

# Silicafume - Technologie im Spritzbeton

## SILICAFUME TECHNOLOGY FOR SHOTCRETE

**Dipl.-Ing. René Bächli, Dr. Gustav Bracher - Sika AG, Zürich**

Silicafume wird erfolgreich seit Beginn der 50-er Jahre in der modernen Betontechnologie eingesetzt. Die wichtigsten Parameter, die mit Hilfe der Silicafume-Technologie beeinflusst werden können, sind

- Betonkonsistenz, Pumpbarkeit
- Druckfestigkeit
- Porosität (Wasserdurchlässigkeit, Dauerhaftigkeit, Chloridpenetration, Karbonatisierung)

Es hat relativ lange gedauert, bis daß Silicafume auch im Spritzbeton eingesetzt worden ist, wobei hier neben den erwähnten Eigenschaften die folgenden wichtigen Parameter deutlich verbessert werden konnten:

- erhöhte Klebkraft, auch ohne Erstarrungsbeschleuniger
- deutlich geringere Rückprallmengen
- Erreichen einer hohen Sulfatbeständigkeit auch mit einem normalen Portland-Zement

Die Silicafume-Technologie wird sowohl im Trockenspritz- wie im Naßspritzverfahren eingesetzt. Im Trockenspritzverfahren kann der Silicafume pulverförmig direkt dem Trockengemisch beigegeben werden oder wird allenfalls flüssig als Slurry mit einer zusätzlichen Dosieranlage auf der Baustelle zudosiert. Im Naßspritzverfahren kann durch Zugabe von Silicafume in der Betonzentrale das Ansteifverhalten der Ausgangsmischung besser kontrolliert werden, und die erzielten Festbetoneigenschaften erlauben, mit dieser Spritzbetontechnologie einschalige Tunnels zu bauen.

Die Firma Sika hat auf dem Gebiet der Silicafume-Technologie im Spritzbeton sehr viel Grundlagenforschung betrieben, die erhaltenen Ergebnisse werden dabei erstmals veröffentlicht.

*Silicafume has been used successfully in modern concrete technology since the beginning of the 50s. The most important parameters which can be influenced by means of silicafume technology include:*

- *concrete consistency, pumpability*
- *compressive strength*
- *porosity (water permeability, durability, chloride penetration, carbonation).*

*It took some time before silicafume was also used for shotcrete. In addition to the above-mentioned properties, the following essential parameters can be improved significantly:*

- *increased adhesive strength, also without accelerator*
- *considerably less rebound*
- *high sulfate resistance, also with ordinary Portland cement.*

*Silicafume technology is applied for both dry and wet shotcreting. With the dry process, silicafume can be added in powder form directly to the dry mix or in liquid form as slurry via an additional batching unit on site. With the wet process, the development of rigidity in the design mix can be better checked by adding silicafume in the central mixing plant and the properties of the hardened concrete allow to construct tunnels with a single permanent shotcrete lining.*

Sika has carried out a lot of basic research in the field of silicafume technology for shotcrete. The results obtained are now being published for the first time.

## 1. Einleitung

Spritzbeton kommt hauptsächlich in folgenden Einsatzgebieten zur Anwendung:

- Im Stollen- und Tunnelbau für Vorabdichtung, Felssicherung und Ausbau
- Im allgemeinen Hoch- und Tiefbau für Böschungssicherungen, Rühlwände sowie für Betonanierungen



Bild 1: Wirtschaftlicher Naßspritzbeton im Kalotenvortrieb

Je nach Land, technischem Entwicklungsstand, geforderter Spritzleistung und entsprechenden Qualitätsanforderungen kommt die Trocken- bzw. Naßspritzmethode zum Einsatz. Bei speziellen Frühfestigkeitsanforderungen bzw. ab einer bestimmten Schichtstärke müssen Abbindebeschleuniger eingesetzt werden. Für beide Verfahren sind Abbindebeschleuniger sowohl in flüssiger wie in Pulverform in Einsatz. Gerade im Hinblick auf die Konstruktion von einschaligen Tunnelröhren, für das Herstellen von wasserundurchlässigem, hochfestem oder für frost/tausalzbeständigem Spritzbeton sind die Anforderungen an den Spritzbeton ständig gestiegen. Aus wirtschaftlichen Überlegungen können die hohen Rückprallmengen nicht mehr hingenommen werden, und aus arbeitshygienischer Sicht wird die hohe Staubbelastung nicht mehr toleriert. Die folgenden Entwicklungen zur Behebung dieser Probleme sollten dabei erwähnt werden:

