

# Microsilica (Silica fume) in der Betontechnologie

Autor(en): **Scherer, Josef**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **108 (1990)**

Heft 20

PDF erstellt am: **23.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-77429>

## **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.

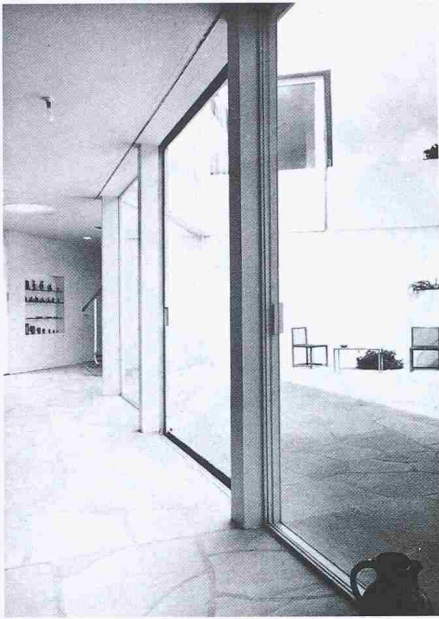


Bild 15. Haus Sutch, Neuseeland, 1953



Bild 16. Perfekte, klare, bis heute aktuelle Konstruktion – das Massey-House in Wellington, Neuseeland, 1952

fern aller augenblicklichen Modeströmungen – immer aktuell bleiben.

### Dritte Wiener Periode

Spät, aber dennoch wurde Ernst Plischke 1963 an die Akademie der Bildenden Künste in Wien berufen. Aus den versprochenen öffentlichen Aufträgen wurde allerdings nichts. Wahrscheinlich trifft der von Plischke selbst in Anspielung auf diese Tatsache geprägte

Satz zu, er habe es nie verstanden, «die Wiener Klaviatur zu spielen». So blieb es bei zwei Privathäusern, die er bis zu seiner Versetzung in den Ruhestand 1973 realisieren konnte. Dieser an und für sich traurige Umstand kam andererseits seinen Studenten zugute. Plischke stellte der Akademie seine ganze Erfahrung und sein Können uneingeschränkt zur Verfügung.

Die Lektion, die Ernst A. Plischke jün-

### Literaturhinweise:

Wer sich eingehender mit Werk und Leben Ernst A. Plischkes auseinandersetzen möchte, dem sei sein eben erschienenes Werk «Ein Leben mit Architektur» empfohlen. In Text und Bild präsentiert es die Projekte und die realisierten Bauten dieses bedeutenden Architekten, eingebunden in die Stationen seines Lebens.

*Ernst A. Plischke*, «Ein Leben mit Architektur». 1989, Löcker Verlag Wien, Preis 113.– Fr., erhältlich im Buchhandel

Die früheren, erwähnten Werke von E.A. Plischke:

«Design and Living», 1947, Wellington, Department of International Affairs, New Zealand

«Vom Menschlichen im neuen Bauen», 1969, Wien, Vlg. Kurt Wendl

«Entwürfe und Projekte Meisterschule EAP», 1976, Akademie der bildenden Künste Wien.

geren Architekten gibt, ist seine Baugesinnung, die Schöpfer und Werk als Einheit sieht, sowie seine Überzeugung, dass es keinen Grund zur Annahme gibt, dass die klassische moderne Architektur bereits abgeschlossen sei.

Adresse des Verfassers: *Martin Spühler*, Architekt BSA/SIA, Bellerivestrasse 16, 8008 Zürich.

## Microsilica (Silica fume) in der Betontechnologie

**Natürlicher Puzzolanstaub, wie er beispielsweise als Vulkanasche anfällt, wurde schon zur Römerzeit als Bindemittel in Mörteln verwendet. Im heutigen hochindustrialisierten Zeitalter entstehen Superpuzzolane bei der Produktion von Ferrosilicium und Siliciummetall in Elektroschmelzöfen. Das Superpuzzolan Microsilica (Englisch Silica fume) ist ein Rauchgas, das im Hochkamin bei etwa 1700–2000 Grad Celsius kondensiert. Besonders in Skandinavien wie auch in Nordamerika sowie Kanada, wo entsprechende Industrien vor allem heimisch sind, wird die Flugasche Silica fume schon seit Jahren als Betonzusatzstoff verwendet. Microsilica ist teilweise bereits Bestandteil der jeweiligen Betonnorm.**

