl (Kurzzeichen: h) nach DIN EN 15167-1 gilt die Eignung als Zusatzstoff Typ II und die Eignung des k-Wert-Ansatzes als nachgewiesen.
- Die Anrechnung von Hüttensandmehl auf den Mindestzementgehalt darf für die gleichen Zementarten erfolgen wie bei Verwendung von Flugasche: CEM I, CEM II/A-D, CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM II/A-LL, CEM II/A-P, CEM II/A-V, CEM II/A-M mit den Hauptbestandteilen S, D, P, V, T, LL, CEM II/B-M(S-D, S-T, D-T), CEM III/A, CEM III/B mit bis 70 M.-% Hüttensand.
- Wie für Flugasche gilt, dass der Gehalt (z + h) die Mindestzementgehalte nach den Tabellen F.2.1 und F.2.2, Zeile 3 nicht unterschreiten darf.
- Bei Verwendung der oben genannten Zemente darf Hüttensandmehl mit $k = 0,4$ auf den äquivalenten Wasserzementwert w/z_{eq} angerechnet werden.
- In Abhängigkeit von den Hauptbestandteilen der Zemente gelten folgende maximal anrechenbaren Hüttensandmengen:
 - für Zemente ohne P, V und D:

$$h \leq 0,33 \cdot z,$$
 - für Zemente mit P oder V:

$$h \leq 0,25 \cdot z,$$
 - für Zemente mit D:

$$h \geq 0,15 \cdot z.$$

- In den Expositionsklassen XF2 und XF4 darf Hüttensandmehl nicht auf den Mindestzementgehalt und den w/z-Wert angerechnet werden.
- Die gleichzeitige Verwendung von Hüttensandmehl und Flugasche und/ oder Silikastaub als Zusatzstoff sind nicht zulässig.
- Die Regelungen für Flugasche zur Herstellung von Beton mit hohem Sulfatwiderstand dürfen nicht für Hüttensand angewendet werden.
- Die Regelungen für die Verwendung von Flugasche in Unterwasserbeton gelten nicht für Hüttensand.
- Da die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen noch nicht geregelt ist, bedarf diese einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung.

In der DAfStB-Alkalirichtlinie ist zu ergänzen, dass der Beitrag von Hüttensandmehl zum wirksamen Alkaligehalt vernachlässigt werden kann.

2.8.3 Herstellung von Hochofenzement

Die Leistungsfähigkeit von Zementen wird aufgrund der steigenden Bedeutung von Kompositzementen zunehmend durch die weiteren Hauptbestandteile neben dem Klinker bestimmt. Der Anreiz, Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen zu erzeugen, liegt außer in dem deutlich niedrigeren Energieverbrauch ferner in der Möglichkeit, Zemente herzustellen, die auf ihren Anwendungsfall hin optimiert sind (z. B. niedrige Hydratationswärme, geringer wirksamer Alkaligehalt). Die Nutzung anderer Hauptbestandteile führt jedoch in der Regel zu einer Reduzierung der Frühfestigkeiten und in einigen Fällen auch zu veränderten Verarbeitungseigenschaften. Das Erzielen einer hohen Frühfestigkeiten bei einer möglichst guten Verarbeitbarkeit der Zemente steht deshalb bei vielen Untersuchungen im Vordergrund.

Die Zementeigenschaften werden vor allem von der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung und der Reaktivität der eingesetzten Stoffe sowie von der beim Mahlen erzeugten Mahlfeinheit und Korngrößenverteilung der Zementkomponenten beeinflusst. Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen können heute einerseits durch gemeinsames Mahlen oder andererseits durch getrenntes Mahlen der Ausgangsstoffe (z. B. Klinker, Hüttensand, Kalkstein, Sulfatträger) und anschließendes Mischen der mehlfeinen Vorprodukte hergestellt werden.

Bei der gemeinsamen Vermahlung können die Zusammensetzung, die Mahlfeinheit und die Korngrößenverteilung des Zements nur bedingt beeinflusst und somit bestimmte Zementeigenschaften nur schwer erzeugt werden. Bei der gemeinsamen Mahlung von Klinker und Hüttensand wird der schwerer mahlbare Hüttensand in den gröberen Korngrößenfraktionen angereichert, sodass das latent hydraulische Potenzial des Hüttensands nur zum Teil zur Verfügung steht. Der Klinkeranteil wird hingegen sehr fein gemahlen und reichert sich bevorzugt in den Korngrößenfraktionen $< 32 \mu\text{m}$ an. Die Folgen dieser granulometrischen Separierung sind ein erhöhter Wasseranspruch und eine intensivere Freisetzung der Hydratationswärme bei gleichzeitig ungünstigeren Festigkeitseigenschaften. Die Erzeugung gezielter Korngrößenverteilungen der Einzelkomponenten ist nicht möglich. Darüber hinaus zeigte sich bei einigen Untersuchungen, dass die Korngrößenverteilung der schlechter mahlbaren Komponente im Vergleich zur leichter mahlbaren Komponente ein etwas höheres RRSB-Steigungsmaß (Exponentialverteilung nach Rosin, Rammler, Sperling und Bennett) erreichte [Lit 41, Lit 43].

Getrennt gemahlene Zementkomponenten können hingegen in ihren Korngrößenverteilungen und Feinheiten exakt eingestellt werden und somit einen zusätzlichen Einfluss auf die Zementeigenschaften ausüben. Der zusätzliche Freiheitsgrad beinhaltet jedoch auch die Gefahr, dass sich ungewollte Schwankungen der Eigenschaften der Ausgangsstoffe in stärkerem Maße auf die Eigenschaften des Zements auswirken [Lit 43].

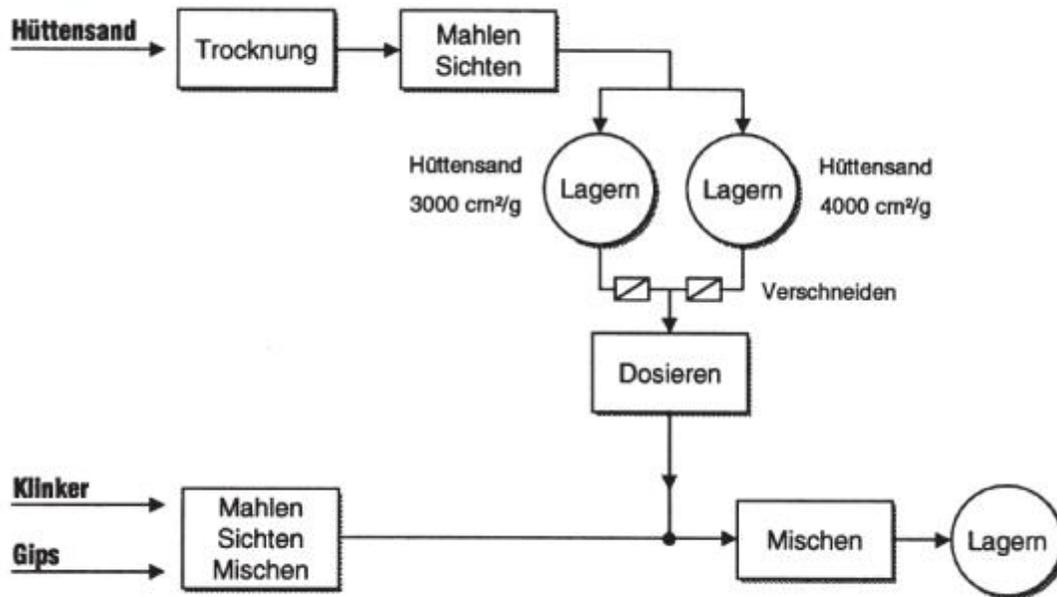


Bild 16: Anlagenschema getrennte Mahlung und Mischung von Hüttensandzementen [Lit 41]

Zahlreiche Versuche sind in der Vergangenheit gescheitert, chemische Kennwerte des Hüttensands mit der Festigkeitsentwicklung der HOZ zu korrelieren. Unabhängig davon, ob einzelne Parameter, wie zum Beispiel der Al_2O_3 -Gehalt, oder zusammengefasste Parameter, wie der F-Wert $[= (\text{CaO} + 0,5 \times \text{S}^{2-} + 0,5 \times \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \text{MnO})]$, die einfache $(\text{CaO}/\text{SiO}_2)$ oder die erweiterte Basizität nach DIN 1164, Teil 1 [Lit 5] $((\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2)$ betrachtet wurden, konnten derartige Zusammenhänge allenfalls für einen eingeschränkten Datensatz zufrieden stellend 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 (Bild 17) [Lit 9].

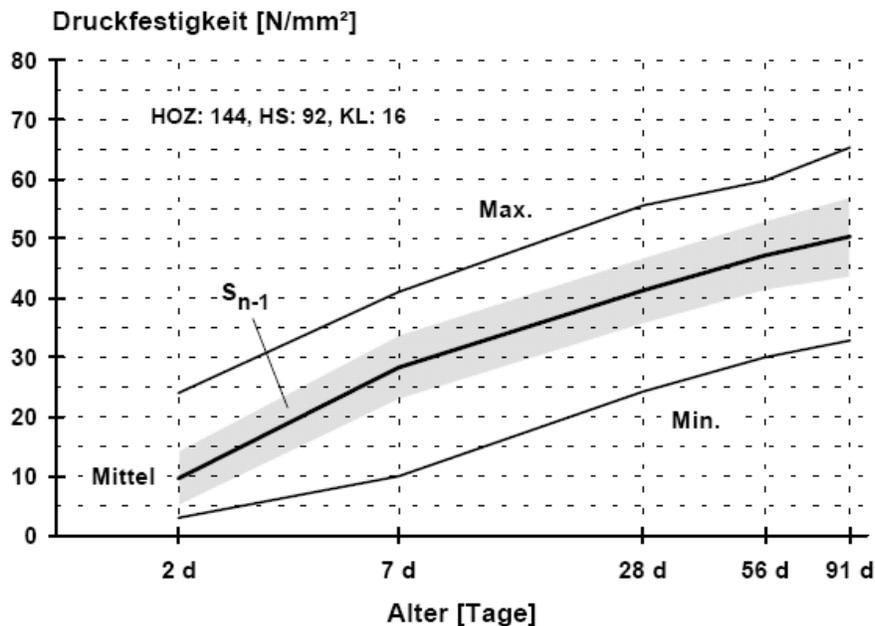


Bild 17: Festigkeitsentwicklung von HOZ mit einem Hüttensand (HS)/Klinker (KL)-Verhältnis von 75/25 ($4200 \text{ cm}^2/\text{g}$) [Lit 9]

2.8.4 Hüttensandhaltige Zemente

Die europäische Zementnorm DIN EN 197-1 [Lit 7] enthält 27 Normzemente. Von diesen können wiederum 9 Hüttensand in unterschiedlichem Umfang enthalten (Tabelle 14). Damit eröffnet die Norm die Möglichkeit, Zemente mit einem höheren Gehalt an latent-hydraulischen, puzzolanischen und inerten Bestandteilen einzusetzen. Insbesondere der Hüttensand kann nunmehr mit bis zu 95 % als ausschließlicher Hauptbestandteil dienen. Diese neue Vielfalt wird in der Anwendung allerdings zum Teil erheblich eingeschränkt [Lit 36].