- Einsatz der Silicafume-Technologie im Spritzbeton
- Beton im Naßspritzverfahren

- Verbesserung der Düsentechnik, vor allem im Trockenspritzverfahren unter Einbezug von Vorbenetzung und Hochdrucktechnik
- Neue Tunnelauskleidungsmethoden, z. B. Rollschalungen mittels Anpreßverfahren

## 2. Die Silicafume-Technologie

Bereits die Römer haben erkannt, daß durch die Mischung von vulkanischer Asche aus dem Gebiet Pozzuoli bei Neapel mit gebranntem Kalk ein wasserbeständiger, hydraulischer Mörtel entsteht. Daher auch die Ableitung des Namens Pozzuoli für Puzzolane. Ein weiterer Fundort eines latent reaktiven Materials finden wir in Deutschland an der Eifel. Dort wird die Erde, die ebenfalls vulkanischen Ursprungs ist, als Trasserde bezeichnet.

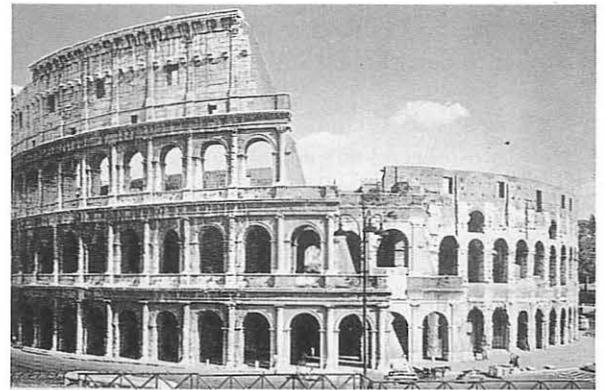


Bild 2: Kolloseum von Rom

Im Gegensatz zu den natürlichen Vorkommen entstehen auch bei der Erzeugung von elektrischer Energie in Kohlekraftwerken Stoffe, die puzzolansiche Fähigkeiten haben können. Man nennt diese Stoffe Flugaschen.

In der Metallindustrie werden Siliziummetall oder Siliziumlegierungen wie z. B. Ferrosilizium durch Reduktion von Quarz mit Kohle im elektrischen Lichtbogen hergestellt. Ein Teil des unvollständig reduzierten Quarzes verdampft als  $\text{SiO}$  bei ca.  $1.900^\circ\text{C}$ . Die dabei entstehenden Rauchgase kühlen sich in den Schloten ab und oxidieren wieder zu  $\text{SiO}_2$ . Dieses  $\text{SiO}_2$  kondensiert in mikroskopisch feinen Partikeln als amorphes Siliziumdioxid mit einem mittleren Korndurchmesser von  $0,1\mu$ .

Silicafume im Vergleich zu Zement und

Flugasche unterscheidet sich neben dem Schüttgewicht hauptsächlich in der ca. 100 x größeren spezifischen Oberfläche sowie dem  $\text{SiO}_2$ -Gehalt, der bei Zement bei 17 - 25 % und bei Flugasche zwischen 40 - 60 % liegt, wobei Silicafume einen Gehalt von ca. 85 - 98 % aufweist.

Chemisch gesehen erfolgt die Reaktion von Silicafume und Zement wie folgt:

Zementpulver und Wasser reagieren, vereinfacht dargestellt, zu dem festigkeitsbestimmenden C-S-H Gel und freiem Kalk. Dieser freie Kalk reagiert nun mit dem Silicafume zu zusätzlichem Zementstein.

