

Zusatzstoffe. Teil 4, Silicastaub

Autor(en): **Hermann, Kurt**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Cementbulletin**

Band (Jahr): **63 (1995)**

Heft 7

PDF erstellt am: **06.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-153805>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Zusatzstoffe: Silicastaub

Silicastaube sind sehr reaktive Puzzolane und wirksame Füller, die für die Herstellung von Betonen mit besonderen Eigenschaften (z. B. hohe Festigkeit und Dichtigkeit) eingesetzt werden.

In der kleinen Reihe über Zusatzstoffe folgt auf die allgemeine Einleitung [1] sowie die Artikel über hydraulischen Kalk [2] und Flugaschen [3] ein Artikel über Silicastaub. Wie Flugasche muss auch dieser Zusatzstoff importiert werden. Die Analogie lässt sich noch weiterführen: Silicastaub ist ein Abfallprodukt, für das ein kostengünstiger Entsorgungsweg gesucht wurde. Heute übersteigt sein Preis oft den Zementpreis.

Entstehung

Silicastaub (auch als Silica, Microsilica, Silica fume bekannt) entsteht als Nebenprodukt bei der Herstellung von Silizium und Siliziumlegierungen (Ferrosilizium): In Lichtbogen-schmelzöfen unvollständig re-



Eine Anwendung von silicastaubhaltigem Beton: l'Arche de la Défense in Paris.

Foto: Kurt Herrmann, TFB

duzierter hochreiner Quarz (SiO_2) verdampft bei rund 1900°C als SiO . Die Rauchgase kühlen sich in den Schloten ab, SiO wird zu SiO_2 oxidiert und kondensiert als amorpher Silicastaub [4].

Reishülsenasche (rice-husk ash) ist ein weiteres Abfallprodukt, dessen Zusammensetzung und Eigenschaften dem Silicastaub ähnlich sind. Jährlich fallen in Müllereien rund 100 Mio. t Reishülsen an.

Durch kontrollierte Verbrennung bei 500 bis 700°C entstehen pro Tonne dieser Hülsen etwa 200 kg eines hochpuzzolanischen Materials, das $90\text{--}95\%$ SiO_2 enthält und ähnlich wie Silicastaub als Zusatzstoff eingesetzt werden kann [5]. Die Verwendung dieses Materials dürfte vor allem in Entwicklungsländern interessant sein, in denen Zement oft sehr teuer ist und Reishülsen in grossen Mengen anfallen.

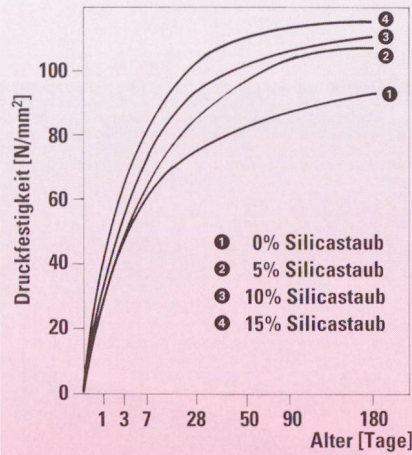


Abb. 1 Festigkeitsentwicklung von Betonen mit unterschiedlichem Silicastaubgehalt, aber gleichem $W/(Z + S)$ -Wert (0,33) nach [10].
Grafik: TFB/ZSD, S. Einfalt

Normierung

Silicastaub ist gegenwärtig in der Schweiz nicht als Zusatzstoff normiert. Europäische Normen sind in Vorbereitung. Anders die Portlandsilicastaubzemente (CEM II/A-D), die auch in der Schweiz produziert werden. Sie enthalten nach Norm SIA 215.002 (ENV 197-1) [6] 90–94 % Portlandzementklinker und 6–10 % Silicastaub. An den Silicastaub werden dabei folgende Anforderungen gestellt:

- ≥ 85 % amorphes Silica (SiO_2)
- ≤ 4 % Glühverlust
- $\geq 15 \text{ m}^2/\text{g}$ spezifische Oberfläche (nach BET-Methode bestimmt)

Eigenschaften

Silicastaub besteht zu 85 bis 95 % aus Siliziumdioxid (SiO_2) in nichtkri-

stalliner Form. Charakteristisch für die kugelförmigen Teilchen ist ihre grosse spezifische Oberfläche bzw. der sehr kleine Durchmesser (Hauptmenge $< 0,0001 \text{ mm}$ bzw. $< 0,1 \mu\text{m}$). In *Tabelle 1* sind wichtige Kenngrössen von Silicastauben, Flugaschen und Portlandzementen zusammengestellt.