Die praktische Relevanz der zahlreichen neuen Zemente ist zumindest in Deutschland noch recht gering. Von den 27 Normzementen teilten sich im Jahr 2000 sechs einen Marktanteil von 98 %. Darunter fielen von den Zementen in Tabelle 14 der Hochofenzement und der Portlandhüttensand. Die Bedeutung der verschiedenen Zemente wird auch aus der Verteilung der Zementarten und Festigkeitsklassen auf den Inlandsversand in Deutschland deutlich (Bild 18).

Die Maßnahmen zur CO_2 -Reduzierung im Zuge der Umsetzung des Kyoto-Protokolls werden in Zukunft zu einer Verlagerung führen. Ein Großteil der CO_2 -Emission in der Zementindustrie geht auf die Kalksteinentsäuerung bei der Herstellung des Zementklinkers zurück. Der Ausstoß dieses Treibhausgases kann also elegant durch den vermehrten Einsatz von Zementen mit einem geringeren Klinkeranteil verringert werden. Zugleich werden durch den verminderten Einsatz von Klinker die vorhandenen Ressourcen geschont. Diese Entwicklung ist deutlich aus Bild 19 abzulesen. Während der Anteil CEM I 1996 noch bei etwa 75 % lag, ging er bis 2000 auf etwa 62 % zurück. Diese Verschiebung fand vornehmlich zugunsten der Gruppe der CEM II-Zemente statt, deren Anteil von 10 % auf 24 % zunahm. In 2003 lag der Anteil des CEM I nur noch bei 57 % während der Anteil der CEM II-Zemente bereits über 30 % betrug [Lit 44].

Tabelle 14: Zusammensetzung hüttensandhaltiger Normzemente nach DIN 1164-1 [Lit 5] bzw. DIN EN 197-1 [Lit 7]

Zementart	Kurzbezeichnung	Hauptbestandteile			Nebenbestandteile
		Portlandzementklinker K	Hüttensand S	Sonstige	
Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	80 - 94	6 - 20	-	0 - 5
	CEM II/B-S	65 - 79	21 - 35	-	0 - 5
Portlandkompositzement	CEM II/A-M	80 - 94	6 - 20 ¹		0 - 5
	CEM II/B-M	65 - 79	21 - 35 ¹		0 - 5
Hochofenzement	CEM III/A	35 - 64	36 - 65	-	0 - 5
	CEM III/B	20 - 34	66 - 80	-	0 - 5
	CEM III/C	5 - 19	81 - 95	-	0 - 5
Kompositzement	CEM V/A	40 - 64	18 - 30	18 - 30 ²	0 - 5
	CEM V/B	20 - 38	31 - 50	31 - 50 ²	0 - 5

¹ S, D, P, Q, V, W, T, L und/oder LL

² P, Q und/oder V

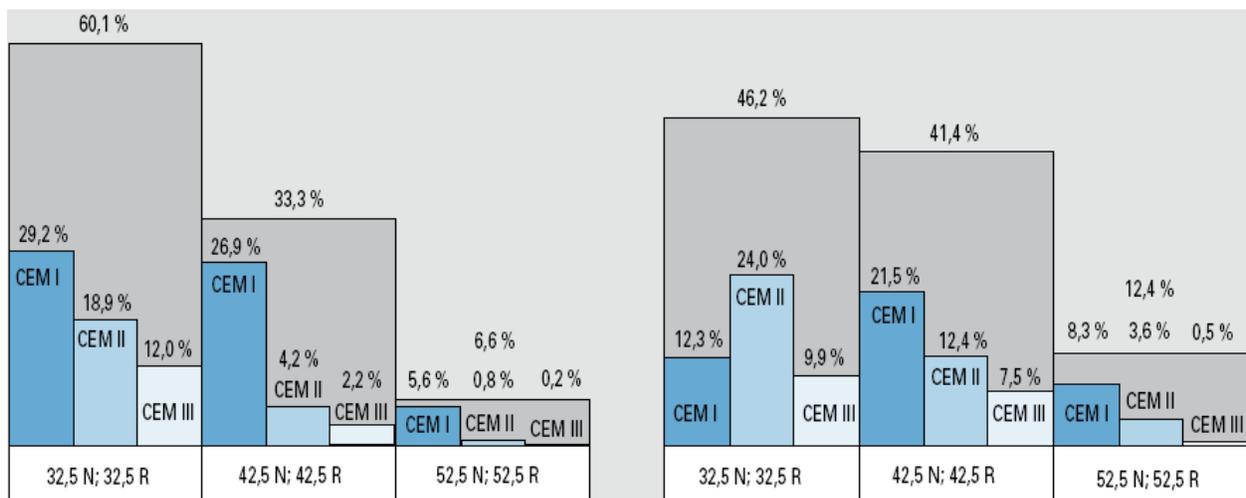


Bild 18: Anteile der Zementarten und Festigkeitsklassen am Inlandsversand in Deutschland in 2000 (links) und 2006 (rechts) [Lit 45]

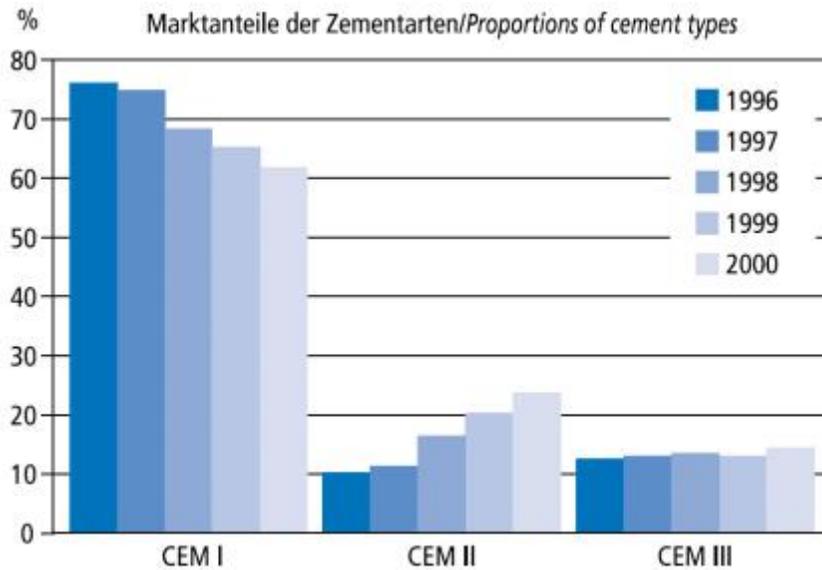


Bild 19: Anteile der Hauptzementarten CEM I, CEM II und CEM III an den inländischen Versandmengen [Lit 36]

2.8.5 Eigenschaften und Einflüsse

2.8.5.1 Porenstruktur [Lit 33]

Der Einsatz hüttensandhaltiger Zemente kann sich positiv auf die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen auswirken, da sich ein dichteres Gefüge der Bindemittelmatrix ausbildet. Bei annähernd gleicher Gesamtporosität weist der Zementstein des Hochofenzements eine feinere Porenstruktur auf als der Zementstein des Portlandzements (Bild 20). Die Verschiebung der Porenradienverteilung führt zu einer geringeren Durchlässigkeit für flüssige und gasförmige Medien und bietet dadurch einen erhöhten Schutz gegen das Eindringen aggressiver Stoffe.

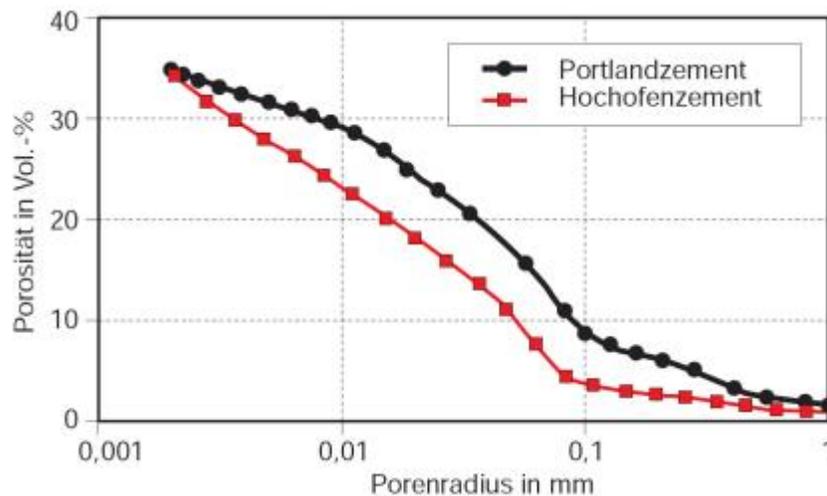


Bild 20: Porenradienverteilung von Portlandzement und Hochofenzement (50 M.-% Hüttensand) [Lit 33]

Die Reaktion des Hüttensands führt im Vergleich zu Portlandzement zu veränderten Reaktionsprodukten, die sich ebenfalls positiv auf die Dauerhaftigkeit auswirken. Bei der latent-

hydraulischen Reaktion des Hüttensandes entsteht so gut wie kein $\text{Ca}(\text{OH})_2$, das sehr empfindlich gegen chemische Angriffe ist. Nachteilig am geringeren $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalt ist die erhöhte Karbonatisierungsgeschwindigkeit, die jedoch durch das dichtere Gefüge gebremst wird.

2.8.5.2 Wirksamer Alkaligehalt

Es ist bekannt, dass der wirksame Alkaligehalt hüttensandhaltiger Zemente auch bei gleichem Gesamtalkaligehalt geringer ist als der von Portlandzementen. Um zu ermitteln, in welcher Weise Hüttensand den wirksamen Alkaligehalt beeinflusst, wurden die Porenlösungen von Betonen analysiert (Bild 21). Die Konzentration der Porenlösung sinkt proportional zum Hüttensandanteil. Wie aus dem rechten Teil des Bildes hervorgeht, ist die Abnahme der Konzentration dabei nahezu unabhängig vom Alkaligehalt des verwendeten Hüttensands. Die Ergebnisse zeigen, dass der wirksame Alkaligehalt hüttensandhaltiger Zemente fast ausschließlich durch den Portlandzementanteil beeinflusst wird. Obwohl der Gesamtalkaligehalt hüttensandhaltiger Zemente kein Maß für den wirksamen Alkaligehalt darstellt, hat er sich über viele Jahre als NA-Kriterium bewährt.