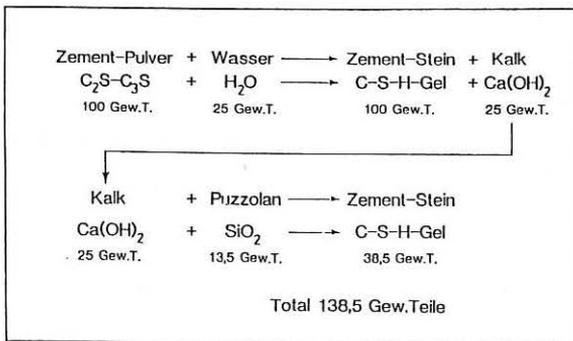


Bild 3: Zementsteinbildung mit Silicafume

Silicafume wird in kompaktierter, nicht kompaktierter und in Slurryform angeboten.

- Nicht kompaktiertes Silicafume-Pulver mit einem sehr niedrigen Raumgewicht von 0,15 - 0,25 kg/l ist sehr schwierig in seiner Handhabung und wird somit meist in Säcken für Produktionsanlagen angeliefert.
- Kompaktierte reine oder modifizierte Pulver mit Raumgewichten von 0,50 - 0,70 kg/l können wie Flugasche oder Filler in Silos eingeblasen werden. Ebenfalls werden auf Mischergröße und Rezeptur abgestimmte Säcke geliefert.
- Silicafume in Slurryform mit einem Raumgewicht von 1,40 kg/l als eine ca. 50 % Suspension von Wasser und Pulver wird in Containern oder Tankwagen angeliefert.

In der Baupraxis haben sich überwiegend die pulverförmigen Silicafumezusätze wegen der einfachen Handhabung und Lagerung durchgesetzt.

Ein deutlicher Durchbruch in der modernen Betontechnologie konnte durch die Einführung von formulierten Silicafume-Zusätzen, wie der Sika-crete Produktlinie, erzielt werden. Generell wer-

den dabei sämtliche Betoneigenschaften deutlich verbessert.

- Pulver nicht kompaktiert	0.15-0.25 kg/lt
- Pulver kompaktiert	0.50-0.65 kg/lt
- Pulver polymermodifiziert	0.70 kg/lt
- Slurry	1.40 kg/lt

Bild 4: Lieferformen von Silicafume

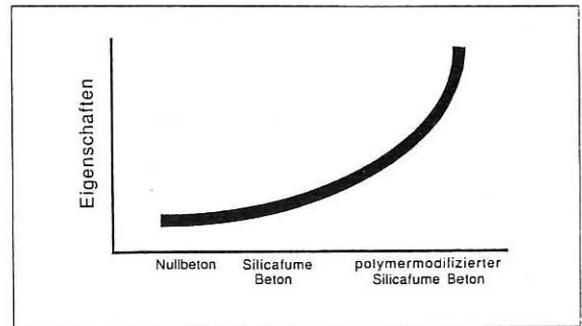


Bild 5: Silicafume - Technologie

### Silicafume im Spritzbeton

Hervorgerufen durch das ständig wachsende Qualitätsbewußtsein wird die Silicafume-Technologie heute auch vermehrt im Spritzbeton eingesetzt.

Es ergeben sich dadurch Verbesserungen folgender Eigenschaften:

- Erhöhung der Druckfestigkeiten
- Verbesserung der Wasserdichtigkeit
- Gute Haft/Zug-Festigkeiten
- Erhöhte Sulfatbeständigkeit
- Hohe Frost- und Tausalzbeständigkeit
- Hohe Wirtschaftlichkeit durch Rückprallreduktion
- Bessere Pumpbarkeit im Naßspritzverfahren
- Dickere Spritzschichten durch erhöhte Kohäsion

Ein wichtiges und für den Anwender ausschlaggebendes Kriterium ist die baustellengerechte Dosierung und Lagerung sowie die Kombinierbarkeit mit Abbindebeschleunigern wie z. B. Sigunit.

### Silicafume Pulverdosisierung

- Das kompaktierte Pulver wird im Betonwerk do-

siert mit auf Mischergrößen und Rezeptur konfektionierten Säcken oder über Silo und Zementwaage, was eine konstante Dosierung garantiert.

- Es sind keine zusätzlichen Dosiergeräte im Vortrieb notwendig.
- Da ein herkömmliches, jedoch vergütetes Trokengemisch gefördert wird, kann mit allen Benetzungsdüsen, so auch Hochdruck, gearbeitet werden.
- Durch die Fähigkeit von  $\text{SiO}_2$ -Pulver, Wasser an sich zu binden, ist die Vorhydratation des Zementes geringer.
- Besonders praxisgerecht ist die gute Lagerstabilität und Frostunempfindlichkeit.