Die bei der Kondensierung entstehenden  $\text{SiO}_2$ -Partikel haben eine durchschnittliche Grösse von 0,12 bis 0,15  $\mu$ . Diese kugelförmigen Feinsteile fallen jedoch nicht einzeln an, sondern sind meist als Konglomerate vorzufinden. Nur wenn diese Konglomerate im Beton aufgelöst werden können, ist die Wirkung bzw. die Aktivierung des Sili-

ca fumes möglich (Bilder 1, 2, 3a und 3b).

### Wirkungsweise von Microsilica im Beton

Auch ohne grosse Erfahrung im Umgang mit Silica fume kann man bereits

aus seiner Grundstruktur sowie der chemischen Zusammensetzung auf seine Wirkungsweise im Beton sowie seine nutzbaren Eigenschaften schliessen (Tabelle 1).

a) Silica fume ist extrem feinkörnig und wirkt als Mikroporenfüller.

b) Die runden Feinstkugeln erhöhen die Plastizität des Betons. Die Pumpfähigkeit des Betons wird verbessert.

VON JOSEF SCHERER,  
BRUNNEN

c) Dank der extrem grossen Oberfläche ist sehr viel reaktive Angriffsfläche vorhanden (dies gilt nur, falls die verklebten Anhäufungen aufgelöst werden können).

d) Das  $\text{SiO}_2$  kann mit den rund 20 Prozent Kalk, die bei der Zementhydratation entstehen, zusätzliches festigkeitsbildendes Calciumsilikathydrat bilden.

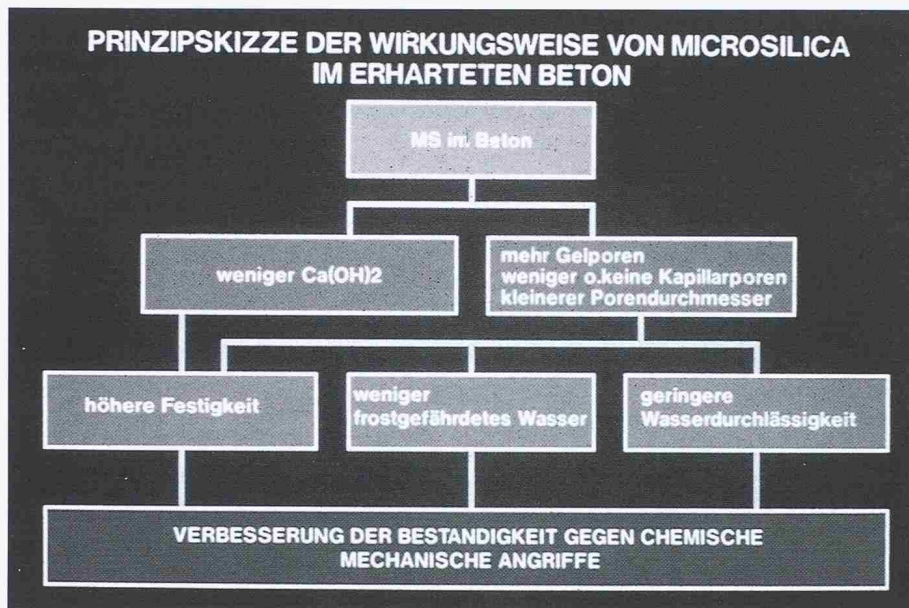


Bild 1. Wirkungsweise von Microsilica im erhärteten Beton

**Lieferformen im Markt**

In seiner Rohform beim Entleeren der Filter hat Microsilica eine Dichte von 200 bis 220 kg/m<sup>3</sup>. Solches Material ist kaum manipulierfähig und braucht grosse Lagerkapazitäten. Darum hat sich die Industrie bemüht, die Rohform zu modifizieren. Es werden heute Materialien mit einer Dichte von 500 bis 600 kg/m<sup>3</sup> hergestellt. Da Microsilica-Pulver im Beton nie voll aktiviert werden kann,

- kann die hohe spezifische Oberfläche nicht benetzt werden
- sind die Konglomerate in üblichen Mischern schwer aufzulösen

wird durch die Industrie eine 50prozentige Aufschlammung mit Wasser angeboten. Die Microsilica-Suspension ist somit die wichtigste Anlieferungsform im Markt. Die Suspension ist die Form, in der das Microsilica optimal aktiviert werden kann (Tabelle 2).