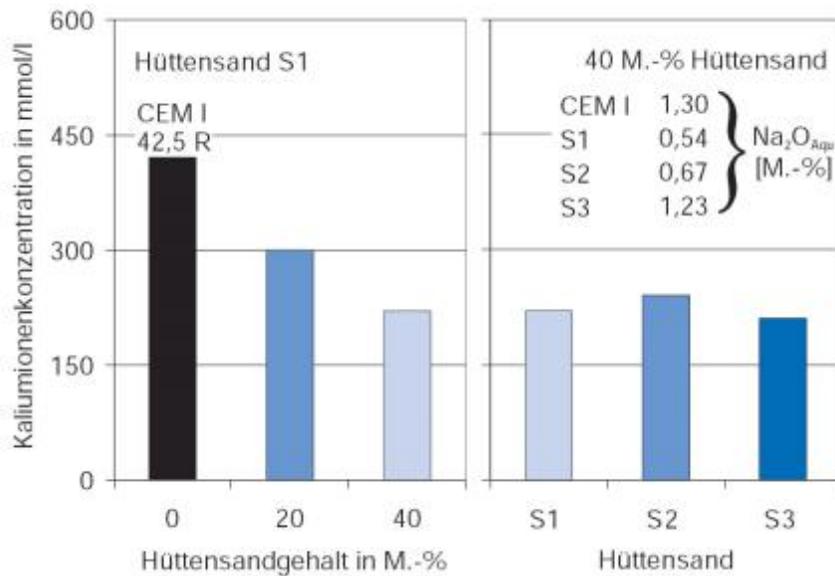


Bild 21: Einfluss von Hüttensand auf die Kaliumkonzentration der Porenlösung von Beton mit alkaliempfindlicher Gesteinskörnung (Alter: 28 d) [Lit 42]

2.8.5.3 Farbe [Lit 32]

Bei der Verwendung hüttensandhaltiger Zemente können nach dem Ausschalen vorübergehend grünlich-blaue Verfärbungen der Oberfläche auftreten (Bild 22). Sie geht meist schon nach kurzer Zeit in das übliche im Vergleich zu Portlandzement hellere Grau über. Ursache der Verfärbung sind geringe Gehalte an Sulfiden im Hüttensand, die bei der Reaktion mit Wasser während des Granulierens des Hüttensandes und später verstärkt bei der Hydratation zu Calciumhydrosulfid $\text{Ca}(\text{SH})_2$ und Polysulfiden, z. B. Calciumpolysulfid CaS_4 , umgewandelt werden. Diese Polysulfide können unter Luftabschluss mit gelösten Metallionen (Eisen, Mangan) zu Metallsulfiden reagieren, die eine sehr intensive grünlich-blaue Farbe haben. Sobald nach dem Entschalen Luft an die abtrocknende Betonoberfläche gelangt, werden die Metallsulfide zu farblosen Metallverbindungen (Sulfate, Sufite) oxidiert. Die Verfärbung verschwindet dadurch.



Bild 22: Blaufärbung eines Fertigteils mit Hochofenzement nach dem Ausschalen [Lit 32]

2.8.5.4 Hydratationswärmeentwicklung

Zemente gelten nach der deutschen Zementnorm DIN 1164-1 [Lit 5] als Zemente mit niedriger Hydratationswärme (NW), wenn die von Ihnen freigesetzte Hydratationswärme nach 7 Tagen maximal 270 J/g beträgt (gemessen nach DIN 1164-8 [Lit 6]). Für die Beurteilung der Zemente bezüglich ihrer NW-Eigenschaft hat sich diese Methode bewährt, sie gestattet aber lediglich die Bestimmung der Hydratationswärme zu einem definierten Zeitpunkt.

Die Hydratationswärme wird wesentlich von der Klinkerzusammensetzung des Zements, der Art und Menge weiterer Haupt- und Nebenbestandteile, Art und Menge des Sulfatträgers sowie der Mahlfeinheit bestimmt. Die Zusammenstellung in Tabelle 15 vermittelt einen Überblick über die mit dem Lösungskalorimeter nach [Lit 6] bestimmte Hydratationswärme für verschiedene Zementarten und Festigkeitsklassen.

Danach sind die meisten Zemente der Festigkeitsklasse Z 25 und Z 35 L (heute 32,5) als NW-Zemente zu klassifizieren. Dazu gehören vor allem die Hochofenzemente CEM III A/B-32,5. Demgegenüber ist nach dieser Zusammenstellung nicht zu erwarten, dass Zemente der Festigkeitsklasse Z 45 L (heute 42,5) die Anforderung an NW-Zemente erfüllen.

Tabelle 15: Hydratationswärme deutscher Zemente, bestimmt als Lösungswärme nach [Lit 6]

Zementfestigkeitsklasse	Hydratationswärme in J/g nach Tagen			
	1	3	7	28
Z 25, Z 35 L	60 - 175	125 - 250	150 - 300	200 - 375
Z 35 F, Z 45 L	125 - 200	200 - 235	275 - 375	300 - 425
Z 45 F, Z 55	200 - 275	300 - 350	325 - 375	375 - 425

Mit der Entwicklung des Hochofenzements CEM III/B 42,5-NW/HS hat die Zementindustrie einen HOZ entwickelt, der zur Sicherung eines schnelleren Baufortschritts eine höhere Festigkeitsentwicklung aufweist und gleichzeitig eine niedrige Hydratationswärme freisetzt. Bild 23 zeigt die Hydratationswärmeentwicklung dieses Zements im Vergleich zu einem CEM I 32,5 und einem CEM III/B 32,5 NW/HS. Alle drei Zemente haben dieselbe Klinkerbasis. Die

Hydratationswärme dieses Zements ist bei gleicher Portlandzementklinkerbasis etwas höher als die eines CEM III/B 32,5-NW/HS. Die Normanforderungen bezüglich der NW-Eigenschaft wird aber in jedem Fall mit ausreichender Sicherheit gewährleistet [Lit 20].

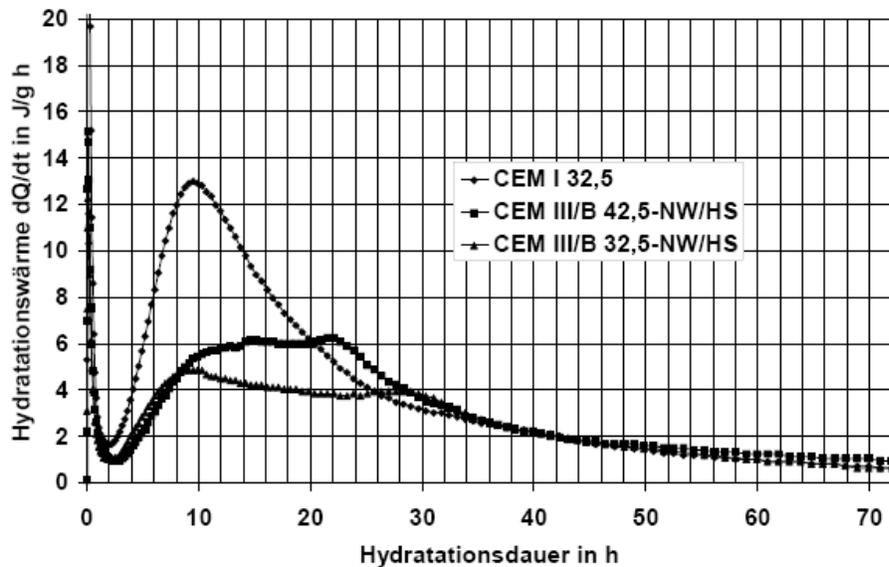


Bild 23: Hydratationswärmeentwicklung von CEM III/B 32,5-NW/HS bzw. CEM III/B 42,5-NW/HS im Vergleich zu einem CEM I 32,5 R [Lit 20]

Die Auswirkung der unterschiedlichen Hydratationswärmeentwicklung auf praktisch ausgeführte Bauteile zeigt Bild 24. Der Vergleich der Temperaturmessungen des Betons der Festigkeitsklasse C20/25 (B 25) mit Hochofenzement CEM III/B 32,5-NW/HS eines Großfundaments und des Betons der Festigkeitsklasse C30/37 (B 35) mit Hochofenzement CEM III/B 42,5-NW/HS eines Stahlbetonbauteils zeigt, dass die Differenz der Maximaltemperaturen des Kernbereichs ca. 5 K beträgt.

Der zeitliche Verlauf der Freisetzung der Hydratationswärme wird maßgeblich vom Hüttensandgehalt bestimmt. Mit steigendem Hüttensandgehalt wird die Kurve in Richtung auf spätere Zeiten verschoben (Bild 25). Hüttensandreiche Zemente eignen sich daher insbesondere für massige Betonbauteile wie Fundamente. Die geringere anfängliche Wärmefreisetzung verringert temperaturbedingte Spannungen und hilft so, Risse im Bauteil zu vermeiden. Im Umkehrschluss sind hüttensandhaltige Zemente für schlanke Bauteile bei niedrigen Außentemperaturen weniger geeignet.