Die grosse Feinheit von Silicastaubteilchen lässt sich daran messen, dass ihre spezifische Oberfläche mit derjenigen von Zigarettenrauch (10 bis $25 \text{ m}^2/\text{g}$) vergleichbar ist [4]. Illustrativ ist auch folgendes: 1 kg Silicastaub hat die gleiche Oberfläche wie ungefähr 60 kg Zement. Silicastaub wird in drei Lieferformen angeboten [4, 7]:

- Loser, unkompakter Staub mit einem Schüttgewicht um

$200 \text{ kg}/\text{m}^3$; im Baubetrieb praktisch nicht handhabbar

- kompakter Staub mit einem Schüttgewicht um $500 \text{ kg}/\text{m}^3$; unproblematische Handhabung, Mischzeit muss aber verlängert werden, damit der Zusatzstoff gleichmässig verteilt wird
- wässrige Suspension (Slurry) mit etwa 50 % Feststoffanteil (Rohdichte um $1400 \text{ kg}/\text{m}^3$); frostgefährdet, muss durch Umrühren homogen und stabil gehalten werden

Wirkungsweise von Silicastaub

Wie Flugasche wirkt auch Silicastaub puzzolanzisch: Zusammen mit dem Calciumhydroxid, das bei der Hydratation von Zement freigesetzt wird, reagiert er zu Calciumsilikathydraten (CSH). Bedingt durch die grosse Feinheit und den hohen SiO_2 -Gehalt ist Silicastaub aber wesentlich reaktiver als Flugasche. Dies zeigt sich beispielsweise darin, dass die Hydratationswärme eines Betons während der ersten drei Tage erhöht wird, wenn Silicastaub als teilweiser Zementersatz oder als Zusatzstoff verwendet wird [8, 9]. Die beträchtliche Festigkeits- und Dauerhaftigkeitssteigerung von silicastaubhaltigen Betonen im Vergleich zu Betonen ohne Zusatzstoffe

| | Silicastaube | Steinkohlenflugaschen | Portlandzemente |
|--|--------------|-----------------------|-------------------|
| SiO_2 -Gehalt [%] | 85–95 | 40–60 | 17–25 |
| CaO-Gehalt [%] | 0,1–5 | 3–7 | 60–67 |
| Al_2O_3 -Gehalt [%] | 0,2–3 | 20–30 | 2–8 |
| Dichte [kg/dm^3] | 2,1–2,2 | 2,1–2,4 | 3,1–3,2 |
| spez. Oberfläche [m^2/g] | 15–25 (BET) | 0,3–0,55 (Blaine) | 0,28–0,7 (Blaine) |
| Schüttgewicht [kg/dm^3] | 0,2–0,3 | 0,8–1,0 | 1,2–1,4 |
| mittlere Teilchengrösse [μm] | 0,1–0,2 | 10 | 10 |
| Glühverlust [%] | 0,7–4 | 0,5–12 | 0,5–5 |

Tab. 1 Wichtige Kenngrössen von Silicastauben, Flugaschen und Portlandzementen im Vergleich [4].