Die Verwendung von Microsilica-Suspension ergibt schon seit Jahren die besten Ergebnisse. Ihre Anwendung beim Trockenspritzverfahren wurde durch die Firma Elkem den Hauptstofflieferanten weltweit zum Patentschutz angemeldet.

Aus letzterem Grunde versuchen einige Bauchemiefirmen die Anwendung von Silica fume in Pulverform mit Polymeren vergütet für die gleiche Anwendungsform auszuliefern. Die Polymere ersetzen in diesem Falle teilweise die umfassendere und schnellere Wirkungsweise der Suspension (verglichen mit dem Microsilica-Pulver). Die Nachteile von Betonzusatzmitteln auf Silica-fume-Basis sind offensichtlich:

- Der mit dem Silica-fume-Pulver vorgemischte Hochleistungsverflüssiger kann nicht optimal auf das Bauwerk abgestimmt werden. (Es ist Allgemeinwissen, dass ein HLV je nach Jahreszeit sowie Transportdistanz anders eingestellt werden muss.)
- Da eine volle Aktivierung und gleichmässige Verteilung des Microsilica in der Suspension wesentlich besser gewährleistet ist, müssen Zusatzmittel auf Silica-fume-Basis oft überdosiert werden.
- Modifiziertes Silica fume wird nicht mehr als Rohstoff, sondern als Betonzusatzmittel verkauft und ist entsprechend teuer.

**Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis**

**Hochwertige Betone und Mörtel**

Dank der Microsilica-Vergütung ist es auf den alltäglichen Baustellen möglich, Betone und Mörtel mit bisher unvorstellbaren Qualitätsmerkmalen in bezug auf Druck und Haftzugfestigkeiten, Dauerhaftigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen chemische Angriffe herzustellen (Tabellen 3 und 4).

Unter der Voraussetzung, dass einwandfreie Zuschläge verwendet werden, können mit vorgehenden Rezepten in der Praxis folgende Endqualitäten erreicht werden:

*Wasser- sowie gasdichter Beton:*

Infolge weniger Kapillarporen und kleineren Porendurchmessern wird die Wasser- sowie Gasdurchlässigkeit des Betons auf ein Minimum reduziert. Die

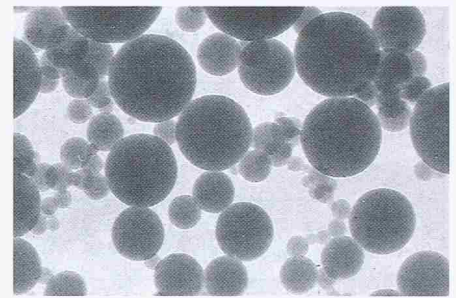


Bild 2. Kugelige Feinstteile mit durchschnittlicher Partikelgrösse von 0,12 bis 0,15 µ



Bild 3a. Normalbeton unter dem Mikroskop

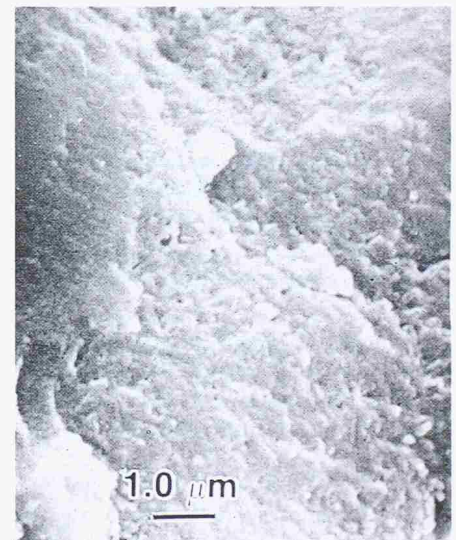


Bild 3b. Microsilica-Beton unter dem Mikroskop

Wasserdampfdiffusion des Betons bleibt jedoch weiterhin gewährleistet. In der Praxis werden solche Betone bei folgenden Bauteilen verwendet:

- Wasserdichte sowie gegen chemische Angriffe beständige Betonhüllen von Chemie oder Öltanklagern
- Wasserreservoirbau
- Spitalbau für gasdichte Teile usw.