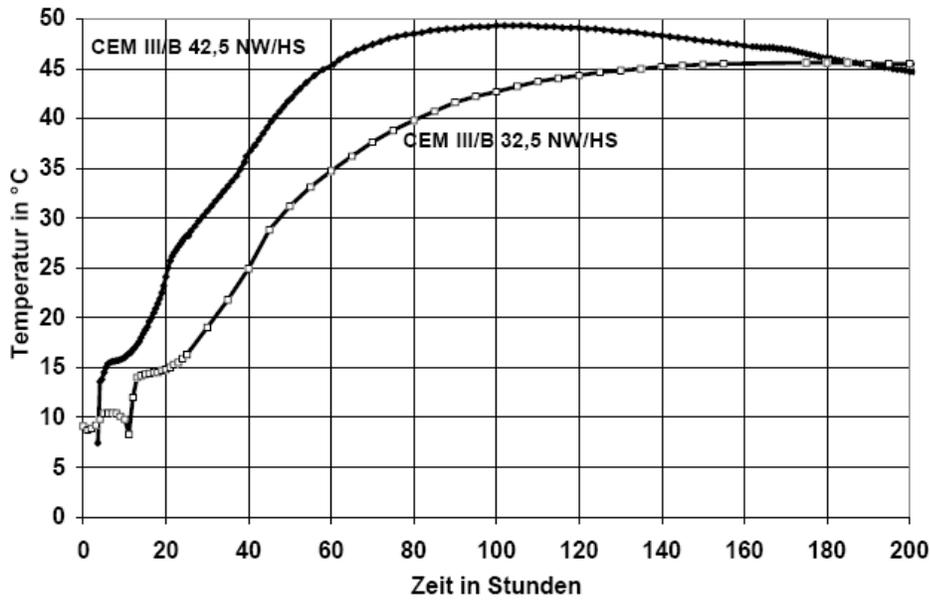


Bild 24: Vergleich der Temperaturentwicklung eines Betons mit Hochofenzement CEM III/B 32,5 und 42,5-NW/HS [Lit 20]

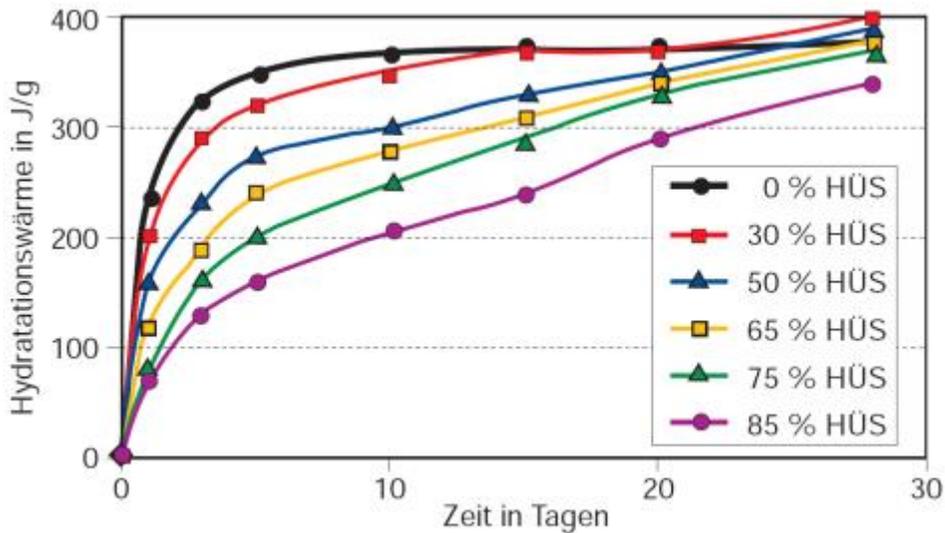


Bild 25: Abhängigkeit der Hydrationswärmeentwicklung von Hüttensandgehalt [Lit 33]

2.8.5.5 Festigkeit

Die Unterschiede im Reaktionsverlauf von Portlandzement und hüttensandhaltigen Zementen wirken sich auf die Festigkeitsentwicklung aus. Die verschiedenen Zemente werden auf die Zielfestigkeit im Alter von 28 Tagen eingestellt. Als Stellgröße wird besonders die Mahlfeinheit benutzt. Wird der Hüttensandanteil erhöht, dann läuft die Anfangsreaktion aufgrund der trägeren latent-hydraulischen Reaktion des Hüttensandes erheblich langsamer ab. Andererseits verfügt der Hüttensand im höheren Alter noch über ein ausgeprägtes Reaktionsvermögen. Daher zeigen hüttensandreiche Zemente eine höhere Nacherhärtung jenseits der 28 Tage (Bild 26) [Lit 33].

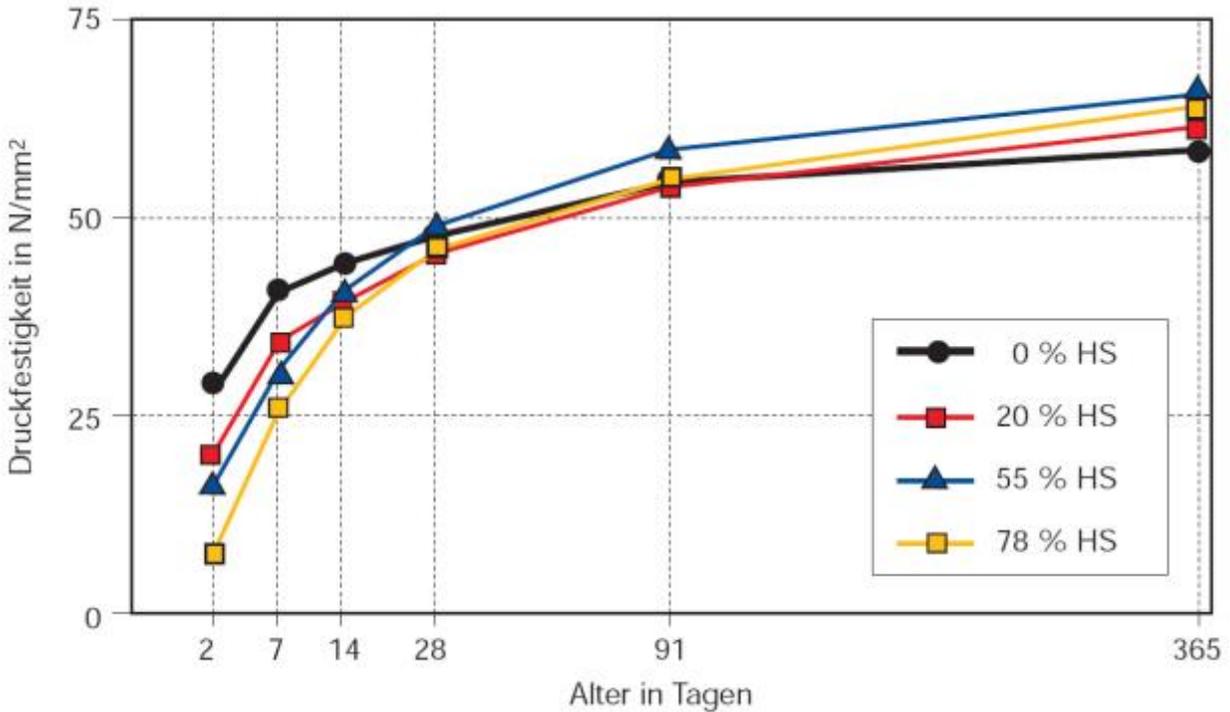


Bild 26: Festigkeitsentwicklung von Mörteln aus Zementen gleicher Festigkeitsklasse in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt [Lit 33]

2.8.5.6 Widerstand gegen chemischen Angriff [Lit 47]

2.8.5.6.1 Chloriddiffusion und Chloridbindung

Beton mit Hochofenzement weist einen deutlich höheren Widerstand gegen das Eindringen von Chloriden auf als Beton mit Portlandzement. Dies wird zum einen verursacht durch die höhere Dichtigkeit des Zementsteins (Tabelle 16), zum anderen durch die Fähigkeit des Hochofenzements, größere Mengen Chlorid adsorptiv zu binden [Lit 37].

Tabelle 16: Diffusionskoeffizient für Chloride [Lit 37]

Zementart	Hüttensandanteil [M.-%]	Diffusionskoeffizient [%]
Portlandzement	-	100
Hochofenzement	40	25
	60	5
	80	1

2.8.5.6.2 Widerstand gegen Kalk lösende Kohlensäure

Beim lösenden Angriff durch Kohlensäure wird der Zementstein von der Oberfläche ausgehend aufgelöst. Der Angriff ist umso intensiver, je größer der zur Verfügung stehende Gehalt an CaO im Zement ist. Der Widerstand hüttensandhaltiger Zemente gegen lösenden Angriff ist daher deutlich größer als der von Portlandzement. In [Lit 24] wurde nach 20 Jahren an Beton mit Portlandzement ($\rho = 375 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$) ein Oberflächenabtrag von 4 bis 6 mm gemessen. Der entsprechende Beton mit Hochofenzement wies nur den halben Abtrag auf.

2.8.5.6.3 Widerstand gegen Ammoniumsalze

Der Widerstand gegen ammoniumsalzhaltige Wässer ist für Naturzugkühltürme und Fundamente in der Nähe von Gaswerken und Mülldeponien, sowie beim Kontakt mit Abwasser und Mineraldünger von Bedeutung. Bis zu einer Konzentration von 120 mg NH₄⁺/l war Mörtel mit Hochofenzement quasi unempfindlich, während die Vergleichsproben mit Portlandzement nur noch etwa 60 % ihrer Ausgangsfestigkeit besaßen.

2.8.5.6.4 Widerstand gegen sulfathaltige Wässer [Lit 37]

Sulfathaltige Wässer und Böden üben einen treibenden Angriff aus. Dabei reagieren die Sulfationen mit den Klinkerphasen C₃A und C₄AF bzw. den Hydratphasen C₃AH₆ oder Monosulfat unter Volumenzunahme zu Ettringit. Der Sulfatwiderstand von Hüttenszement geht unabhängig vom C₃A-Gehalt zunächst mit steigendem Hüttensandanteil zurück, ehe er bei höheren Hüttensandgehalten (> 60 %) auf hohe Werte ansteigt. Ursache ist der hohe Diffusionswiderstand des erhärteten Hochofenzements gegen die Sulfationen, der jedoch erst sicher ab einem Hüttensandanteil von 65 % gegeben ist.

2.8.5.6.5 Widerstand gegen Alkalireaktion

Der wirksame Alkaligehalt des Betons stammt vornehmlich aus dem Zement (vgl. Kapitel 2.8.5.2). Die im Hochofenzement enthaltenen Alkalien sind im glasigen Hüttensand gebunden und gehen von dort nur sehr langsam in Lösung. Daher wird nur ein Teil an die Porenlösung abgegeben. Eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion findet erst statt, wenn der Alkaligehalt eine bestimmte Schwelle überschritten hat. Der höchstens zulässige Wert für das maßgebende Na₂O-Äquivalent liegt bei Hochofenzement mit ≥ 65 % Hüttensand bei 2,00 M.-% und bei Hochofenzementen mit ≥ 50 % Hüttensand bei 1,10 M.-% (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 17: Anforderungen an Zement-NA mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt [Lit 47]

Zementart	CEM I-NA	CEM II-NA	CEM III/A-NA		CEM III/B-NA
			Hüttensandgehalt [M.-%]		
			< 50	50 ... 65	≥ 66
Na ₂ O-Äquivalent [M.-%]	≤ 0,60	≤ 0,60	≤ 0,60	≤ 1,10	≤ 2,00

2.8.5.6.6 Widerstand gegen Frost und Frost-Taumittel Angriff

Hochofenzemente weisen ab einem Hüttensandgehalt von etwa 50 % Besonderheiten im Hinblick auf den Frost-Taumittel-Widerstand auf. Mit steigendem Hüttensandgehalt nimmt die Wirkung der durch LP-Mittel künstlich eingeführten Mikroluftporen ab. Dies hat zur Folge, dass der Frost-Taumittel-Widerstand von Beton, der mit CEM III/B hergestellt wird, durch die Zugabe von LP-Mittel nicht erhöht werden kann [Lit 37].