### Silicafume Slurrydosierung

- Die Dosierung von Silicafume Slurry ermöglicht eine Dosierung direkt im Vortrieb und schafft somit eine Betonwerkunabhängigkeit.
- Keine Staubentwicklung bei der Zudosierung, jedoch auch keine meßbare Staubreduktion bei der Spritzbetonapplikation.
- Für den Slurry sind spezielle Dosierpumpen notwendig.
- Wegen der hohen Abrasion und dem großen Feststoffgehalt sind der Düsenteknik besondere Beachtung zu schenken (bei verstopften Düsenlöchern nicht optimale Benetzung des Spritzgutes).
- Das Material ist als wässrige Suspension frostempfindlich und muß im Winter an der Wärme gelagert werden.
- Silicafume Slurry ist nur kurze Zeit stabil und muß später wieder aufgemischt werden, außer wenn er ständig umgewälzt wird.

### Silicafume kombiniert mit BE-Mittel

- Silicafume-Pulver, kombiniert mit BE-Mittel, ergibt für die Installationen keinen Unterschied zum üblichen Spritzen mit Beschleunigern, d. h. zusätzlichen Dosiergeräten im Vortrieb und Spezialwasserringe entfallen.
- Slurry, kombiniert mit BE-Mittel, erzwingt vom

Chemismus her nebst zwei Dosierpumpen, eine für BE und eine für Slurry, auch zwei Wasserringe.

### Naßspritzbeton mit Silicafume

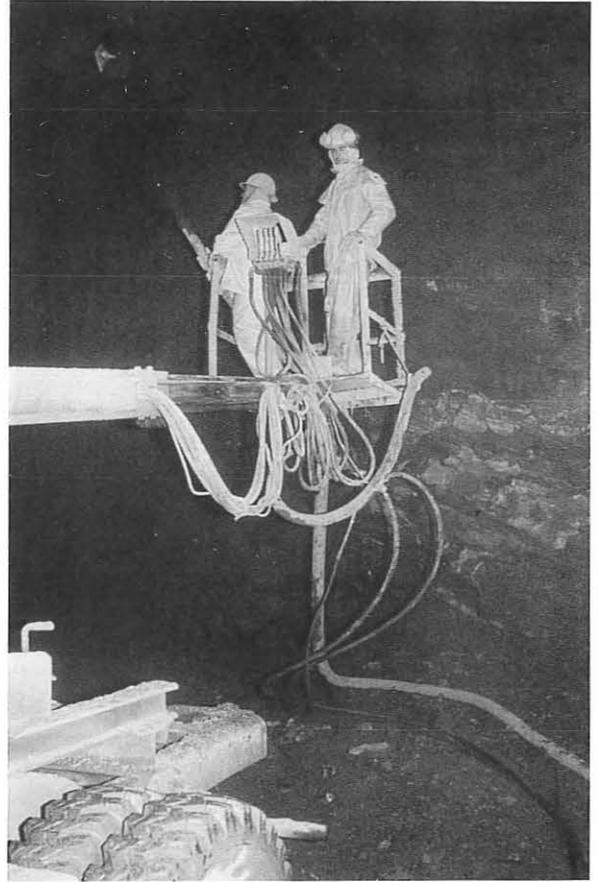


Bild 6: Leistungsfähiger Naßspritzbeton von der Arbeitsbühne aus aufgetragen

Körnung	0-16mm	0-8mm
Zement (PC Untervaz)	430kg/m <sup>3</sup>	
Zusatzstoffe:		
- Silicafume	0-15 %	
- Sikacrete-PP1	10 %	
Zusatzmittel:		
- Sigunit L20	3 %	
- Sikament 300	1.2 %	
Ausbreitmass	37-58cm	
W/Z-Wert	0.40-0.46	

Bild 7: Naßspritzbetonrezeptur Tunnel Acla-Tobel

Im folgenden Beispiel wird auf die Tunnelbaustelle Acla-Tobel eingegangen, wo auf Initiative der Bauunternehmung Andrea Pitsch und ihres Baustellenleiters im März 89 umfangreiche Naßspritzversuche mit 10 Vergleichsmischungen durchge-

führt wurden. Die Versuche sollten zeigen, ob unter Verwendung einheimischer Zuschlagstoffe die Qualitätsanforderungen des Kantonalen Tiefbauamtes Graubünden für **frostbeständigen Spritzbeton** (unter anderem  $fc_{w,28} = 35 \text{ N/mm}^2$ ) erfüllt werden können.

