

Spritzbeton hoher Güte für die einschalige Spritzbetonbauweise

HIGH-GRADE SHOTCRETE FOR THE SINGLE PERMANENT SHOTCRETE LINING METHOD

Dipl.-Ing. Dr. Wolfgang Kusterle, a.Univ.-Prof. Ing. Dr. Walter Lukas, Institut für Baustofflehre und Materialprüfung der Universität Innsbruck.

Bei einer einschaligen Spritzbetonbauweise im Felshohlraumbau ersetzt eine zeitlich zum Sicherungsspritzbeton versetzt aufgebrachte Spritzbeton-Schichte die Ortbeton-Innenschale. Sie wird in der Regel nach dem Abklingen der Verformungen auf den Sicherungsspritzbeton aufgebracht. Durch den innigen Verbund der Spritzbetonschichten ist ein Zusammenwirken im Sinne einer Verbundkonstruktion sichergestellt. Der Ausbruchsquerschnitt und der Betonverbrauch verringern sich. Die Verwendung einer Schalung ist durch diese Maßnahme nicht mehr erforderlich.

Bisher bekannten Versuchen war es auf Grund der Zusammensetzung des Spritzbetons und der Auftrags-technik schwer möglich, eine eventuell notwendige Bewehrung zielsicher ganzseitig einzubetten und dichten Spritzbeton hoher Güte herzustellen.

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, aus betontechnologischen Gesichtspunkten die bisher bestehenden Probleme zu beheben. Dazu war es notwendig, neben der Optimierung der Zusammensetzung und der Auftragstechnik folgende Maßnahmen zu setzen: Die Dosierung des Erstarrungsbeschleunigers im Sicherungsspritzbeton mußte tief gehalten werden, weitere Schichten waren ohne (beim Naßspritzverfahren mit geringer) Erstarrungsbeschleunigerzugabe zu verarbeiten. Um den Auftrag größerer Schichtstärken zu ermöglichen, erfolgte der Zusatz von Si-Stoffen. Dadurch wurden auch die Dichtigkeit und die Beständigkeit gegen chemische Angriffe verbessert, die Festigkeit angehoben und der Rückprall herabgesetzt. Nach dem Auftrag des Sicherungsspritzbetons und der Spritzbeton-Innenschichte erfolgte eine Nachbehandlung der Oberflächen. Um ausreichenden Haftverbund zwischen den einzelnen Schichten zu erzielen, mußte eine geeignete Vorbehandlung der Auftragsflächen durchgeführt werden.

Betontechnologische Meßwerte eines bereits ausgeführten Projektes ergänzen die Ausführungen.

With the single permanent shotcrete lining method in underground construction in rock, a shotcrete layer placed subsequently to the application of the supporting shotcrete replaces the cast in-situ inner lining. As a general rule, this layer is placed on the supporting shotcrete after the deformations have faded. Because of the firm bond of the shotcrete layers, their interaction in the sense of a bonded construction is ensured. The excavation section and the concrete consumption are reduced. Formwork is no longer required.

With the composition of the shotcrete and the placing technique employed in former tests, it was difficult to fully incorporate any necessary reinforcement and to produce dense high-grade shotcrete.

The purpose of our investigations was to solve the existing problems from the viewpoint of concrete technology. This required the following measures in addition to the optimization of the concrete composition and the placing technique. The accelerator dosage in the supporting shotcrete had to be kept low, additional layers had to be placed without accelerator (dry process) or only a very small quantity of accelerator was admixed (wet process). Silica fume materials were added to allow the placing of thicker layers. In this way, the tightness of the concrete and its

resistance to chemical attack was enhanced, the strength was increased and the rebound lowered. After the application of the supporting shotcrete and the shotcrete inner layer, the surfaces had to be cured. In order to achieve sufficient bond between the individual layers, the substrate had to be pretreated in an appropriate manner.

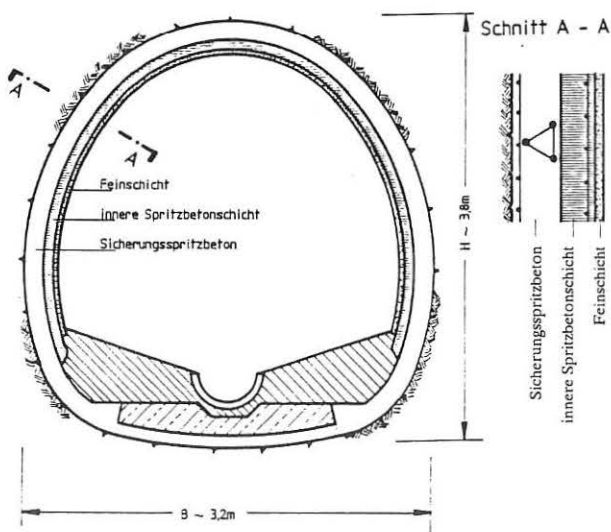
Moreover, the concrete technological measuring results from an already completed project are presented in the paper.