*Beton mit hoher Druckfestigkeit:*

Im Brücken- oder Hochbau werden oft Druckteile mit Festigkeiten von 60 N/mm<sup>2</sup> und mehr verlangt. Dank dem zusätzlichen Kalziumsilikathydrat, das

	Portland- zement	Micro- silica	Flug- asche
spezifisches Gewicht	3.12-3.19	2.16	2.35
Raumgewicht	1,4	0,2-0,22	1,0
spezifische Oberfläche m <sup>2</sup> /gr	0,25-0,50	18-22	0,3-0,35
Glühverlust	0,5 %	0,7-2,5	0,6
<u>chemische Bestandteile %</u>			
SiO <sub>2</sub>	17 - 25	88 - 98	40 - 55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 - 8	0,5-3,0	20 - 30
CaO	60 - 67	0,1-0,5	3 - 7
MgO	0,1-5,0	0,5-1,5	1 - 4
SO <sub>3</sub>	1 -4,5		0,4-2,0
Na <sub>2</sub> O		0,2-1,5	
K <sub>2</sub> O	0,2-1,5	0,4-1,0	1 - 5
andere			

Tabelle 1. Wirkungsweise von Microsilica im erhärteten Beton

Rohstoff Microsilica		Zusatzmittel auf Microsilica Basis
Microsilica Pulver  (Silo- oder Sackware)	Microsilica Suspension  (1m <sup>3</sup> Container)	Microsilica Pulver vergütet mit HLV oder und Polymer  (Sackware)
Hochleistungsverflüssiger oder Polymer wird im Betonwerk oder auf Baustellen beidosiert		

Tabelle 2. Anlieferungsform von Silica fume im Markt

durch das Microsilica gebildet wird, werden solche Festigkeiten nicht nur in der Vorfabrikation, sondern auch mit Baustellenmischungen erreicht.

**Frost sowie FT-Beständigkeit:**

Wo bisher zusätzliche Expansionsgefäße in Form von Luftporen zur Aufnah-

me des Gefrierdruckes von Kapillarwasser eingebaut wurden, werden mit Silica fume die Kapillaren verringert. Kleinere Poren bedeutet weniger frostgefährdetes Wasser durch höheren Poren-Wasserdruck und weniger Wasser. Somit ist die Frostgefährdung wesentlich verringert. Weniger Porosität be-

deutet gleichzeitig eine geringere Belastung des Betons durch eindringende Chloride, Sulfate usw.

Mit der Microsilica-Technik werden somit FT-beständige Betone erstellt. In diesem Zusammenhang darf jedoch nicht vergessen werden, dass auch die besten Betonzusätze bei ungeeigneten



Bild 4. Applikation eines Besa-Spritzmörtels auf Microsilica-Basis (im Trockenspritzverfahren)

Zement	325 kg
Microsilica Suspension	
8% Microsilica v. Z = 16% Suspension	52 kg : 1.4 = 37 lt (wovon 18.5 lt Wasser)
Hochleistungsverflüssiger 1.5 % v. Z	4 - 5 kg
W/(Z + Microsilica Wert)	0.4 - 0.45
zu erwartende Konsistenz	K1 / K2

Tabelle 3. Rezeptvorschlag für Beton

Zuschläge	4er Korn	8er Korn
Filler	50kg	
Sand 0-2mm	1300kg	Sand 0-4mm 800kg
Sand 2-4mm	240kg	Sand 4-8mm 800kg
Zement	380 kg	
Microsilica Suspension	48 kg = 34.3 lt wovon 17 lt Wasser)	
Hochleistungsverflüssiger 1.5 % v. Z	5 - 6 kg	
W/(Z + Microsilica Wert)	0.45	

Tabelle 4. Rezeptvorschlag für Mörtel

Zuschläge	1'000 lt
Zement	350 kg
Microsilica Suspension	
8% Microsilica v. Z = 16 % Suspension	56 kg : 1.4 = 40 lt.
(Mit dem BESA Dosiergerät wird die Suspension zusammen mit dem Anmachwasser an der Spritzdüse beidosiert)	

Tabelle 7. Rezeptvorschlag für Spritzbeton



Bild 5. Autobahnbrücke Bad Ragaz wird momentan mit Microsilica-vergüteten Mörteln instandgestellt

Zuschläge keine FT-Verbesserung bringen.