Die Tunnelbaustelle Acla-Tobel stand Ende März 89 vor Wiederaufnahme der Vortriebsarbeiten für die Versuche zur Verfügung. Aus diesem Grunde konnten, mindestens was Dosier- und Mischprozesse, Transporte, Spritzverfahren und Untertag-Klimabedingungen betrifft, baustellengerechte Versuchsbedingungen gewährleistet werden. Insofern ideale Verhältnisse herrschten u. a. bezüglich des Fehlens von Erschütterungen infolge von Spreng- oder Schutterarbeiten. Die Applikation erfolgte an der Vertikalen, sodaß auch mit geringen und nicht den Baustellendurchschnitt entsprechenden Dosierungen von Sigunit L20 gespritzt wurde. Eine nachfolgende umfassende Prüfung der Spritzbetonfelder in Zusammenarbeit mit den Prüfinstituten Geo-Bau-Labor Chur, Hagerbach AG Sargans und LPM Beinwil am See beendete die erfolgreichen Versuche.

### Prüfumfang

- Zuschlagstoffe:
  - Korngrößenverteilungen Einzelfraktionen und Gemische 0-8 mm und 0-16 mm
  - Petrographie
  - Kubizitätsverhältnisse
- Frischbeton (vor Spritzen):
  - Konsistenz/Ausbreitmaß
  - Luftporen
  - W/Z-Wert
  - Rohdichte
- Festbeton:
  - Druckfestigkeiten
    - Bohrkern 7/28/60/90 Tage
    - Würfel 28/90 Tage
  - Frostbeständigkeiten
    - FS
    - BE I
  - Gefügequalität
  - Elastizitätsmodul
  - Permeabilität nach Darcy

Als Überblick der Resultate sind in **Bild 8** die Druckfestigkeiten des beschleunigten Spritzbetons dargestellt, wobei erwähnenswert ist, daß allen Betonen zum Erreichen eines tiefen w/z Wertes Sikament 300 zugegeben wurde. Dank diesen optimalen Voraussetzungen weist auch die 0-Mischung

ausgezeichnete Druckfestigkeiten auf. Eine deutliche Steigerung in allen Prüfungen wird jedoch erst bei der Betonrezeptur mit Sikacrete-PP1 erreicht.

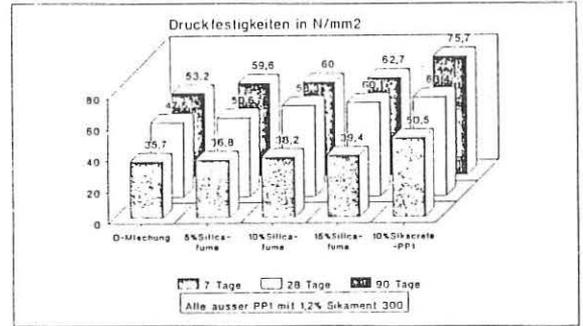


Bild 8: Naßspritzbeton 0 - 16 mm PC 430

Aus den ausgeführten Gefügeanalysen zur Bestimmung der Frostbeständigkeit und weiteren Untersuchungen resultierte eine Naßspritzbetonrezeptur für höchste Ansprüche mit folgenden Eigenschaften:

Druckfestigkeiten 7/28/90 Tage: 50/63/67 N/mm<sup>2</sup>

Raumgewicht: 2,32 kg/l

Frostbeständigkeit FS (Norm SIA 162/1): 1,8 hoch

Frostbeständigkeit  
Statistischer Porenabstandsfaktor (Norm SIA 162/1): 0,197 hoch