1. Einleitung

Die Idee der einschaligen Bauweise ist nicht neu. Speziell bei kurzen Tunnelbauwerken oder Tunnelquerschnitten mit komplizierter Geometrie wird diese Bauweise aus Kostengründen interessant. Dabei erfolgt die Sicherung des Tunnelausbruchs wie beim zweischaligen Ausbau, jedoch mit etwas höheren Anforderungen an die Spritzbeton-Außenschicht. Statt einer Isolierung und der Ort beton-Innenschale ersetzen mehrere Spritzbetonschichten die Ort beton-Innenschale. Diese Schichten werden nach dem Abklingen der Verformungen analog den Prinzipien der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise aufgebracht. Um als Verbundquerschnitt wirken zu können, müssen spezielle Güteanforderungen an die Außenschicht sowie an die Innenschicht und deren Verbundverhalten gestellt werden. Der Name "Einschalige Spritzbetonbauweise" bezieht sich nicht auf das Aufspritzen einer einzigen Spritzbetonlage, sondern auf das Zusammenwirken mehrerer Schichten als eine Schale. Die Fuge wird nicht mit Schubbewehrung abgedeckt.

Bisher in der Literatur /1, 2/ bekannte Ausführungsarten der einschaligen Spritzbetonbauweise hatten meist mit der Wasserdichtigkeit der Auskleidung Schwierigkeiten. Daher mußten aufwendige Injektionsarbeiten eingeplant werden. Der Auftrag des Spritzbetons erfolgte dabei allerdings unter Zusatz von Erstarrungsbeschleunigern. Qualitätseinbußen beim Spritzbeton waren die Folge.

1989 wurde ein 3,2 km langer Abwasserstollen in der einschaligen Bauweise aufgeföhren (Bild 1). Die dabei gemachten Erfahrungen und Untersuchungen flossen in das Projekt einer einschaligen Spritzbetonbauweise für eine 60 m lange Teststrecke der Münchner U-Bahn ein /3, 4, 5/. Im folgenden werden die betontechnologischen Maßnahmen zur Erzielung einer hohen Güte für die einschalige Spritzbetonbauweise noch einmal zusammengefaßt, soweit sie schon im Pilotprojekt eingesetzt bzw. aus den Erfahrungen des Pilotprojektes für die Teststrecke in München weiter verbessert worden sind. Beide Projekte werden mit Hilfe des Trockenspritzverfahrens errichtet. Sinngemäß gelten die Ausführungen aber auch für das Naßspritzverfahren.



2. Sicherungsspritzbeton

Der Sicherungsspritzbeton erfüllt im Tunnelbau mehrere Aufgaben. Durch die hohe Aufprallenergie dringt er in kleinste Spalten und Klüfte des Gesteins ein und verhindert damit Auflockerungen der Gebirgsoberfläche. Außerdem schließt er das Gebirge gegen Wasser und Luftzutritt ab. Der Sicherungsspritzbeton muß rasch in großen Schichtstärken über Kopf aufgetragen werden können. Dies muß auch bei Wasserzutritt (flächigem Zutritt) möglich sein. Durch die unmittelbar nachfolgenden Arbeitsschritte wie das Bohren von Ankern, Eintreiben von Spießen und Dielen und die Erschütterungen durch den Sprengschlag wird der Spritzbeton schon zu frühen Zeiten beansprucht. Er benötigt entsprechende Frühfestigkeiten, um diese Beanspruchungen zu ertragen. Außerdem ist es von Wichtigkeit, daß der Sicherungsspritzbeton rasch Festigkeiten erlangt, um einen Ausbauwider-

Bild 1: Querschnitt und Aufbau der Spritzbetonschale eines mit einschaliger Spritzbetonbauweise ausgeführten Stollens

8. Die Messungen des Rückpralls, also von Spritzbeton, der beim Aufspritzen infolge der Auftragsgeschwindigkeit abprallt und unbrauchbar wird, bestätigten, wie auch schon die Vorversuche gezeigt hatten, eine deutliche Rückprallreduzierung von üblicherweise 35 - 40 % auf 15 - 20 %.
9. Bei eingespritztem Baustahlgewebe (Bild 14, 15) mit und ohne Übergreifstoß, Rundstahl bis Durchmesser 14 mm, Gitterbögen (Bild 16, 17) und außenliegenden Fugenbändern (Bild 18, 19) wurde das Auftreten von Spritzschatten und Wasserwegigkeiten entlang der Einbauteile untersucht.

Diese Einbauten und insbesondere die Stege der außenliegenden Fugenbänder, wurden von dem mit Microsilica verbesserten Spritzbeton satt umhüllt.

Spritzschatten, wasserführende Drainageerscheinungen, Hohlräume und Fehlstellen entlang der Einbauten konnten bei allen Probekörpern nicht festgestellt werden.



Bild 18: Fugenband in Versuchsplatte 7 vor dem Einspritzen

Fig. 18: Joint Ribbon in Test Box No. 7 prior to Shooting

4. Ausführung der einschaligen Stollenauskleidung

Auf der Basis der erläuterten statischen und technischen Vorüberlegungen und den Erkenntnissen aus der Anwendung von Spritzbeton mit dem Zusatzstoff Microsilica wurde im Frühjahr 1989 mit der einschaligen Spritzbetonauskleidung in dem Abwasserstollen begonnen.