**Beton-Instandstellung**

Die Betonkosmetik wird heute mehr und mehr von der Instandstellung im Trockenspritzverfahren abgelöst. Aus statischen wie Brandbeständigkeitsgründen werden Spritzmörtel auf mineralischer Basis verlangt. Besa-Trockenbaustoffe auf Microsilica-Basis genügen diesem Anforderungsprofil vollumfänglich (Tabellen 5 und 6).

Mit dem Besa-Reparaturgunit auf Microsilica-Basis werden heute

- Brücken
- Fassaden
- Balkonbrüstungen
- Parkhäuser
- Bruchsteinmauerwerke
- Tunnelgewölbe usw.

gross und kleinflächig reprofiliert. Ebenso werden sanierungsbedürftige Bahn- bzw. Strassentunnel mit dünnen wasserdichten Schalen auf Microsilica-Basis ausgekleidet.

**Massenspritzbeton**

Ein wichtiges Einsatzgebiet von Microsilica-Suspension ist der Massenspritzbeton. Die erhöhte Klebewirkung des Microsilica-Spritzbetons vermindert den Rückprall erheblich. Somit ist die Möglichkeit gegeben, ohne die Verwendung von Abbindebeschleunigern, die immer eine Qualitätseinbusse bedeuten, grössere Schichtstärken zu applizieren.

Auf schweizerischen Tunnelbaustellen wurden mit dem Rezept nach Tabelle 7 im Massenspritzbeton folgende mittlere Qualitätswerte mit geringen Schwankungen erreicht:

- Gesamtporosität 15%
- Frostbeständigkeit hoch
- Wasserleitfähigkeit qw 7 g/m/h
- Tz-Festigkeit 45 N/mm
- TS-Festigkeit 60 N/mm