Frostbeständigkeit nach D-R  
Widerstandsfaktor: > 80 % gut

Wasserdichtigkeit  
Permeabilität nach Darcy:  $8,2 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$  gut

E-Modul stat.: 30 600 N/mm<sup>2</sup>

### Trockenspritzbeton mit Silicafume

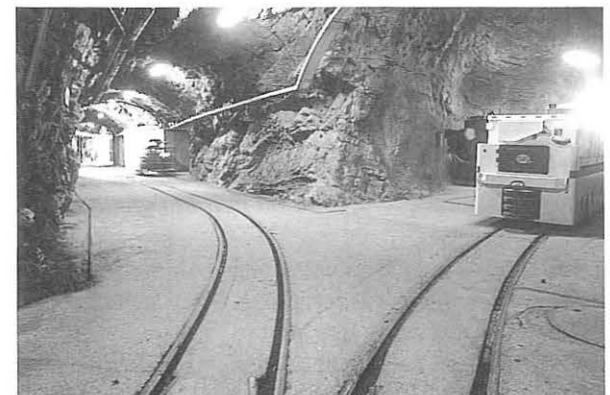


Bild 9: Versuchstollen Hagerbach (Sargans)

Zur genauen und möglichst wissenschaftlichen Ausprüfung von Eigenschaften und Möglichkeiten der Silicafume-Technologie und der Kombinierbarkeit mit unterschiedlichen Beschleunigern wurden systematisch verschiedene Rezepturen im Trockenspritzverfahren geprüft.

Die Arbeiten wurden unter baustellenähnlichen Bedingungen im Versuchsstollen Hagerbach durchgeführt.

**Rezeptur für 1000 l Trockengemisch**

Zuschlag 0-4 mm 940 kg  
 Zuschlag 4-8 mm 510 kg

Zement (PC Untervaz) 350 kg

Zusatzstoffe:  
 - Sikafume 5 %/10 %  
 - Sikacrete-PP1 5 %/10 %

Zusatzmittel:  
 - Sigunit N2 6 %  
 - Sigunit L62 4 %

Ein Auszug dieser Resultate soll zeigen, wie durch Zugabe von Silicafume und insbesondere durch die Verwendung von formulierten Produkten wie Sikacrete-PP1 die physikalischen Eigenschaften beeinflusst werden können.

Silicafume Spritzbeton sollte jedoch für einige Prüfungen als Sonderbaustoff betrachtet werden. Dies zeigt besonders deutlich der Vergleich zwischen der Frostbeständigkeit FS und der Frosttausalzbeständigkeit BE II.

Ein silicafumevergüteter Spritzbeton mit Sikacrete-PP1 besitzt einen Porengehalt, der ca. 30 % tiefer liegt als bei einer Nullmischung. Dieser Spritzbeton erreicht nach der Meßmethode von FS nur einen Wert von 0,9, was eine tiefe Frostbeständigkeit erwarten läßt. Genau der gleiche Sikacrete-PP1 vergütete Spritzbeton besteht jedoch die härteste Materialprüfung, BE II Frosttausalz mit 400 Zyklen, mit Erfolg.

Die Sika-Silicafume-Technologie eröffnet neue Dimensionen der Bemessung und ermöglicht weitere Einsatzmöglichkeiten für den Spritzbeton.

So findet zum Beispiel die Silicafume-Technologie im Trockenspritzverfahren bei folgenden Problemlösungen ihren Einsatz.

- Hohe Festigkeiten auch bei durch den Baubetrieb und die Ausbruchart gestörten Spritzbetons.
- Hohe Festigkeiten erlauben dünnere Schalen für

den Endausbau.

- Hohe Dichtigkeit und geringe Porosität, wo mit Sikacrete-PP1 im Trockenspritzverfahren erstmals Porenkennwerte wie beim Konstruktionsbeton erreicht wurden.
- Die Kombination von Silicafume-Produkten mit Beschleunigern, die sowohl hohe Frühfestigkeiten wie Endfestigkeiten aufweisen. Dies ermöglicht ein frühes Aufnehmen von Lasten zur Verminderung von Setzungen und Konvergenzen.
- Frost-/oder frosttausalzbeständiger Spritzbeton für stark belastete Baukörper.