Neben den genannten Vorüberlegungen und Vorerkenntnissen haben die Optimierung von betrieblichen Abläufen, neue Verfahrenstechniken

8. The measurements of the rebound, that is shotcrete rebounding as a result of the shooting velocity and becoming useless afterwards, confirm - as the preliminary test had already shown - a clear rebound reduction from usually 25 - 40 % to 15 - 20 %.
9. The appearance of spraying faults and water drainage along the a.m. built-in elements were analyzed for shot steel fabric (fig. 14, 15) with and without overlap, for reinforcement up to a diameter of 14 mm, for lattice girders (fig. 16, 17) and externally located joint ribbons (fig. 18, 19). These built-in elements and particularly the externally located joint ribbons were completely covered by the shotcrete mixed with microsilica. No spraying faults, water drainage, cavities and faults along the built-in elements could be found.

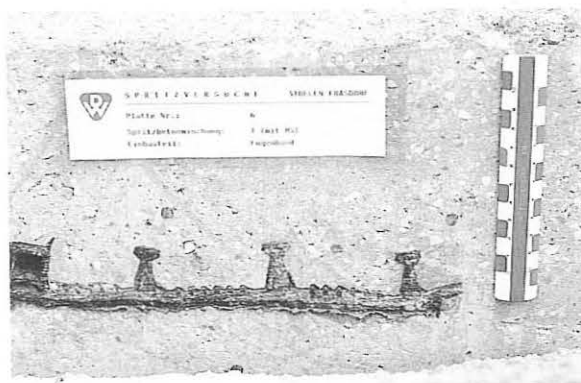


Bild 19: Schnitt durch Versuchsplatte 7

Fig. 19: Section of Test Slab No. 7

4. Execution of the Monocoque Tunnel Lining

Installation of the monocoque shotcrete tunnel lining of the sewer tunnel started in spring 1989, based on the described statical and technical considerations and the findings gained from the application of shotcrete mixed with the admixture microsilica.

Apart from the above mentioned considerations and experiences gained from the various tests, the optimization of operational processes, new techniques and the employment of experienced personnel during the shotcrete utilization have contributed to the successful execution of the monocoque shotcrete tunnel lining.

und die Abbinde­temperatur (Bild 13) zeigen in ihrem Verlauf keine Unstetigkeiten. Der günstige Verlauf der Abbinde­temperaturen und die relativ geringe Temperaturdifferenz über den Betonquerschnitt resultiert aus der Nachbehandlung und den gleichmäßigen klimatischen Verhältnissen im Stollen.

Im vorliegenden Fall konnten also die entstehenden Abbinde­temperaturen, das Schwindverhalten und die damit verbundene Rißbildung durch eine gezielte Nachbehandlung sehr gering gehalten werden.

- 7. Versuche mit und ohne Reinigung und Vorbenässung der Untergrundflächen haben das Verhalten der Haftzugfestigkeiten zwischen den einzelnen Schichten aufgezeigt. Es hat sich herausgestellt, daß nur bei Hochdruckwasserstrahlreinigung und ausreichender Vorbenässung der Untergrundflächen ein ausreichender Haftverbund erreicht werden kann.

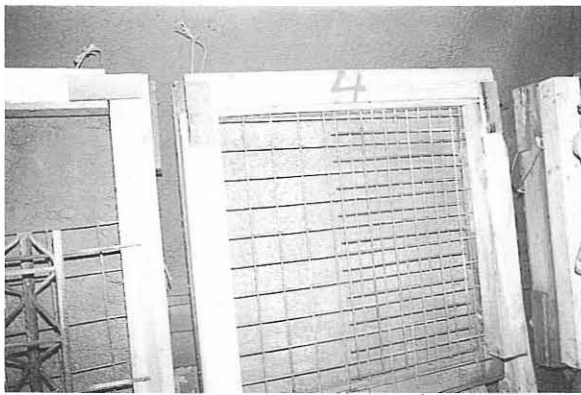


Bild 14: Baustahl­gewebe mit Übergreifungsstoß, Versuchsplatte 4 vor dem Einspritzen

Fig. 14: Steel Fabric with Overlap, Test Box No. 4 before Shooting

from the strains resulting from the mountains - decisively influenced by the appearing temperature of setting and the shotcrete shrinking. The temperature development above the cross section (fig. 12) and the temperature of setting (fig. 13) do not show any inconstancies. The favorable development of the temperatures of setting and the relatively slight temperature difference above the concrete cross section result from the curing and the steady climatic conditions in the tunnel. In the present case the temperatures of setting, the shrinking and the formation of cracks, linked to shrinking, could be kept low due to specific curing.

- 7. Tests carried out with or without cleaning or moistening the surfaces showed the bond action between the individual layers. Sufficient bond action can only be achieved, if the surfaces are cleaned with a high pressure water jet and are sufficiently moistened.