Für den Widerstand gegen einen Frostangriff ist die Dichtigkeit des Zementsteingefüges zum Zeitpunkt des Frostangriffs von Bedeutung, die durch den Hydratationsgrad beschrieben werden kann. Im Vergleich zu einem Portlandzement erreicht Hochofenzement etwa ab einem Hydratationsgrad von 50 – 60 % eine vergleichbare Dichtigkeit und damit einen entsprechenden Frostwiderstand. Oberhalb eines Hydratationsgrades von 60 % übertrifft der Frostwiderstand von Hochofenzement den von Portlandzement.

2.9 Sonstige Metallschlacken

2.9.1 Schlacke aus der Kupfererzeugung (CuS)

Schlacke aus der Kupfererzeugung ist eine Metallhüttenschlacke (MHS), die bei der pyrotechnischen Verhüttung von Primär- und/oder Sekundärrohstoffen (Kupferkonzentrate, Buntmetallschrott etc.) im Schmelzverfahren, Schachtofenbetrieb oder Elektroöfen entsteht [Lit 40]. Sie werden auch als Eisensilikatschlacken bezeichnet.

2.9.1.1 Erzeugung

Die Erzeugung von Kupfer erfolgt in mehreren nacheinander ablaufenden Schmelzprozessen. In der ersten Stufe wird neben dem Zwischenprodukt Kupferstein bzw. Schwarzkupfer eine Schlackenschmelze erzeugt, die sich aus den Nebenbestandteilen der kupferhaltigen Erzkonzentrate und dem zugegebenen Sand zusammensetzt. Für die flüssige Schlacke (1300 °C) bestehen zwei Varianten der Weiterverarbeitung. Bei der langsamen Abkühlung in Spitztöpfen entsteht kristalline Schlacke in großen Blöcken. Das erkaltete Eisensilikat-Gestein mit Kantenlängen bis ca. 1000 mm wird in Brech- und Siebanlage zu Produkten verschiedener Korngrößen verarbeitet:

- Wasserbausteine > 100 mm = ca. 70 %,
- Wasserbausteine < 100 mm = ca. 18 % und
- Mineralstoffe < 50 mm = ca. 12 %

die anschließend zu Mineralstoffen mit definierter Korngrößenverteilung (Schotter, Edelsplitt, Brechsand und Edelbrechsand) aufbereitet werden (CUS).

Wird die flüssige Schlacke über eine Granuliertrinne in ein Wasserbad geleitet, entsteht ein Granulat mit glasig amorpher Grundstruktur und einer Korngröße 3 mm (Bild 27). Als Gemisch 0/5 mm wird es ohne weitere Aufbereitung im Straßenbau verwendet (CUG).

Charakteristische Merkmale des Eisensilikat-Gesteins sind seine hohe Dichte und Festigkeit sowie seine Oberflächenrauigkeit. Hinsichtlich Mineralogie, Petrographie und Chemismus sowie durch seine Genese aus einer überwiegend silikatischen Schmelze ist es vergleichbar mit den in der Natur vorkommenden magmatischen Gesteinen wie Gabbro/Norit, Basalt, Diabas oder Dunit [Lit 29].

Die Kupferherstellung und damit auch der Schlackenanfall ist an drei Standorten konzentriert: Hamburg, Lünen (CUS und CUG) und Hettstedt (CUS). Zusätzlich existiert ein Bestand an alter Stückschlacke in Helbra (CUS) aus einer bis 1990 betriebenen Kupfererzeugung. Jährlich entstehen ca. 0,76 Mio. t.



Bild 27: Granulat aus Kupferschlacke [Lit 29]

Stückschlacken aus der Kupfererzeugung bestehen im Wesentlichen aus Fe_2O_3 , SiO_2 (90 M.-%). Hinzu kommen in nennenswerten Mengen CaO , Al_2O_3 und MgO . Tabelle 18 enthält Angaben zu den Bereichen für die Hauptbestandteile von Stückschlacken aus der Kupfererzeugung, die mit Hilfe von Röntgenfluoreszenz-Analysen bestimmt wurden. Tabelle 19 enthält die Bereiche für die Nebenbestandteile von Stückschlacken aus der Kupfererzeugung.

Tabelle 18: Zusammenstellung der Hauptbestandteile von Stückschlacken aus der Kupfererzeugung

Feststoffanalyse				
	Dimension	CUS, modern [Lit 25]	CUS, alt [Lit 25]	CUS, international [Lit 2]
SiO_2	[M.-%]	20,0 - 35,0	47,2 - 48,3	41,0 - 24,7
Al_2O_3	[M.-%]	2,7 - 5,8	13,1 - 15,2	2,4 - 15,6
Fe_2O_3	[M.-%]	44,0 - 68,0	5,2 - 5,8	39,7 - 47,8 (Fe)
MnO	[M.-%]	0,06 - 0,1	0,4 - 0,5	0,03 - 0,042 (Mn)
CaO	[M.-%]	0,9 - 11,0	13,4 - 14,6	0,7 - 17,4
MgO	[M.-%]	1,1 - 3,2	6,5 - 7,9	1,0 - 3,5
TiO_2	[M.-%]	0,2 - 0,6	0,8 - 0,9	
Na_2O	[M.-%]	0,08 - 2,1	1,4 - 1,6	
K_2O	[M.-%]	0,4 - 1,5	3,3 - 3,7	
P_2O_5	[M.-%]	0,08 - 0,3	0,2 - 0,3	
SO_3	[M.-%]	0,3 - 2,5	0,2 - 0,3	1,5 - 0,1 (S)
Cl	[M.-%]	< 0,01	0,01	
F	[M.-%]	< 0,02 - 0,35	0,05	

Schlacken aus der Kupfererzeugung enthalten als Hauptphasen Fayalit Fe_2SiO_4 in Stückschlacken bzw. amorphe Glasphasen im Granulat. Als Nebenphasen sind Magnetit Fe_3O_4 und Chromit

FeCr₂O₄ zu finden. Sulfide, Zinnstein SnO₂ und Korund Al₂O₃ sind in Spuren vorhanden.

Charakteristische Merkmale dieses Eisensilikat-Granulats sind seine hohe Dichte und Festigkeit sowie z. T. seine Oberflächenrauigkeit. Hinsichtlich Mineralogie, Petrographie und Chemismus sowie durch seine Genese aus einer überwiegend silikatischen Schmelze ist es vergleichbar mit den in der Natur vorkommenden vulkanischen Gläsern wie Obsidian.

Tabelle 19: Zusammenstellung der Nebenbestandteile von Stückschlacken aus der Kupfererzeugung

Feststoffanalyse				
	Dimension	CUS, modern [Lit 25]	CUS, alt [Lit 25]	CUS, international [Lit 2]
As	[mg/kg]	229 - 1.229	51	
Co	[mg/kg]	110 - 377	162	1.040 - 4.000
Cr	[mg/kg]	15 - 1.043	179	
Cu	[mg/kg]	2.658 - 14.248	823	
Mo	[mg/kg]	1.464 - 3.394	371	
Ni	[mg/kg]	< 3 - 90	61	14 - 600
Pb	[mg/kg]	485 - 4.807	226	
Sb	[mg/kg]	304 - 706	5	
Sn	[mg/kg]	52 - 195	3	
Zn	[mg/kg]	6.698 - 16.114	15.769	500 - 7.220
Cl	[mg/kg]	20 - 70	130	
SO ₄	[mg/kg]	3.000 - 10.679	3.000	

2.9.1.2 Umwelttechnische Parameter (CuS)

Die umwelttechnische Eignung der Schlacken aus der Kupfererzeugung für die verschiedenen Einsatzgebiete wird anhand der Eluate festgelegt. Die für Stückschlacken aus der Kupfererzeugung mit dem DEV-S4-Verfahren gemessenen eluierbaren Bestandteile enthält Tabelle 20.

Damit Stückschlacken (CuS) und granulierten Schlacken (CuG) aus der Kupfererzeugung eingesetzt werden können, sind zum Beispiel die in Tabelle 21 aufgeführten wasserwirtschaftlichen Anforderungen für die Eluatanalyse nach TL Min-StB 2000 [Lit 40] einzuhalten. Die Grenzwerte in [Lit 40] für die elektrische Leitfähigkeit und den Sulfatgehalt dürfen geringfügig (um maximal 20 %) überschritten werden, wenn dies nicht systematisch erfolgt. Eine systematische Überschreitung liegt vor, wenn der zulässige Grenzwert eines Merkmals bei zwei aufeinander folgenden Fremdüberwachungsprüfungen überschritten wird.

Tabelle 20: Zusammenstellung der Bereiche für Eluatwerte von Stückschlacken aus der Kupfererzeugung

Eluatanalyse			
	Dimension	CUS, modern [Lit 25]	CUS, alt [Lit 25]
As	[µg/l]	0,622 - 6,201	9,142
Cd	[µg/l]	0,153 - 1,498	0,090
Co	[µg/l]	0,44 - < 10	1,02
Cr	[µg/l]	0,76 - < 10	1,21
Cu	[µg/l]	9,65 - 109	47,09
Hg	[µg/l]	< 0,005	< 0,005
Mo	[µg/l]	0,90 - 44,98	16,00
Ni	[µg/l]	1,17 - < 50	4,32
Pb	[µg/l]	5,1 - < 100	12,54
Sb	[µg/l]	11,93 - 73,63	1,06
Se	[µg/l]	0,03 - 0,23	0,42
Zn	[µg/l]	21,93 - < 500	73,08
pH-Wert		6,57 - 6,97	7,60
elektrische Leitfähigkeit	[µS/cm]	12,5 - 34,7	29,7

Tabelle 21: Richt- und Grenzwerte für wasserwirtschaftliche Anforderungen an Metallhüttenschlacke

Eluatanalyse		
	Dimension	Anforderungen
Cu	[µg/l]	100
Pb	[µg/l]	100
Zn	[µg/l]	100
pH-Wert		6 - 10
elektrische Leitfähigkeit	[µS/cm]	70

2.9.1.3 Bautechnische Eigenschaften und Anforderungen

CUS und CUG aus der heutigen Produktion entsprechen in ihrer Rohdichte dem Typ MHS-1, das Material aus der Halde in Helbra (CUS) entspricht dem Typ MHS-2.

Als Maß für die Porigkeit von CUS sind die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und die Schüttdichte festzustellen. CUS muss die in Tabelle 22 genannten Grenzen einhalten. Die Schüttdichte von CUG muss $\geq 1,8 \text{ g/cm}^3$ sein.