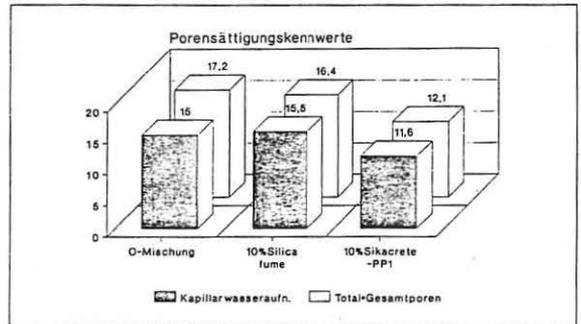


Bild 10: Trockenspritzbeton 0 - 8 mm PC 350 (Porensättigungskennwerte)

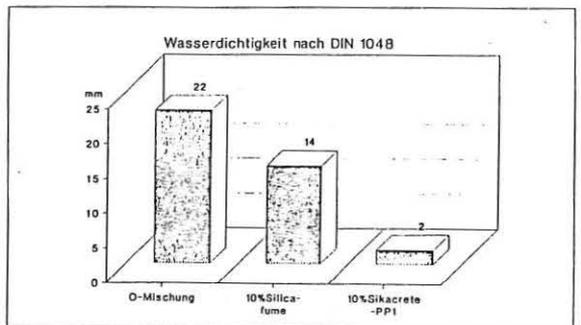


Bild 11: Trockenspritzbeton 0 - 8 mm PC 350 (Wasserdichtigkeiten)

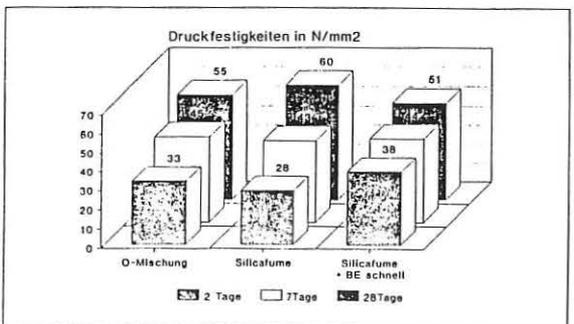
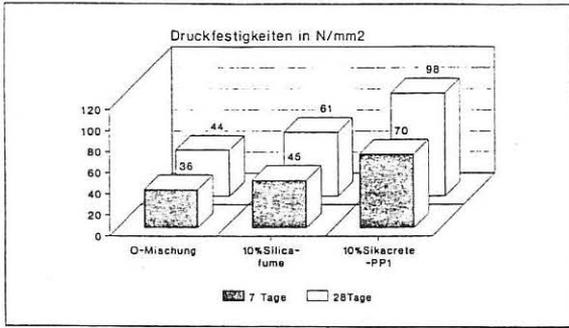
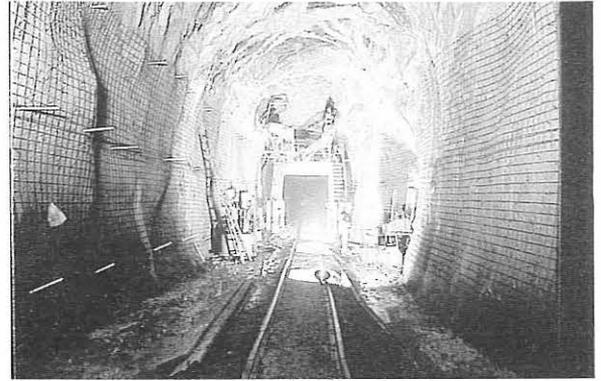


Bild 12: Trockenspritzbeton 0 - 8 mm PC 350 (Druckfestigkeiten)



*Bild 13: Trockenspritzbeton 0 - 8 mm PC 350  
(Druckfestigkeiten)*

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß mit der Sika Silicafume-Technologie, den Kombinationsmöglichkeiten mit Abbindebeschleunigern und der fachkompetenten Betreuung der Baustellen ein



*Bild 14: Anwendungsbeispiel einer Spritzbetonschale mit Höchstanforderung*

neuer Qualitätsstandard für den Spritzbeton möglich ist. Wir sind überzeugt, daß diese Technologie auch in die Praxis umgesetzt werden kann.