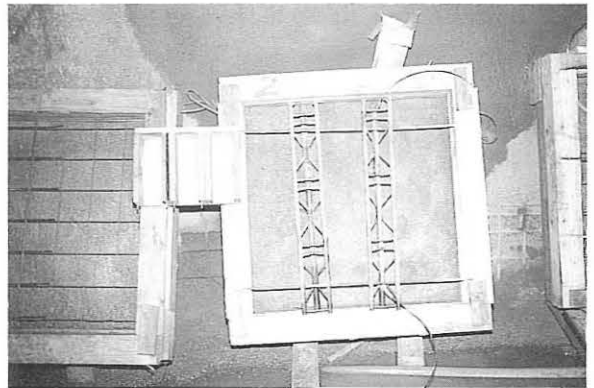


Bild 16: Gitterträger der Firma TAT Versuchsplatte 2 vor dem Einspritzen

Fig. 16: Lattice Girders Produced by the Company TAT, Test Box No. 2 prior to Shooting



Bild 15: Schnitt durch Versuchsplatte 4

Fig. 15: Section of Test Slab No. 4



Bild 17: Schnitt durch Versuchsplatte 2

Fig. 17: Section of Test Slab No. 2

gende Kristallisationskeime im Zement.

2. Spritzbeton der innenliegenden Schichten, aber auch der Sicherungsschichten kann bis zu einer Schichtstärke von 15 cm ohne Beschleuniger aufgespritzt werden.
3. Das Frühfestigkeitsverhalten nach ca. 100 Minuten entspricht einem mit 4 % Beschleuniger beschleunigten Spritzbeton, die Endfestigkeiten ($35 - 90 \text{ N/mm}^2$) liegen deutlich über den üblichen Festigkeiten von konventionellem Spritzbeton.

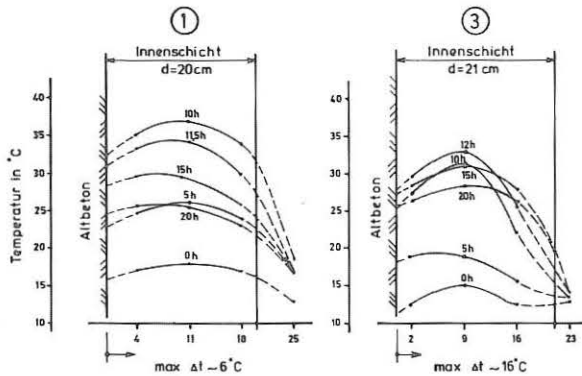


Bild 12: Temperaturgradienten über den Spritzbetonquerschnitt der Stollenauskleidung

Fig. 12: Temperature Gradients through the Shotcrete Tunnel Lining

4. Das Schwindverhalten von Spritzbeton mit Microsilica liegt unbedeutend über dem von Spritzbeton ohne Microsilica.
5. Bei Feuchthaltung des Spritzbetons tritt zunächst ein Quellen auf und danach ist das Schwinden erheblich geringer als bei fehlender Feuchthaltung (Bild 11). Dieses Verhalten zeigt deutlich, daß eine gute Nachbehandlung der aufgetragenen Spritzbetonschichten zur Verminderung der Rißbildung insbesondere dann, wenn wie in unserem Fall ohne Dehnfugen gearbeitet wird, notwendig ist. Eine gezielte Nachbehandlung ist möglich durch z.B. Aufsprühen von Nachbehandlungsmitteln oder durch kontinuierliches Feuchthalten.
6. Die Rißbildung im Stollen wird, abgesehen von den aus dem Gebirge resultierenden Spannungen, maßgebend durch die entstehenden Abbinde Temperaturen und das Schwindverhalten des Spritzbetons beeinflusst. Die Temperaturentwicklung über den Querschnitt (Bild 12)

1. Microsilica admixed to shotcrete has 3 phenomena:
 - a suction effect
 - an adhesion effect
 - a cristalisation effect

The suction and adhesion effect causes the bond strength of the shotcrete after shooting. The cristalisation effect results in an accelerated cement reaction. The small SiO_2 -particles apparently react as accelerating cristalisation buds in the cement.

2. Shotcrete of the inner layers, but also of the securing layers, can be shot 15 cm thick without application of an accelerator.
3. The shotcrete strengthening after about 100 minutes corresponds to a shotcrete admixed with 4 % accelerator; the final strengths ($35 - 90 \text{ N/mm}^2$) are significantly higher than those of conventional shotcrete.

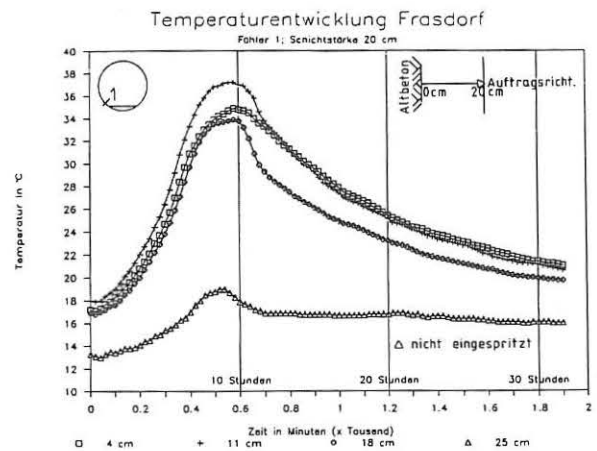


Bild 13: Temperaturentwicklung

Fig. 13: Temperature Development

4. Shrinking of shotcrete containing microsilica is negligibly higher than that of shotcrete without microsilica.
5. Shotcrete first of all swells if kept moist, and afterwards the shrinking is much less than if kept dry (Fig. 11). This reaction clearly shows that a good curing of the already implemented shotcrete layers is necessary, in order to reduce the formation of cracks, particularly if - as in the present case - tunnel works are done without means of expansion joints. A specific curing is possible by e.g. spraying on curing products.
6. The formation of cracks in the tunnel is - apart