Tabelle 22: Erfahrungswerte und Anforderungen für bautechnische Eigenschaften von Metallhüttenschlacke

Eigenschaft	Dimension	MHS-1	MHS-2
Rohdichte ρ_R	[g/cm ³]	3,4 - 4,0	2,6 - 3,5
Schüttdichte	[g/cm ³]	≥ 1,8	≥ 1,4
Wasseraufnahme $W_{m,a}$	[M.-%]	< 0,5	< 0,5
Raumbeständigkeit		gegeben	gegeben
Korngrößenverteilung		Einzelkörnungen oder Korngemische	
Kornform		kubisch	
Druckfestigkeit β_D	[N/mm ²]	> 150	> 80
Widerstandsfähigkeit gegen Schlag			
- Splitt/Kies SZ _{8/12}	[M.-%]	18 - ≤ 25	22 - ≤ 34

Die Sollwerte der Druckfestigkeit werden von MHS zum Teil sehr deutlich übertroffen.

MHS hat infolge der kantigen Körner eine hohe Tragfähigkeit. Der Reibungswinkel wird mit 40 – 53 ° angegeben [Lit 28].

Radioaktivität

Die bisher vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen, dass es im Mansfelder Raum (Halde in Helbra) Belastungen sowohl durch konventionelle Schadstoffe als auch durch Radionuklide gibt. Bei der Verwendung von Schlacken aus der Verhüttung des Erzes führen die darin enthaltenen Radionuklide zu einer Erhöhung der Ortsdosisleistung. Es wird von der Strahlenschutzkommission (SSK) empfohlen [Lit 35], auf die Verwendung von Schlackesteinen sowie von Schlacken als Gesteinskörnung beim Neubau von Häusern zu verzichten.

Es bestehen keine Bedenken, die Kupferschlacke im Straßenbau für den Einbau in Tragschichten zu verwenden. Durch eine Straßendecke von ca. 10 cm Dicke wird die Ortsdosisleistung auf etwa die Hälfte reduziert. Die resultierende Dosisleistung liegt dann in dem Bereich, der aus Messungen auf granitgepflasterten Straßen und Plätzen bekannt ist [Lit 35].

Nach TL Min-StB 2000 [Lit 40] kann CUS mit einer mittleren spezifischen Aktivität von 0,2 Bq/g ohne Einschränkung im Straßenbau eingesetzt werden. Oberhalb von 0,2 Bq/g darf CUS nur mit Zustimmung der für den Vollzug des Strahlenschutzes zuständigen Landesbehörde aufbereitet und in Straßenbau verwendet werden.

2.9.1.4 Einsatzgebiete

MHS wird als CUS u. a. wegen seiner hohen Dichte als Wasserbausteine in Häfen, an Flüssen und im Küstenschutz eingesetzt. Gegenüber Naturstein kann so bei gleichem Flächengewicht die Einbaustärke und damit der erforderliche Aushub reduziert werden.

Die Entwicklung der letzten 25 Jahre hat in den Wasserstraßen, Häfen und dazugehörigen konstruktiven Bauwerken, wie Schleusen, Kaianlagen usw., zu erheblich höheren Belastungen geführt. Daraus resultiert häufig eine größere Erosion, der in vielen Fällen mit starren Konstruktionen oder Baustoffen mit zu geringen Gewichten nicht begegnet werden kann. Aus der Praxis haben sich folgende Anforderungen ergeben:

- Es sollte Material mit einem möglichst großen Raumgewicht und einem hohen inneren Reibungswinkel (Schotter, geeignete Metallhüttenschlacke) verwendet werden.
- Aus statischen Gründen ist eine bestimmte Auflast vor der Kaianlage erforderlich
- Das Schüttgewicht unter Auftrieb sollte ca. $1,8 \text{ kg/dm}^3$ betragen.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit als Dränageschicht unter der Oberflächenabdeckung einer Deponie zeigt Bild 28.

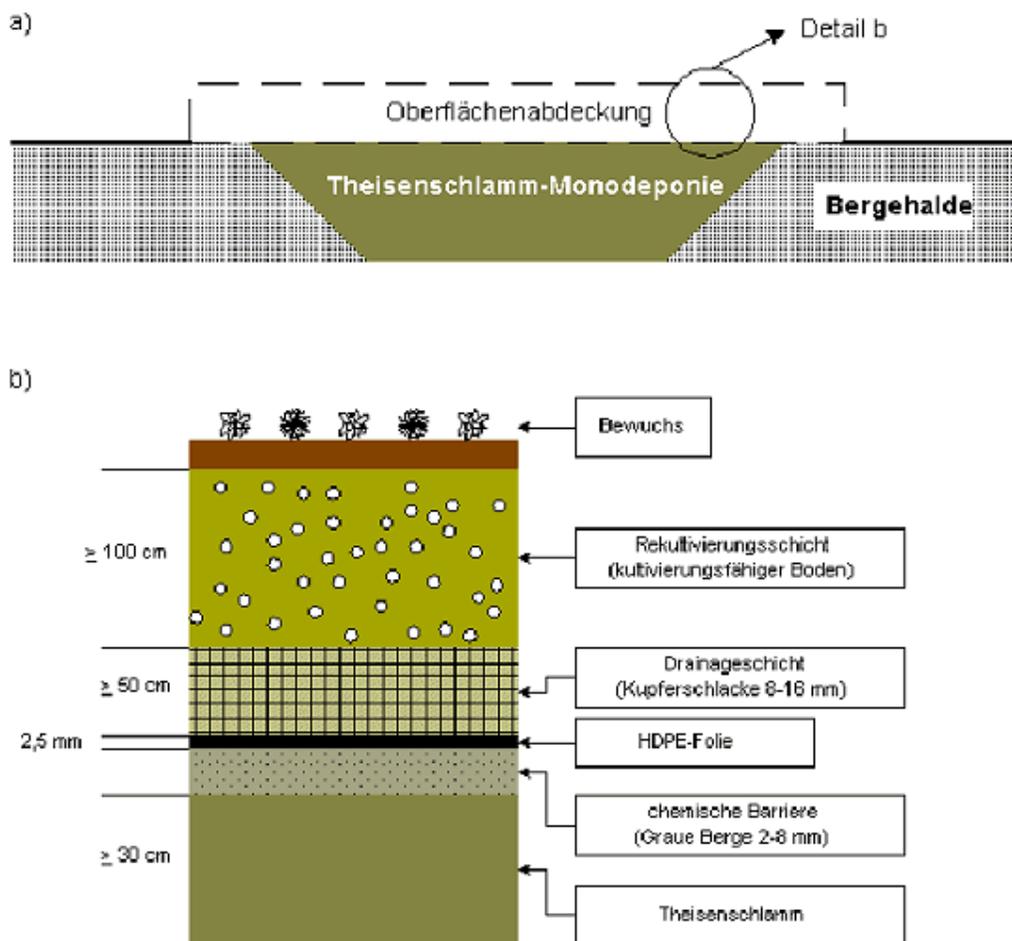


Bild 28: Kupferschlacke für eine Dränschicht oberhalb der Kunststoffdichtungsbahn (siehe schematische Darstellung) [Lit 28]

Neben den bereits genannten Anwendungen kommt CUG nach DIN EN ISO 11126-3 als Strahlmittel zum Einsatz. Das Eisensilikat-Granulat wird eingesetzt zur Entfernung von Rost, Zunder und Farben im

- Kessel-, Waggon-, Schiffbau,
- Stahl- und Brückenbau,

- Behälter und Apparatebau und
- in der Gießereindustrie.

Es hat hier den Quarzsand ersetzt, dessen Anwendung als Strahlgut wegen der Gefahr der Silikose seit einiger Zeit verboten ist. Die Glasphase und die mineralischen Phasen des Eisensilikat-Granulats sind eng miteinander verwachsen und verschweißt. Der harte Glasanteil und der hohe Verschweißungsgrad sind verantwortlich für die hervorragenden technischen Eigenschaften (hohe Abrasivität) des Granulats.

2.9.2 Gießereirestsand (GRS)

Gießereirestsand ist ein rieselfähiger Sand, der vorwiegend aus Quarzsand besteht. Er fällt in der Eisen-, Stahl-, Temper- und Nichteisen-Metallgießerei als Reststoff an.

2.9.2.1 Entstehung [Lit 28, Lit 40]

Gussteile aus Metall werden i.d.R. durch Sandguss in verlorenen Formen hergestellt. Die Sande sind in der Regel Quarzsande; bei speziellen Anwendungen werden Chromit- und Zirkonsande zusätzlich eingesetzt. Dabei muss zwischen den Formen, die die Außenkonturen des Gussteiles abbilden, und den Kernen, die die Innenkonturen nachbilden, unterschieden werden. Bei der Herstellung der äußeren Formen wird überwiegend Bentonit als Bindemittel eingesetzt. Die Herstellung der Kerne erfolgt auf Basis harz- oder wasserglas-gebundener Sande. Weitere Komponenten werden zugemischt, z.B. Kohlenstoffträger zur Verbesserung der Gussoberfläche von Eisengussteilen. Die Temperaturbeanspruchung während des Gießens führt zum teilweisen Totbrennen des Bentonits und zur Pyrolyse der organischen Bestandteile, wobei sich die Pyrolyseprodukte auf den Sandoberflächen ablagern können. Eine mögliche Schwarzfärbung des GRS wird vor allem durch den prozessbedingt zugesetzten Kohlenstaub verursacht.

Die Rückgewinnung des Formstoffs, die im Sinne der Schaffung interner Stoffkreisläufe zunehmend angestrebt wird, erfolgt in mehreren Stufen. Zunächst erfolgt eine mechanische Aufbereitung, bei welcher Knollen zerkleinert, Fremdbestandteile sowie Überkorn und Unterkorn abgeschieden werden. Es schließen sich eine mechanisch / pneumatische sowie eine thermische Regenerierung an. Trotz dieser internen Verwertung fallen bis heute nicht unerhebliche Mengen an Gießereirestsanden an, deren überwiegender Teil Formrestsande sind. Daneben treten Kernrestsande und Stäube aus der Formstoffaufbereitung auf. Nach LAGA [Lit 19] sollen die Stäube separat, nicht zusammen mit den Sanden, entsorgt werden.

Gießereirestsande können an vielen Standorten in ganz unterschiedlicher Tonnage entstehen, da sie vom handwerklich geführten Kleinbetrieb bis zur industriellen Fertigung im Einsatz sind. Das jährliche Aufkommen lag 1999 bei 1,6 Mio. t. Durch die Bemühungen um eine interne Kreislaufführung nimmt die Menge tendenziell ab.