Silicastaub gibt besseren Verbund

Beim Vergleich zwischen Betonen mit gleichem W/Z- bzw. W/(Z + S)-Wert (S = Silicastaub) fällt auf, dass sie unabhängig vom Silicastaubgehalt gleiche Gesamtporositäten aufweisen. Allerdings nimmt die Menge der groben Poren im silicastaubhaltigen Beton zugunsten der feineren Poren ab. Da die Festigkeit eines Betons vor allem durch die Porosität bestimmt wird, müssten diese Betone auch gleiche Druckfestigkeiten haben. Silicastaubhaltige Betone sind aber vergleichsweise fester als Vergleichsbetone ohne Zusatzstoffe. Daraus folgt, dass die Festigkeitserhöhung auf einem anderen Effekt beruhen muss, beispielsweise auf einem verbesserten Verbund zwischen Zuschlag und Zementstein. In *Abbildung 2a* bis *2d* ist dies schematisch dargestellt. Beim «normalen» Frischbeton entsteht wegen des Blutens und der unvollständigen Verdichtung der Zementpartikel um die Zuschlagoberflächen eine Zone, die mit Was-

ser gefüllt ist (*Abbildung 2a*). Beim Erhärten bildet sich um die Zuschlagoberfläche eine Übergangszone, die Calciumhydroxid (CH), Calciumsilikathydrat (CSH), Klinkermaterial (PC), etwas Ettringit (ETT) und Wasser enthält (*Abbildung 2b*). Der Zementstein in den Übergangszonen wird dadurch poröser als in den Zwischenräumen zwischen den Zuschlagteilchen. Dadurch wird der Verbund zwischen Zementstein und Zuschlag geschwächt. Die Silicastaubteilchen (S) wirken anfänglich als Füller; sie nehmen den Platz des Wassers im silicastaubfreien Beton ein (*Abbildung 2c*). In einer zweiten Stufe erfolgt die Bildung von CSH aus den dichtgepackten puzzolanischen Silicastaubteilchen. Der Zementstein wird dadurch auch in unmittelbarer Nähe der Zuschlagkörner dicht. Der Verbund zwischen Zementstein und Zuschlag – und damit auch die Druckfestigkeit – wird stärker (*Abbildung 2d*). Quelle: [10]

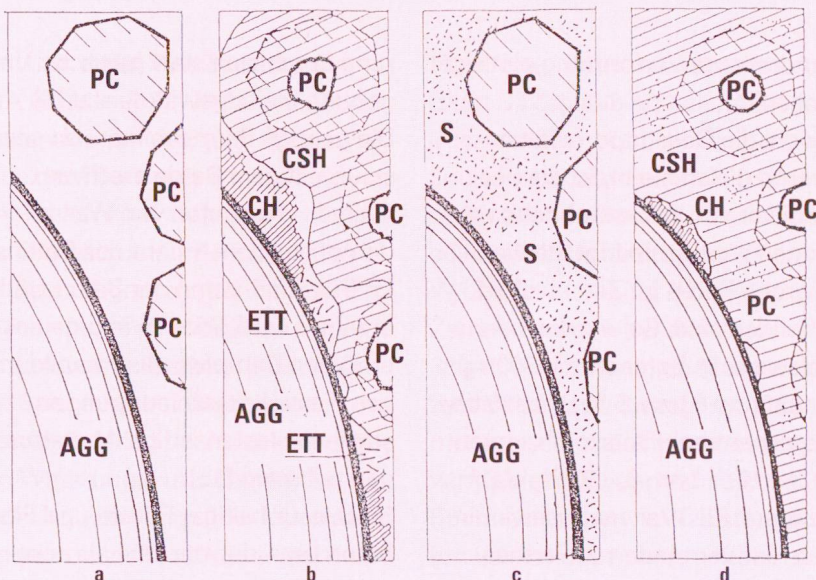


Abb. 2 Schematische Darstellung der Bildung von Übergangszonen in Betonen ohne (*2a* und *2b*) und mit Silicastaub (*2c* und *2d*) nach [10] (siehe Text). Abkürzungen: AGG = Zuschlag, PC = Portlandzementklinkerteilchen, S = Silicastaubteilchen, CH = Ca(OH)₂, CSH = Calciumsilikathydrat, ETT = Ettringit.