5. Die Streubereiche der ermittelten Festigkeitswerte sind geringer als bei konventionellem Spritzbeton. Die Bauwerksqualität unterliegt damit keinen außergewöhnlichen Qualitätsschwankungen, wie dies bei konventionellem Spritzbeton der Fall ist.

Neben all diesen positiven Aspekten ergab sich aus der Anwendung von Microsilica eine Reduzierung der Gesamtkosten um ca. 11 % pro m³ verarbeitetem Spritzbeton.

Nach Abschluß der Vorversuche wurde vom Arbeitskreis "Einschalige Spritzbetonbauweise" ein weiteres umfangreiches Versuchsprogramm ausgearbeitet. Versuche, die unter Baustellenbedingungen im Stollen durchgeführt wurden, lieferten weitere Erkenntnisse zur Vorbereitung einer Teststrecke für den Münchner U-Bahn-Bau.

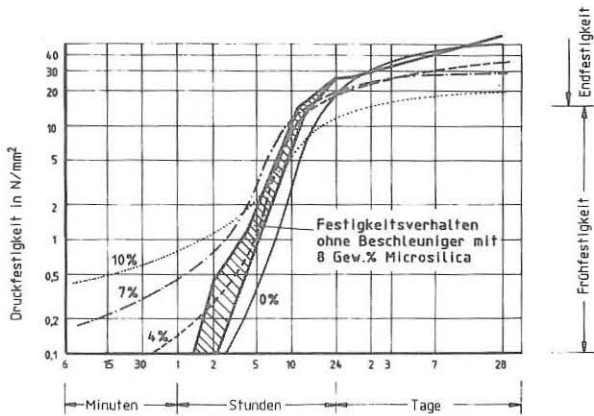


Bild 10: Festigkeitsentwicklung von Spritzbeton mit unterschiedlicher Zusatzmitteldosierung

Fig. 10: Shotcrete Strengthening Development

Im einzelnen ergaben diese Versuche folgende Aufschlüsse:

1. Microsilica im Spritzbeton bewirkt drei Phänomene:
 - einen Saugeffekt
 - einen Klebeefferkt
 - einen Kristallisationseffekt.

Der Saug- und Klebeefferkt bewirkt, daß der Spritzbeton während des Aufspritzens auf der Ausbruchslaibung bzw. auf der zuletzt gespritzten Schicht haftet.

Der Kristallisationseffekt bewirkt eine Beschleunigung der Zementreaktion, d.h. die sehr kleinen SiO₂-Partikel wirken offensichtlich als beschleuni-

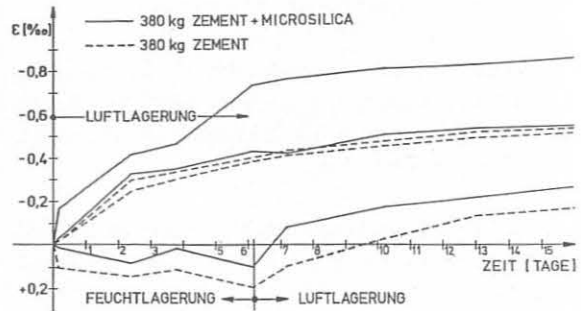


Bild 11: Schwindverhalten mit und ohne Microsilica bei Feucht- und Luftlagerung

Fig. 11: Shrinking with and without Microsilica

at the contact surfaces of the individual layers, in order to obtain a homogenous support effect in all layers. This is a major requirement of the "monocoque tunnel lining".

3. Microsilica absorbs a major part of the mixing water. The calcium-silicate-hydrate crystals, which are then formed, reduce the porosity in the shotcrete considerably. The concrete is tight. The resistance to chemical attack is increased. Enhanced resistance to sulfates and chlorides makes the application of sulfate cements unnecessary. According to the German DIN 4030 this shotcrete is characterized by a high resistance to "weak" chemical attack.
4. The water penetration, measured on various test objects coming from one construction part, amounted to a maximum of only 2 cm.
5. The deviations of all strength values are inferior to those of conventional shotcrete. The construction quality is therefore not subject to extraordinary shotcrete quality variations.

Apart from all the a.m. positive aspects, the overall costs are reduced by about 11 % per m³ used shotcrete, through using microsilica.

After the test termination, a further extensive testing program was prepared by the "monocoque shotcrete tunnelling method"-committee. Tests carried out under construction site conditions in the tunnel provided new know-how for the preparation of the Munich subway test line.