2.9.2.2 Zusammensetzung (GRS) [Lit 28]

Die Zusammensetzung der in den Gießereirestsanden enthaltenen Oxide hängt ab von der Gussart, dem Gießverfahren und dem Regenerierungsverfahren. Form- und Kernrestsande weisen deutlich höhere SiO₂-Gehalte als Stäube und Sande aus der Putzerei auf (Bild 29). An hochwertige Gießereisande werden folgende Qualitätsanforderungen gestellt:

- SiO₂-Gehalt > 97 %, Fe₂O₃-Gehalt < 0,1 %, Al₂O₃-Gehalt < 0,5 %

- Korngrößen < 0,02 mm (Schlammkornanteil) max. 0,1 %
- überwiegend kantengerundete Kornform und glatte Kornoberfläche, Korngefüge monokristallin
- Sinterbeginn > 1.500 C
- frei von karbonatischen Bestandteilen
- definierte Korngrößenverteilung

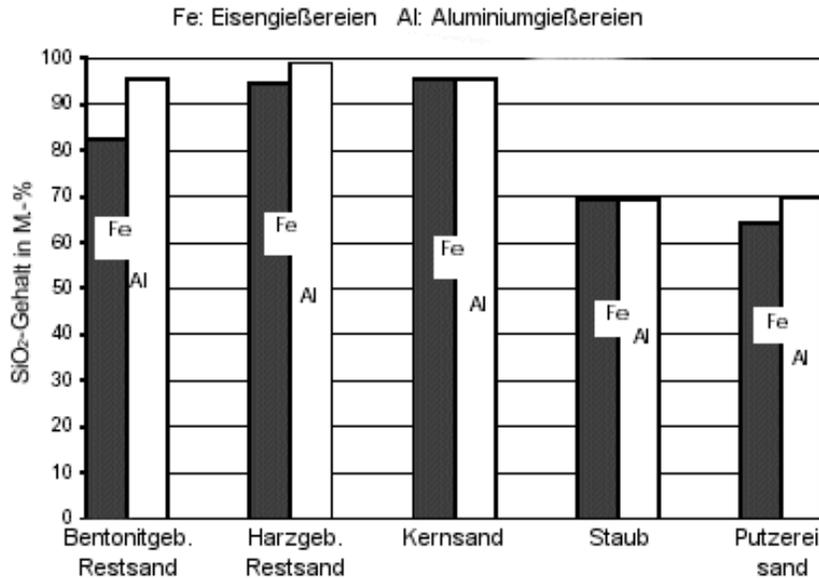


Bild 29: SiO₂-Gehalte in Gießereireststäuben und -sanden [Lit 28]

Tabelle 23: Bereiche für SiO₂-Gehalte und Nebenbestandteile von Gießereirestsanden

Feststoffanalyse			
	Dimension	Eisengießereien / Bereiche aus 6 Einzelwerten [Lit 49]	Aluminiumgießerei / aus einem Einzelwert [Lit 49]
Glühverlust	[M.-%]	1,8 - 12,6	0,9
SiO ₂	[M.-%]	77,0 - 81,3	95,7
Aktivbentonit	[M.-%]	3,4 - 15,2	11,1
C	[M.-%]	1,21 - 9,13	0,55
S	[M.-%]	0,037 - 0,329	n.b.
Elektrische Leitfähigkeit	[μS/cm]	170 - 650	91

Als Phasenbestandteile enthalten GRS Quarz, totgebrannten Bentonit, aktiven Bentonit und Pyrolyseprodukte.

2.9.2.3 Umwelttechnische Parameter (GRS)

Schwermetallgehalte im GRS sind bis auf Ausnahmen (Chromerzsand, Blei- und Messinggießereien) nicht relevant. Nach LAGA [Lit 19] ist der Einsatz von GRS nur entsprechend der Einbauklasse Z 2 möglich.

Die umwelttechnische Eignung der Gießereirestsande für die verschiedenen Einsatzgebiete wird anhand der Eluate festgelegt. Die stoffspezifischen wasserwirtschaftlichen Anforderungen sind in [Lit 40] und der LAGA-Mitteilung [Lit 19] enthalten und in Tabelle 24 zusammengefasst. Die Feststoffwerte stellen kein Ausschlusskriterium dar, sondern dienen zur Zeit nur zur Erfahrungssammlung.

Tabelle 24: Zusammenstellung der Bereiche für Eluat/ und Feststoffwerte von Gießereirestsanden entsprechend TL Min-StB 2000 und LAGA Z2

Eluatanalyse			Feststoffanalyse		
	Dimension			Dimension	
As	[µg/l]	60	As	[mg/kg]	
Cd	[µg/l]	10	Cd	[mg/kg]	5
Cr _{ges.}	[µg/l]	150	Cr _{ges.}	[mg/kg]	600
Cu	[µg/l]	300	Cu	[mg/kg]	300
Ni	[µg/l]	150	Ni	[mg/kg]	300
Pb	[µg/l]	200	Pb	[mg/kg]	100
Zn	[µg/l]	600	Zn	[mg/kg]	500
F	[mg/l]	1	EOX ¹	[mg/kg]	3
DOC ²	[mg/l]	20	MKW ³	[mg/kg]	150
NH ₄ -N	[mg/l]	1	PAK EPA ⁴	[mg/kg]	20
Phenol-Index		0,1			
pH-Wert		5,5 - 12			

¹ Gelöster organisch gebundener Kohlenstoff

² Extrahierbare organische Halogenverbindung

³ Mineralöl-Kohlenwasserstoff

⁴ Polyzyklische aromatisierte Kohlenwasserstoffe gemäß environmental protection agency

Beim Einsatz in Asphalttragschichten unter einer wasserundurchlässigen Deckschicht gelten folgende Anforderungen:

- $F \leq 3\text{mg/l}$;
- $\text{DOC} \leq 250\text{mg/l}$;
- $\text{NH}_4\text{-N} \leq 8\text{ mg/l}$ und
- $\text{Phenol-Index} \leq 1\text{mg/l}$.

Die Prüfung auf Arsen und Schwermetalle kann entfallen.

2.9.2.4 Bautechnische Eigenschaften und Anforderungen

GRS muss so aufbereitet werden, dass er eine gleich bleibende Qualität aufweist. Fremdkörper (stückige Metalle, Schlacken, Ofen- und Pfannenausbruch) dürfen nicht in schädlichen Mengen

enthalten sein. Ein Vermischen von GRS mit anderen Reststoffen des Gießereiverfahrens ist nicht zulässig. GRS ist in speziell dafür vorgesehenen Vorhalteeinrichtungen zu sammeln und in durchmischem Zustand auszuliefern. Tabelle 25 enthält einige stoffspezifische Daten für GRS.

Tabelle 25: Stoffspezifische bautechnische Daten für Gießereirestsande

Rohdichte	[g/cm ³]	2,60
Mittlere Korngröße	[mm]	0,13 - 0,29
Anteil < 125 µm	[M.-%]	3,1 - 12,2 (48,8)

Die Raumbeständigkeit des GRS für Tragschichten ohne Bindemittel ist im CBR-Versuch zu beurteilen. Bei alleiniger Verwendung von GRS darf das Schwellmaß 2 % nicht überschreiten. Gleichzeitig muss der CBR-Wert nach dem Versuch 80 % des Ausgangswertes erreichen. Beim Einsatz als Zusatzkomponente mit einem Anteil von ≤ 15 M.-% im Gemisch aus Gesteinskörnungen darf das Schwellmaß 4 % nicht überschreiten. Die Bestimmung des CBR-Wertes nach Wasserlagerung erfolgt ebenfalls am Gemisch.

Bei der Verwendung von GRS in Asphalttragschichten darf die Quellung 1,3 Vol.-% nicht überschreiten.

GRS darf nicht mehr als 15 M.-% Anteile < 0,063 mm enthalten.

2.9.2.5 Einsatzgebiete

Der feinkörnige Quarzsand im GRS bildet ein tragfähiges Gerüst. Er wird eingesetzt:

- im Erd- und Straßenbau außerhalb von Wasserschutzgebieten,
- in Asphaltmischungen unter dichten Abdeckungen,
- für Rekultivierungsmaßnahmen,
- als Hohlraumfüller im Bergversatz,
- als Deponiebaustoff und
- zur Schachtverfüllung.

Wegen seiner Kohlenstoff- und Tonanteile wird GRS auch in der Zementherstellung als Sekundärrohstoff genutzt.

2.9.3 Gießerei-Kupolofenstückschlacke (GKOS)

2.9.3.1 Gewinnung und Aufbereitung

Zum Umschmelzen von Gemischen und zum Erschmelzen von Gusseisen und Temperguss werden in Gießereien hohe, mit Schamotte ausgekleidete Öfen (Kupolöfen) aus Stahlblech eingesetzt. Ein 17 m hoher Ofen kann eine Kapazität von 62000 t/a Gusseisen haben. In den Kupolöfen fallen größere Mengen Schlacke, bezogen auf den metallischen Einsatz, an. Die Schlacke wird dabei vorwiegend aus den oxidischen Stoffen gebildet, die sich nicht im flüssigen Metall lösen. Sie entsteht aus Anhaftungen an den Einsatzstoffen wie Sand oder aus Zuschlagstoffen zum Metalleinsatz wie Kalkstein.

Kupolofenstückschlacke wird als flüssige Gesteinsschmelze in Schlackenpfannen gegossen und erstarrt dort zu einem kristallinen wenig porigen Gestein. Aufgrund ihrer technologischen Eigenschaften ist sie vergleichbar mit einer Hochofenstückschlacke gemäß DIN 4301.

GKOS wird vor dem Einsatz im Straßenbau im Allgemeinen gebrochen und klassiert. Fremdkörper (stückige Metalle, Ofen- oder Pfannenausbruch) dürfen nicht in schädlichen Mengen enthalten sein.

Schlackengranulat entsteht beim Granulieren der flüssigen Schlacke in einem Wasserstrahl. Das Granulat weist ein gleichmäßigeres Korngrößenspektrum sowie eine geringere Dichte als Kupolofenstückschlacke auf.

2.9.3.2 Bautechnische Anforderungen

Die Rohdichte von GKOS ist erfahrungsgemäß $\geq 2,1 \text{ g/cm}^3$. Gießerei-Kupolofenstückschlacke ist aufgrund ihrer Wasseraufnahme und ihrer Schüttdichte den Qualitätsklassen für Hochofenstückschlacke (HOS) nach Tabelle 10 zuzuordnen.

Gießerei-Kupolofenstückschlacke darf keinen Kalk- und Eisenzerfall aufweisen.

Die Ergebnisse der Schlagprüfung für Gießerei-Kupolofenstückschlacke sind einer der in Tabelle 11 genannten Qualitätsklassen für Hochofenstückschlacke (HOS) zuzuordnen.