Grafik: TFB/ZSD, S. Einfeldt

folgende Formel zugrunde gelegt:

$$W/B = W/(Z + k S)$$

Für k stehen Werte zwischen 1 und 2 zur Diskussion. Der Gehalt an Silicastaub wird vermutlich auf etwa 10 Massenprozent (bezogen auf den Zementgehalt) limitiert. In vielen Fällen könnten somit 1 kg Silicastaub 1 bis 2 kg Portlandzement ersetzen. In den USA wird davon ausgegangen, dass 1 kg Silicastaub sogar 3–4 kg Zement entspricht [11].

Silicastaub und Frischbeton

Jedes kg Silicastaub bindet ungefähr 1 kg Anmachwasser als dünne Schicht auf der Oberfläche [4]. Die benetzten Silicastaubteilchen haften auf den Zementpartikeln, die dadurch gleichmässig verteilt werden. Sie ersetzen auch einen Teil des Wassers in den Zwischenräumen. Das Resultat ist Zementstein mit gleichmässiger Struktur [12]. Der hohe Wasserbedarf von Silicastaub führt – besonders bei grösseren Silicastaubmengen – zu einem zähklebrigen, nur schwer verarbeitbaren Beton. Dies lässt sich durch die Zugabe von Verflüssigern (BV) bzw. Hochleistungsverflüssigern (HBV) [13] korrigieren [12]. Derart zusammengesetzter Frischbeton verfügt über einen guten Zusam-

wird meistens mit einer feineren Porenverteilung erklärt. Neuere Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Festigkeitszunahme auch auf den verbesserten Verbund zwischen Zementstein und Zuschlag zurückgeführt werden kann [10]. Auf dieses Phänomen wird im Kasten «Silicastaub gibt besseren Verbund» näher eingegangen.

Einsatz von Silicastaub

Silicastaub kann sowohl als Zusatzstoff als auch als Zementersatz eingesetzt werden. Auf die Portlandsilicastaubzemente (CEM II/A-D)

wurde bereits hingewiesen. Wie bei Steinkohlenflugasche wird auch bei Silicastaub (S) darüber diskutiert, wie der Zusatzstoff bei der Berechnung des Wasserbindemittelwertes (W/B-Wertes) zu berücksichtigen ist. Im Kasten «Anrechenbarkeit von Steinkohlenflugaschen in Beton» ist die Problematik im letzten «Cementbulletin» ausführlich dargestellt worden [3]. Im folgenden wird deshalb nur kurz darauf eingegangen. In der gegenwärtig diskutierten revidierten Form der EN 206 wird für die Berechnung des W/B-Wertes die



Foto: Bram van Egmond, TFB

Einbau eines silicastaubhaltigen Strassenbelags aus Recyclingbeton (N 13).

menhalt, ist gut pumpbar und neigt auch bei weicher Konsistenz nicht zum Bluten oder Entmischen [8, 12]. Da Silicastaub eine grosse Affinität zu Wasser aufweist, wird an der Oberfläche verdunstendes Wasser nicht aus dem Innern des Betons nachgeliefert. Mit der feuchten Nachbehandlung des Betons muss sofort nach dem Einbringen begonnen werden, damit das Auftreten von Schwindrissen in einer frühen Phase verhindert werden kann [11].

Silicastaub und Festbeton

Zwei Eigenschaften von silicastaubhaltigem Beton sind vor allem interessant: die geringe Permeabilität und die erhöhte Festigkeit. Silicastaub liefert den Hauptbeitrag an die Festigkeit zwischen den Tagen 3 und 28. Die Eintagefestigkeit ist in der Regel gleich oder höher als bei silicastaubfreien Betonen, unabhängig davon, ob Silicastaub als Zementersatz oder als Zusatzstoff eingesetzt wird [11]. Einen Eindruck über den zeitlichen Druckfestigkeitsverlauf vermittelt *Abbildung 1*. Neben der Druckfestigkeit nehmen auch die Biegezugfestigkeit und – was oft nicht erwünscht ist – der Elastizitätsmodul zu [11]. Besonders hochfeste Betone, auf die noch einzugehen ist, sind sprödhart und können dadurch ohne vorherige

nennenswerte Verformung plötzlich brechen [4].