In detail, the tests had the following results:

1. Durch eine erhöhte Kohäsion der Mischung kommt es insgesamt zur Reduzierung des Rückpralls. Lag bisher der Rückprall im Untertagebau bei 30 - 40 %, so beträgt er bei Zugabe der Slurry nur noch 15 - 20 %.
2. Erstarrungsbeschleuniger können bei Aufspritzen von Schichtstärken bis 15 cm entfallen. Dies ist letztlich der ausschlaggebende Einfluß zur Qualitätsverbesserung des Spritzbetons.
3. Die Entmischungstendenz verringert sich.

Ebenso wie die Frischbetoneigenschaften ändern sich dementsprechend positiv auch die Festbetoneigenschaften:

1. Die ermittelten Druckfestigkeiten liegen über 30 N/mm².
2. Die Haftzugfestigkeiten erreichen die erforderlichen Werte. Hohe Haftzugfestigkeiten in den Berührungsflächen der einzelnen Schichten sind notwendig, um eine homogene Tragwirkung über mehrere Schichten zu erhalten. Dies ist eine Grundvoraussetzung der "Einschaligen Tunnelauskleidung".

HAFTZUGFESTIGKEIT N/mm ²				
Verfahren	Zusatz	Gneis	Kalk	Beton
trocken	7, 8% BE	0, 64	0, 62	1, 19
trocken	SLURRY	1, 49	1, 37	2, 84

Bild 8: Haftzugfestigkeiten

Fig. 8: Bonding Strengths

3. Microsilica absorbiert einen Großteil des Anmachwassers. Die dabei entstehenden Calcium-Silicat-Hydrat-Kristalle reduzieren die Porosität des Spritzbetons erheblich. Der Beton ist dicht. Die Widerstandsfähigkeit gegen chemische Angriffe nimmt zu. Eine erhöhte Resistenz gegen Sulfate und Chloride erspart die Verwendung von Sulfatzementen. Entsprechend der deutschen DIN 4030 ist dieser Spritzbeton gekennzeichnet durch einen hohen Widerstand gegen "schwachen" chemischen Angriff.
4. Die Wassereindringtiefe, gemessen an mehreren Probekörpern aus einem Bauteil, beträgt nur noch max. 2 cm.

28 TAGE DRUCKFESTIGKEIT N/mm ²				
Zement PZ 35 f	Zusatz	Wand	über Kopf	Beton
380kg	5% BE	28	25	37
350kg	40kg MS	35	32	38
350kg	Slurry	35	30	37

Bild 7: 28-Tage-Druckfestigkeit

Spritzbeton konventionell mit Beschleuniger	ca. 15 - 25 N/mm ²
Spritzbeton mit Microsilica ohne Beschleuniger	ca. 35 - 90 N/mm ²
Spritzbeton mit Microsilica mit Beschleuniger	ca. 25 - 40 N/mm ²

Fig. 7: 28-Days-Compressive Strength

Conventional shotcrete with application of an accelerator	ca. 15 - 25 N/mm ²
Shotcrete admixed by microsilica without utilization of an accelerator	ca. 35 - 90 N/mm ²
Shotcrete admixed by microsilica with application of an accelerator	ca. 25 - 40 N/mm ²

EINSPARUNGEN BEI VERWENDUNG VON MICROSILICA IM SPRITZBETON		
Einsparungsanteil	Wand	über Kopf
Rückprallreduzierung	∕ 37%	∕ 31%
Zementreduzierung	∕ 14%	∕ 7%
Stunden	∕ 80%	∕ 67%
Energie	∕ 31%	∕ 25%
Geräte	∕ 4%	∕ 3%
Verschleiß	wurde vernachlässigt	
Mehrkosten aus Microsilica-Slurry	+ 66%	+ 33%
Einsparung	= 100%	= 100%
Einsparung in % bezogen auf die Gesamtkosten pro m ³ verarbeiteten Spritzbeton	7%	13%

Bild 9: Einsparungen bei Verwendung von Microsilica im Spritzbeton

Fig. 9: Savings when using Microsilica in Shotcrete

2. The bonding strengths reach the required values. High bonding strengths are necessary

nischen Gründen wird beim Einbau der Erstsicherung und wegen der Verwendung von Beschleunigern bei der Erstsicherung davon ausgegangen, daß der Sicherungsspritzbeton wasserundurchlässig ist. Dagegen erfüllen die innenliegenden Schichten die Kriterien eines wasserundurchlässigen Betons, d.h. der Wasserdruck wirkt theoretisch in der Kontaktfläche zur ersten Innenschicht, wird jedoch bei ausreichendem Haftverbund in der Kontaktfläche statisch vom Gesamtsystem, also der Erstsicherung und den Innenschichten, aufgenommen.

Eine weitere Besonderheit besteht darin, daß das Schwinden des Spritzbetons nicht mit Dehnfugen, sondern durch Längsbewehrung aufgenommen wird. Diese Vorgehensweise hat sich im Betonbau, z.B. bei schlaffbewehrten Druckwasserbehältern /3, 4/ schon früher bewährt und führt insgesamt zu einer Verbesserung der Wasserundurchlässigkeit.