2.9.3.3 Umwelttechnische Parameter

Damit Gießerei-Kupolofenstückschlacke eingesetzt werden können, sind zum Beispiel die in Tabelle 26 aufgeführten wasserwirtschaftlichen Anforderungen für die Eluatanalyse nach TL Min-StB 2000 [Lit 40] einzuhalten.

Tabelle 26: Richt- und Grenzwerte für wasserwirtschaftliche Anforderungen an Gießerei-Kupolofenstückschlacke

	Dimension		Zulässige Überschreitung in %
pH-Wert		6 – 12	
elektrische Leitfähigkeit	mS/m	100	10

Die Grenzwerte in [Lit 40] für die elektrische Leitfähigkeit und den Sulfatgehalt dürfen geringfügig überschritten werden, wenn dies nicht systematisch erfolgt. Eine systematische Überschreitung liegt vor, wenn der zulässige Grenzwert eines Merkmals bei zwei aufeinander folgenden Fremdüberwachungsprüfungen überschritten wird.

2.9.3.4 Verwendung

GKOS wird im Straßenbau als Tragschicht ohne Binder unter Deckschichten sowie in bitumen- und hydraulisch gebundenen Trag- und Deckschichten eingesetzt.

3 Literatur

- Lit 1: Arlt, K.-J.: Einsatzmöglichkeiten von eisenhüttenmännischen Nebenprodukten für die Abdichtung von Monodeponien am Beispiel der Halde der Dillinger Hütte. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 116, S. 80 – 103, Erich Schmidt Verlag, 1999
- Lit 2: Bipra Gorai; Jana, R.K.; Premchand: Characteristics and utilisation of copper slag – a review. Resources, Conservation and Recycling 39 S. 299-213, 2003
- Lit 3: Bolbrinker, A.-K.: Stahlfibel, Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf, 1980
- Lit 4: Brameshuber, W.; Vollpracht, A.: Erarbeitung eines Grundsatzpapiers zur Feststellung der Umweltverträglichkeit von genormten Betonausgangsstoffen. IBAC, RWTH Aachen, Abschlussbericht F836 vom 19.05.2003
- Lit 5: DIN 1164-1: Zement – Zusammensetzung und Anforderungen, Ausgabe Oktober 1994
- Lit 6: DIN 1164-8: Portland-, Eisenportland-, Hochofen- Traßzement: Bestimmung der Hydratationswärme mit dem Lösungskalorimeter, Ausgabe November 1978
- Lit 7: DIN EN 197-1: Zement. Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement, Deutsche Fassung EN 197-1:2000, Februar 2001
- Lit 8: Drissen, P.; Kühn, M.: Gezielte Herstellung großformatiger Wasserbausteine aus Stahlwerksschlacken. Report des Forschungsinstituts der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacke (FEhS), ISSN 0948-4795, 4. Jahrgang Nr. 2, S. 10, 1997
- Lit 9: Ehrenberg, A.: Überblick über die "Hüttensandkartei" der FEhS. Report des Forschungsinstituts der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacke (FEhS), ISSN 0948-4795, 4. Jahrgang Nr. 2, S. 6/7, 1997
- Lit 10: Ehrenberg, A.: 140 Jahre Hüttensand. Report des Forschungsinstituts der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacke (FEhS), ISSN 0948-4795, 8. Jahrgang Nr. 1, S. 1, 2001
- Lit 11: Ehrenberg, A.: Hüttensandmehl als Betonzustatzstoff Typ II. Report des Forschungsinstituts der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacke (FEhS), ISSN 0948-4795, 17. Jahrgang Nr. 1, S. 1/6, 2010
- Lit 12: FEhS (Hrsg.): Eisenhüttenschlacken – Eigenschaften und Verwertung, Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken, Heft 1, 1992
- Lit 13: IG-Metall (Homepage): http://www2.igmetall.de/homepages/zweigbuero-stahl/file_uploads/schlacke.pdf. Schlackenwirtschaft in der deutschen Stahlindustrie. Vortragsfolien der FEhS, 2002
- Lit 14: Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacke (FEhS), <http://www.fehs.de/dtpages/schlacken/schlacken.html>: Was sind Eisenhüttenschlacken?
- Lit 15: Gara, S.; Schrimpf, S.: Behandlung von Reststoffen und Abfällen in der Eisen- und Stahlindustrie. Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Monografien Band 92, Wien, 1998

- Lit 16: Geiseler, J.: Eisenhüttenschlacken – Nebenprodukte der Stahlindustrie. Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken, Heft 6, S. 9 – 39, 1992–1996
- Lit 17: HeidelbergCement: Newsletter Technik. Nr. 10 Oktober 2010
- Lit 18: Lafarge Slag: Homepage, <http://www.slag.com/litex.html>, Juli 2000
- Lit 19: LAGA (Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Abfall): LAGA Mitteilung 20 „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln –“, 5. erweiterte Auflage 2004
- Lit 20: Lang, E.; Lehmann, K.: Hydratationswärmeentwicklung von Hochofenzementen. Report des Forschungsinstituts der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacke (FEhS), ISSN 0948-4795, 6. Jahrgang Nr. 1, S. 6 - 9, 1999
- Lit 21: Lang, E.; Tabani, H.: Stahlwerksschlacken als Gesteinskörnung für Mörtel und Beton. Report des Forschungsinstituts der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacke (FEhS), ISSN 0948-4795, 10. Jahrgang Nr. 2, S. 1 - 3, 2003
- Lit 22: Larm, A.: Entwicklung des LAGA Richtlinien-Entwurfs für die Verwertung von Eisenhüttenschlacken basierend auf Originalsubstanzgehalten und Eluatkonzentrationen. Charakterisierung der Eisenhüttenschlacken. http://www.titro.de/phstarti/larmbew/fehs_1_4.htm, 2005
- Lit 23: Lehner, J.; Gould, L.: Treatment and Recycling of Oil-Containing Ferrous Materials in Integrated Iron & Steel Works. VAI, 1995
- Lit 24: Locher, F.W.; Rechenberg, W.; Sprung, S.: Beton nach 20jähriger Einwirkung von kalklösender Kohlensäure. Beton 34, Heft 5, S. 193 – 198, 1984
- Lit 25: Mederer, J.; Zörgendorfer, E; Stummeyer, J.: Die Schwermetallmobilität kristalliner und glasierter NE-Metallschlacken im Vergleich mit basischen und ultrabasischen Natursteinen, Schriftenreihe der GDMB, Heft 83, S. 203 – 236
- Lit 26: Merkel, Th.: Statistik zur Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken. Report des Forschungsinstituts der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacke (FEhS), ISSN 0948-4795, 11. Jahrgang Nr. 1, S. 11, 2004
- Lit 27: Motz, H.: http://www.stahl-online.de/medien_lounge/hintergrundmaterial/Motz.htm. Pressegespräch am 10. Juli 2003, Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken e. V., Duisburg-Rheinhausen, 2003
- Lit 28: Müller, A.; Seifert, G.; Wienke, L.; Brückner, R.: Stoffdatenbank für Ersatzbaustoffe. <http://www.uni-weimar.de/Bauing/aufber/db/index.html>, 2005
- Lit 29: Peute Baustoff GmbH: <http://www.peute-baustoff.de>, 2005
- Lit 30: pw-Internet Solutions GmbH: <http://www.baumarkt.de/lexikon/Schlackenstein.htm>, 2005
- Lit 31: Rendchen, K.: Hochofenzement – Charakteristische Merkmale und Eigenschaften im Beton. beton, Heft 6, S. 312 – 317, 2000
- Lit 32: Rendchen, K.: Blaufärbung von Betonoberflächen. Beton-Informationen, Heft 5, S. 79, 2002

- Lit 33: Schneider, M.; Meng, B.: Ressourcenschonung bei der Zementherstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand. Beton-Information, Heft 1, S. 3-7, 2000
- Lit 34: Stahl-Zentrum, http://www.stahl-online.de/forschung_und_technik/energieund Umwelttechnik/kreislaufwirtschaft.htm, 2005
- Lit 35: Strahlenschutzkommission: Bewertung der Verwendung von Kupferschlacke aus dem Mansfelder Raum. Bundesanzeiger Nr. 43 vom 03. März 1992
- Lit 36: Sybertz, F.; Thielen, G.: Die europäische Zementnorm und ihre Auswirkungen in Deutschland (Teil 2). beton, Heft 5, S. 287 – 290, 2001
- Lit 37: Stark, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton: Der Baustoff als Werkstoff. Birkhäuser Verlag, 2001
- Lit 38: Thyssenkrupp: Pressemitteilung. LiDonit®. www.Thyssenkrupp.com, 2002
- Lit 39: Thyssenkrupp-stahl. Homepage. <http://www.thyssenkrupp-stahl.de/grobblech/de/produkte/schlacken.jsp>, 2005
- Lit 40: Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau, Ausgabe 2000 – TL Min-StB 2000 - , 2000
- Lit 41: Trenkwalder, J.; Ludwig, H.-M.: Herstellung hüttensandhaltiger Zemente durch getrenntes Mahlen und Mischen im Zementwerk Karlstadt. www.bauverlag.de/domains/bauverlag/zkg/zkg_de/pdf/zkg0901pk02-d.pdf, 2001
- Lit 42: VDZ-Mitteilungen: Gesamtalkaligehalt auf dem Prüfstand. Heft Nr. 119, September 2002
- Lit 43: VDZ: Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen; Untersuchungen zur Optimierung von Herstellung und Eigenschaften. AIF-Forschungsvorhaben 13198N. <http://www.vdz-online.de/downloads/aif13198n/13198n.pdf>
- Lit 44: VDZ: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2003. Düsseldorf, 2004
- Lit 45: VDZ-Tätigkeitsbericht 2005 - 2007, Düsseldorf, Mai 2007
- Lit 46: voestalpine Stahl GmbH: Hochofenschlacke und LD-Schlacke, Homepage, 2005
- Lit 47: Weber, R.; Bilgeri, P.; Kollo, H.; Vißmann, H.-W.: Hochofenzement: Eigenschaften und Anwendungen im Beton. 2. Auflage, ISBN 3-7640-0379-0, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf, 1998
- Lit 48: Zementrohstoffe in Deutschland: Geologie, Massenbilanz, Fallbeispiele. Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V., Köln; Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf. Verlag Bau + Technik, ISBN 3-7640-0430-4, 2002
- Lit 49: Zentraler Fachdienst Wasser-Boden-Luft-Abfall-Altlasten bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Handbuch Abfall 1. Beratungsprogramm zur Reststoffvermeidung und -verwertung in Baden-Württemberg, Untersuchung von Eisen- und NE-Metallgießereien, Branchengutachten, Karlsruhe 1996.