Obwohl die Gesamtporosität annähernd gleich bleibt, ist die Permeabilität von silicastaubhaltigen Betonen stark erniedrigt, da weniger grobe Poren im Zementstein vorhanden sind. So wurden beispielsweise in Betonen mit 300 kg Zement und 0 bzw. 5 % Silicastaub Wasserpermeabilitätskoeffizienten von 3×10^{-11} bzw. 6×10^{-14} m/s gemessen [8]. Weitere positive Einflüsse der verminderten Permeabilität sind

- erhöhte Beständigkeit gegenüber aggressiven Chemikalien [8]
- kleinere Karbonatisierungstiefen [8]
- geringe Chlorideindringtiefen [8]
- erhöhte Sulfatbeständigkeit auch bei Zementen mit hohem C₃A-Gehalt [11]
- tendenziell verbesserte Frost- und Frostausalzbeständigkeit [8, 14]

Die Herabsetzung der Permeabilität und die geringere elektrische Leitfähigkeit wirken sich positiv auf den Korrosionsschutz aus [8]. Zudem wird selbst beim Einsatz von relativ hohen Silicastaubmengen in Portlandzement der pH-Wert trotz der puzzolanischen Reaktion des Zusatzstoffs nicht unter 12 gesenkt; der Korrosionsschutz der Bewehrung

durch eine stark basische Umgebung bleibt gewährleistet [8].

Die geringe Permeabilität von silicastaubhaltigem Beton erschwert auch das Austreten von Wasserdampf aus dem Innern des Betons. Im Brandfall, wenn der Beton stark erwärmt wird, können infolge des erhöhten Dampfdrucks Rissbildungen, Festigkeitserniedrigungen sowie explosionsartige Abplatzungen auftreten [15].

Silicastaubhaltiger Frisch- und Festbeton kann dunkler sein als «normaler» Beton, besonders wenn der Zusatzstoff relativ viel Kohlenstoff enthält [11].

Dosierung

Silicastaub wird gewöhnlich in Mengen zwischen 5 und 15 % der Zementmasse zugegeben. Allerdings ist ab 10 Masseprozent eine deutliche Abnahme der Verarbeitbarkeit festzustellen [16]. Einige Luftporenmittel müssen in silicastaubhaltigen Betonen höher dosiert werden als in «normalen» Betonen, besonders bei tiefen W/(Z + S)-Werten [8] und bestimmten Hochleistungsverflüssigern.

Anwendungen

Silicastaub wurde erstmals 1952 in Oslo beim Bau eines Tunnels eingesetzt, wobei 15 Masseprozent des

Zements durch den Zusatzstoff ersetzt wurden [12]. Umfangreichere Anwendungen sind jedoch erst seit Ende der 70er Jahre bekannt. Empfohlen wird die Verwendung von Silicastaub für Betone mit besonderen Eigenschaften (hohe Festigkeiten oder Dichtigkeiten) oder für besondere Bauteile. Eindrückliche Beispiele sind Ölplattformen im Meer, bei denen der Widerstand gegen Witterungs- und chemische Einflüsse wichtig ist. Hohe Druckfestigkeiten (um 80 N/mm²) und Steifheiten werden als Nebeneffekte genutzt [15, 17].

Hochfester Beton muss nicht unbedingt Silicastaub enthalten. Dieser Zusatzstoff ermöglicht es aber, Druckfestigkeiten von > 100 N/mm² zielsicher herzustellen. Charakteristisch sind die niedrigen W/Z- bzw. W/(Z + S)-Werte (0,22–0,36), hohe Zementmengen (typisch sind 380–450 kg/m³), einige Masseprozent Silicastaub (bezogen auf Zementmasse) sowie Hochleistungsverflüssiger. Zu den zahlreichen Bauten, in denen Hochleistungs beton verwendet wurde, gehören die Arche de la Défense in Paris oder der 1990 fertiggestellte South

Wacker Drive in Chicago, das mit 292 m höchste Bürogebäude der Welt [15].

In den USA nimmt die Zahl der Brücken zu, die mit silicastaubhaltigem Beton gebaut werden [18], und in Skandinavien werden Strassen mit Druckfestigkeiten von 100 bis 110 N/mm² erstellt, die einen grossen Verschleisswiderstand aufweisen [16].