Der Verbundquerschnitt wird in Ringrichtung nach den üblichen Berechnungsmethoden berechnet und bemessen. Ein zusätzlicher Nachweis erfolgt für den Endzustand in Längsrichtung.

3. Eignungsprüfung, Versuche vor und während der Stollenbaumaßnahme

Alle die technischen und statischen Überlegungen können nur dann funktionieren, wenn der für den Stollen- und Tunnelbau maßgebende Baustoff "Spritzbeton" die entsprechenden Grundvoraussetzungen liefert. Im Rahmen von Vorversuchen mit Spritzbeton und dem Zusatzstoff Microsilica, der Firma Elkem, an der Universität Innsbruck und auf der Baustelle hat sich herausgestellt, daß mit Microsilica ein hochwertiger Qualitätsspritzbeton hergestellt werden kann.

Aus was besteht nun dieser Zusatzstoff Microsilica und wie wirkt er sich auf die Spritzbetonqualität aus?

Microsilica ist ein Produkt aus den Filtern der Ferrosiliciumproduktion. Ein Staub, der sich in den Filtern absetzt, erheblich feiner als Tabakqualm ist und zu 85 - 90 % aus amorphem Siliciumdioxid besteht.

Microsilica wird mit 5 - 10 Gewichtsprozent, bezogen auf den Zementgehalt, dem Spritzbeton als Suspension bzw. Slurry zudosiert. Von einer pulverförmigen Zugabe beim Trockenspritzverfahren wird wegen der erhöhten Staubeentwicklung abgeraten.

Microsilica beeinflusst die Frischbetoneigenschaften positiv:

Innsbruck University, proved that by using microsilica a high quality shotcrete can be produced.

RÜCKPRALL			
Zement PZ 35 f.	Zusatz	Wand	über Kopf
380 kg	5% BE	21%	37%
350 kg	40 kg MS	16%	30%
350 kg	Slurry	9%	18%

BE - Beschleuniger
MS - Microsilica Pulverform
Slurry - Microsilica Suspension

Bild 6: Rückprall

Fig. 6: Rebound

What elements does the admixture microsilica consist of and what is its effect on the shotcrete quality?

Microsilica is a by-product of the manufacture of ferro-siliconmetals. The silica fume, which is filtered, has a purity exceeding the one of tobacco smoke and consists of 85 - 90 % very fine amorphous silicon dioxide.

Microsilica is added to shotcrete as a means of suspension or slurry at a dose of 5 - 10 % of the weight of cement volume. Due to the dust formation, a powdery addition during the dry shot process is not recommended.

Microsilica has a positive impact on the properties of fresh concrete:

1. Increased cohesion of the mixture generally leads to a reduced rebound. Without using microsilica, the rebound in tunnelling was up to 30 - 40 %, but after adding slurry it was reduced to only 15 - 20 %.
2. There is no longer any need for applying accelerators when shooting 15 cm thick layers.
3. Another benefit is that the segregation tendency is reduced.

Accordingly, microsilica has a positive effect on hardened concrete properties as well:

1. Compressive strength amounts to more than 30N/mm².

daher nur auf Ergebnisse aus praxisorientierter Forschung und Ausführung.

2. Die "Einschalige Spritzbetonbauweise", vorgestellt an einer 3.200 m langen Abwasserstollenbaumaßnahme

Technische Überlegungen

Grundgedanke der einschaligen Spritzbetonbauweise ist das gleichmäßige Zusammenwirken mehrerer Schichten mittels ausreichender Verbundwirkung.

Die während des Vortriebs eingebaute Spritzbetonschicht mit all ihren zusätzlichen Sicherungsmitteln, also die Erstsicherung des geöffneten Hohlraumes, wird so konzipiert, daß z.B. bei seicht liegenden Tunneln rasch ein hoher Ausbauwiderstand aufgebaut wird. Damit werden die Verformungen an der Oberfläche minimiert. Die dann zu einem späteren Zeitpunkt eingebrachten weiteren Spritzbetonschichten ergeben durch Verbundwirkung mit der Erstsicherung die einschalige Spritzbetonauskleidung. Der Nachweis des Verbundes /1, 2/ kann z.B. nach einem Konzept aus dem Tunnelbau-Taschenbuch 1988 erfolgen.



Bild 5: Spritzbetonauskleidung des Abwasserstollens

Fig. 5: Shotcrete Lining of the Sewer Tunnel

Hierbei lagert sich nach Aufbringen der innenliegenden Spritzbetonschichten die Vorbelastung der außenliegenden Spritzbetonschicht - also die der Erstsicherung - infolge Kriechen, Schwinden und Temperaturzwang auf das Gesamtsystem um. Die hinzukommenden Lasten des Endzustandes, z.B. Wasserdruck und Verkehr, werden ebenfalls, zumindest statisch, auf die gesamte Spritzbetonauskleidung aufgebracht.

Eine Besonderheit ergibt sich bei der Berücksichtigung des Wasserdruckes. Aus verfahrenstech-

tunnelling method is the steady interaction between several layers by means of sufficient bond action.