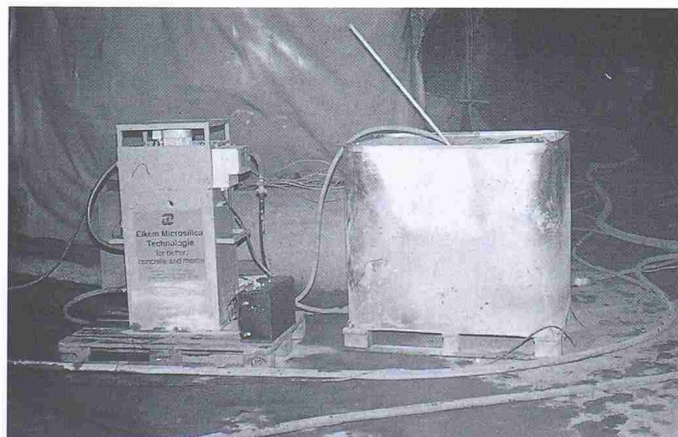


Bild 6. Dosierpumpe für Microsilica-Suspension im Tunnelbau

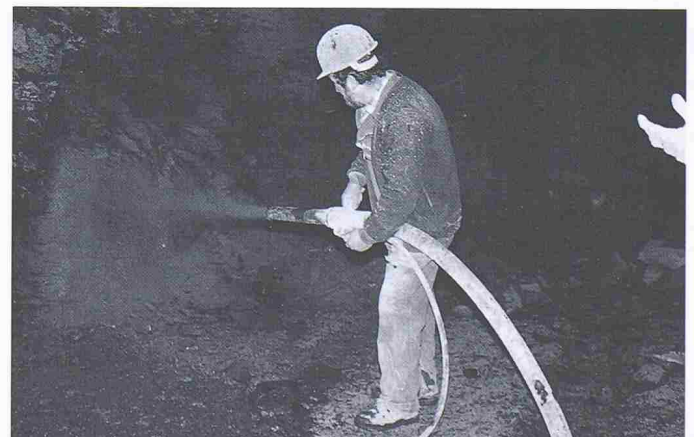


Bild 7. Microsilica-Suspension wird im Massenspritzbeton an Düse beigegeben

	Beton Kosmetik	Beton Instandstellung im Trockenspritzverfahren		
		Spritzbeton bauseits aufbereitet	Vorfabrizierte Spritzmörtel mit Silica fume	Vorfabrizierte Spritzmörtel mit Silica fume + Kunststoff
Systembeschreibung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hydrodynamische Bearbeitung der Gesamfläche</li> <li>- Korrosionsschutz der Armierung</li> <li>- Hattbrücke</li> <li>- Schadstellen von Hand reprofiliieren</li> <li>- Dünnbeschichtung über Gesamfläche</li> <li>- ev. Farbanstrich (optisch)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dito</li> <li>- 3-4 cm Reprofilierung mit Spritzbeton</li> <li>- Farbanstrich mit CO<sub>2</sub> Bremse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dito</li> <li>- 2-3 cm Reprofilierung mit Spritzmörtel auf Silica fume Basis (CO<sub>2</sub> Bremse ist integriert)</li> <li>- Farbanstrich (optisch)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dito</li> <li>- 1-2 cm Reprofilierung mit Kunststoffvergütetem Spritzmörtel auf Silica fume Basis (CO<sub>2</sub> Bremse ist integriert)</li> <li>- Farbanstrich (optisch)</li> </ul>
Richtpreis	Fr. 90.- bis 100.- /m <sup>2</sup>	Fr. 110.- bis 120.- /m <sup>2</sup>	Fr. 120.- bis 130.- /m <sup>2</sup>	Fr. 250.- bis 300.- /m <sup>2</sup>
Bemerkungen	<p><u>Nachteil:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> Bremse in Dünnbeschichtung im Millimeterbereich. Somit hohe Anfälligkeit auf Beschädigung und Abnutzung</li> </ul>	<p><u>Nachteil:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualitätsstreuungen im Spritzvorgang infolge von Eigenfeuchte der Zuschläge und bauseits ungenauem Mischvorgang</li> <li>- CO<sub>2</sub> Bremse in Farbanstrich: Hohe Anfälligkeit</li> </ul>	<p><u>Vorteil:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Idealer CO<sub>2</sub> Schutz auf 2-3 cm verteilt</li> <li>- H<sub>2</sub>O Diffusion gewährleistet</li> <li>- Hohe konstante Endqualität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unnötig hoher CO<sub>2</sub> Schutz</li> </ul> <p><u>Nachteil:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Probleme mit H<sub>2</sub>O Diffusion</li> <li>- Preis untragbar</li> </ul>

Tabelle 5. Betonsanierung; Systeme im Vergleich

Der gemessene Rückprall über die Gesamtbauzeit (Wagen mit Rückprallabtransport wurde gezählt) war geringer als 15%

Die Mehrkosten für die Verwendung der Microsilica-Suspension können somit praktisch durch die Rückprallminderungen kompensiert werden. Zusätzlich wird die Beständigkeit eines Microsilica-Spritzbetons gegen Sulfatangriffe

stark erhöht, die Schwindgefährdung sinkt infolge weniger Bindemittelanteil pro Kubikmeter Spritzbeton an der Wand, und trotzdem steigt die Druckfestigkeit.

**Diverse Anwendungsmöglichkeiten**

Die Microsilica-Beimischung bringt praktisch in allen zementgebundenen

Systemen Vorteile. Hier einige Beispiele:

- Vorfabrikation: Elementbau, Randbordsteine, Schächte, Kanäle
- Faser- und glasfaserbewehrte Betone (die Alterungsbeständigkeit solcher Produkte wird erhöht)
- Leichtbetone
- Injektionen, Verpressungen (Verarbeitbarkeit wird verbessert)
- Industrieböden usw.

**Was ist bei der Verwendung von Microsilica zu beachten?**

Materialien, die nicht ihren Eigenschaften entsprechend eingesetzt werden, bringen nicht die möglichen optimalen Resultate. Dies ist bei Microsilica nicht anders. So kann es vorkommen, dass bei unsachgemässer Verwendung nur geringfügige Verbesserungen von Beton und Mörtel erzielt werden. Richtiger Einsatz dagegen resultiert in der Regel in Qualitätsverbesserungen, die von erheblicher Wichtigkeit sind.