Ein wichtiger Anwendungsbereich von Silicastaub in allen drei Lieferformen ist Spritzbeton. Zusätzlich zu den bereits erwähnten Einflüssen (Druckfestigkeitserhöhung, verbesserte Dichtigkeit) vermindert Silicastaub die Rückprallmenge beträchtlich und ermöglicht dank der erhöhten Klebekraft den Auftrag grösserer Schichtdicken in vertikalen und in Überkopfanwendungen bei verbesserter Untergrundhaftung [19].

Silicastaub – ein Gesundheitsrisiko?

Die wenigen publizierten Untersuchungen deuten darauf hin, dass Silicastaube trotz der extremen Feinheit und der nichtkristallinen Natur keine Gefahr für die menschliche Gesundheit bedeuten. In den USA gilt allerdings ein MAK-Wert von 10 mg/m³ Totalstaub [5, 11] (MAK = maximale Arbeitsplatzkonzentration). Kurt Hermann

Literatur

- [1] Hermann, K., «Zusatzstoffe», Cementbulletin **63** [4], 3–7 (1995).
- [2] Hermann, K., «Zusatzstoffe: Hydraulischer Kalk», Cementbulletin **63** [5], 3–7 (1995).
- [3] Hermann, K., «Zusatzstoffe: Flugaschen», Cementbulletin **63** [6], 3–7 (1995).
- [4] Linder, R., «Silica für Beton-Bauteile und -Waren?», Betonwerk + Fertigteil-Technik **58** [11], 63–68 (1992).
- [5] Malhotra, V. M., «Fly ash, slag, silica fume, and rice-husk ash in concrete: A review», concrete International **15** [4], 23–28 (1993).
- [6] Norm SIA 215.002, «Zement – Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien; Teil 1: Allgemein gebräuchlicher Zement» (Ausgabe 1993).
- [7] Bächli, R., und Bracher, G., «Dauerhafter, hochfester Spritzbeton mit der Sika-Silica-fume-Technologie», in «Sika im Tunnelbau», Sika Informationen, Seiten 19–25 (1991).
- [8] Khayat, K. H., and Aitcin, P.-C., «Silica fume – A unique supplementary cementitious material» in Gosh, S. N., Sarkar, S. L., and Hars, S. (Ed.), «Mineral admixtures in cement and concrete», vol. 4 of «Progress in Cement and Concrete», ABI Books Pvt. Ltd., New Delhi (1994), pages 227–265.
- [9] «Guide to using silica fume in precast/pre-stressed concrete products», PCI Journal **39** [5], 37–45 (1994).
- [10] Goldman, A., and Bentur, A., «Bond strengths in high-strength silica-fume concretes», ACI Materials Journal **86** [5], 440–447 (1989).
- [11] «Silica fume in concrete», reported by ACI Committee 226, ACI Materials Journal **84** [2], 158–166 (1987).
- [12] Herfurt, E., «Microsilica-Stäube als Beton-zusatzstoff», Beton- und Stahlbetonbau **83** [6], 172–173 (1988).
- [13] Hermann, K., «Zusatzmittel: BV und HBV», Cementbulletin **62** [10], 3–7 (1994).
- [14] Bürge, Th., Silicafume – die neue Technologie», in Ritzer, H. (Hrsg.), «Die Sika-Silica-fume-Technologie», Seiten 4–11 (1989).
- [15] «Hochfester Beton», Sachstandsbericht, herausgegeben vom Österreichischen Betonverein (1993).
- [16] Walraven, J. C., «Hochfester Beton – Herstellung», Betonwerk + Fertigteil-Technik **58** [2], 68–72 (1992).
- [17] «Beton met hoge sterkte», Betoniek **12** [9], 1–8 (1993).
- [18] Luther, M. D., «Silica fume (microsilica) concrete in bridges», Concrete International **15** [4], 20–23 (1993).
- [19] Wolsiefer, J., Sr., and Morgan, D. R., «Silica fume in shotcrete», Concrete International **15** [4], 34–40 (1993).