Bei der Verwendung von Microsilica muss auf die folgenden Punkte ein besonderes Augenmerk gerichtet werden:

- Die Dosierung muss auf das gewünschte Resultat abgestimmt sein.
- Eine ausreichende Untermischung in den Beton bzw. Mörtel muss gewährleistet sein. Oft muss die Mischzeit erhöht werden.
- Bei längeren Transportdistanzen sollen Fahrmischer verwendet werden. Da Microsilica meistens zusätzlich ein HLV erfordert, soll dieser idealerweise erst auf der Baustelle beidosiert werden.

**Armierung von Erdreich**

Ein aktuelles Forschungsgebiet

**Die Eigenschaften von Erdreich als Baustoff lassen sich in vielen Fällen durch Einschluss von Versteifungselementen verbessern, ähnlich wie man Beton mit Stahl armiert. Die Technik geht bis auf babylonische, wenn nicht noch frühere Zeiten zurück, als Grossbauten aus Lehm mit Stroh und gewebten Schilfmatten verstärkt wurden. In jüngerer Zeit erinnerte man sich wieder dieser Technik und verfestigte beispielsweise beim Bau von Böschungsmauern das Erdreich mit Metallstreifen.**

Inzwischen sind zahlreiche Varianten dieser Technik entwickelt worden, nicht nur für Böschungsmauern, sondern auch für Steilhänge, Dämme, Fundierungen und Strassen. Als Armierung

	Rep. Gunit unvergütet	Rep. Gunit und Silica fume (Microsilica)	Rep. Gunit und Silica fume und Kunststoff	Kommentar der Ergebnisse
Druckfestigkeit 28 Tg N/mm <sup>2</sup>	55 - 65	60 - 70	40 - 50	In allen Fällen mehr als genügend.
Biegezug 28 Tg N/mm <sup>2</sup>	8 - 9	8.5 - 9.5	9 - 10	Vergütungen bringen Verbesserungen.
Gesamtporosität	19 - 21 %	15 - 17 %	14 - 15 %	Vergütungen haben auf Dichtheit einen positiven Einfluss
Frost Tausalz Beständigkeit	mittel/hoch	sehr hoch	sehr hoch	Vergütungen bringen Verbesserungen.
E - Modul statisch N/mm <sup>2</sup>	30 - 35'000	33 - 36'000	23 - 26'000	Kunststoff reduziert E - Modul stark.
μ CO <sub>2</sub>	apx. 150 - 200	apx. 700 - 800	60'000	CO <sub>2</sub> Widerstand wird bei Kunststoff überflüssig hoch.
μ H <sub>2</sub> O	100 - 200	300 - 400	1'000	Die Diffusion ist bei einem Widerstand von 1'000 nicht mehr gewährleistet.
Haftzug N/mm <sup>2</sup>	1 - 1.5 und mehr	1.5 und mehr	1.5 und mehr	Vergütungen bringen gewünschte Verbesserung.

Tabelle 6. Qualitätserwartungen eines vergüteten Reparatur-Gunites

**Zusammenfassung**

Schäden an jungen Betonbauteilen haben die Bauherren aufgeschreckt. Die zu erwartende Lebensdauer eines Objektes war bisher nie ein entscheidendes Planungskriterium. Unsere heutigen Baunormen tragen diesem Umstand noch ungenügend Rechnung.

Hier muss in den nächsten Jahren ein Umdenken stattfinden. Hochwertige und dauerhafte Microsilica-Betone sind heute ein Novum, werden jedoch in nächster Zukunft eine Selbstverständlichkeit sein.

Adresse des Verfassers: *Josef Scherer*, Ing. HTL, Besa Baustoffe AG, 6440 Brunnen.

reich als Schüttmaterial integriert, aber man kann auch Erdreich versteifen, um Baggerarbeiten zu erleichtern oder um (durch «Bodenvernagelung») einen rutschenden Hang zu sichern.

VON GEORGE MILLIGAN, OXFORD

**Forschungsprogramm der Universität Oxford**

In den vergangenen sieben Jahren hat der Autor am Department of Engineering Science der Universität Oxford ein