The shotcrete layer, implemented during the drive, with all its additional securing means - i.e. the first securing of the tunnel - is concipated in a way that negligable settlement sare created e.g. in tunnels situated near the surface. Due to the bond action with the first securuing, the subsequently installed shotcrete layers result in the monocoque shotcrete lining. Proof of bonding /1, 2/ can be given according to a concept described in the 1988 tunnel construction manual.

After implementation of the inner shotcrete layers, the firstload which is exerted on the outer layer - which is that ofthe first securing - is shifted to the complete system as a consequence of creeping, shrinking and temperature stress. The additional loads of the final support, e.g. water pressure and traffic, also react, at least statically, on the complete shotcrete lining.

A particularity can be noticed when regarding the water pressure. Due to the installation method and the application of accelerators, the securing shotcrete is assumed to be permeable, when the firstsecuring is installed. On the other hand, the inner layers are watertight. The water pressure theoretically reacts in the contact surface to the first inner layer, but is absorbed by the entire system, if bonding is sufficient between the contact surfaces - in other words, between the first securing and the inner layers.

Another special feature of this method consists in the factthat the shotcrete shrinking is not compensated by expansionjoints, but by longitudinal reinforcement. This technique has already been successfully applied on concrete constructions, e.g. on reinforced pressurized water tanks, and globally results in an improved watertightness.

The monocoque shotcrete lining is calculated and measured in ring direction according to the usual calculation methods. Additional proof for the final support is given in longitudinal direction.

2. Suitability and Other Tests Carried Out prior to and during the Tunnel Construction

All technical and statical reflections can only work out if the material "shotcrete", used for tunnelling, provides the appropriate requirements. Results of shotcrete tests with the admixture microsilica, carried out by the company Elkem and the

Wesentlicher Bestandteil dieser Spritzbetonbauweise ist die Erstsicherung des Hohlraumes mit Spritzbeton.

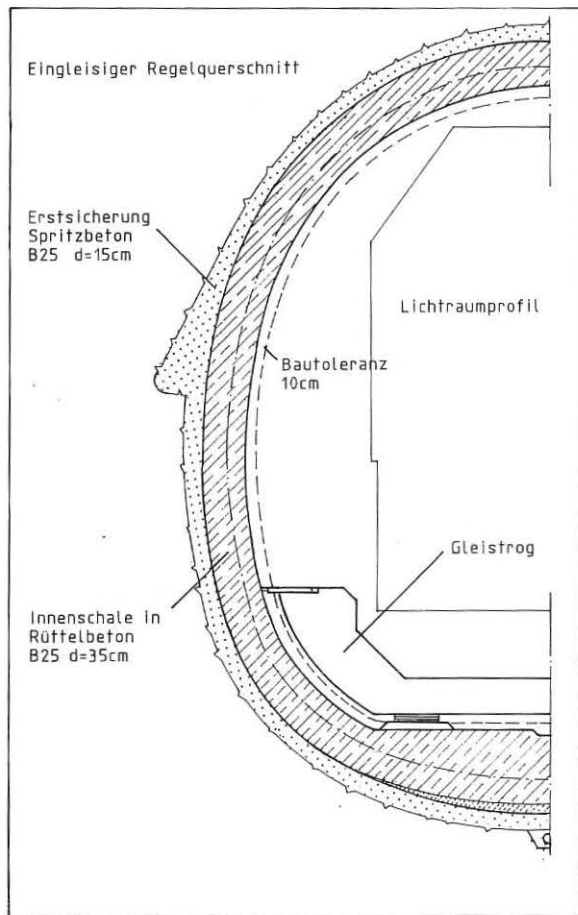


Bild 3: Konventionelle Spritzbetonbauweise mit nachträglich eingebauter Rüttelbetoninnenschale ohne Isolierung.

Fig. 3: Conventional Shotcrete Method with Subsequently Implemented Vibrated Concrete without Sealing

Die Verbesserung der Spritzbetonqualität, neue Erkenntnisse über das Zusammenwirken mehrerer unabhängig voneinander aufgetragener Spritzbetonschichten, die Optimierung von Berechnungs- und Bemessungsverfahren und die Verbesserung der Spritzausrüstungen, führten zur Überlegung und Ausführung der "Einschaligen Spritzbetonauskleidung" in einem Abwasserstollen.

Die umfangreichen Vorversuche, Versuche und Ausführung der einschaligen Stollenauskleidung bis hin zum Vorschlag einer Teststrecke für den Münchner U-Bahn-Bau, in knapper Form darzulegen, zwingt zu einer skizzenhaften Betrachtung mit der Beschränkung auf einzelne wesentliche Aspekte. Die folgende Ausführung bezieht sich

The improved shotcrete quality, new know-how about the inter-action between the multiple individually installed shotcrete layers, the optimization of calculation and measuring methods and the improved equipment, lead to the consideration and execution of the "monocoque tunnel lining" in a sewer tunnel. In order to briefly describe the extensive pilot tests, trials and execution of the monocoque tunnel lining, followed by the

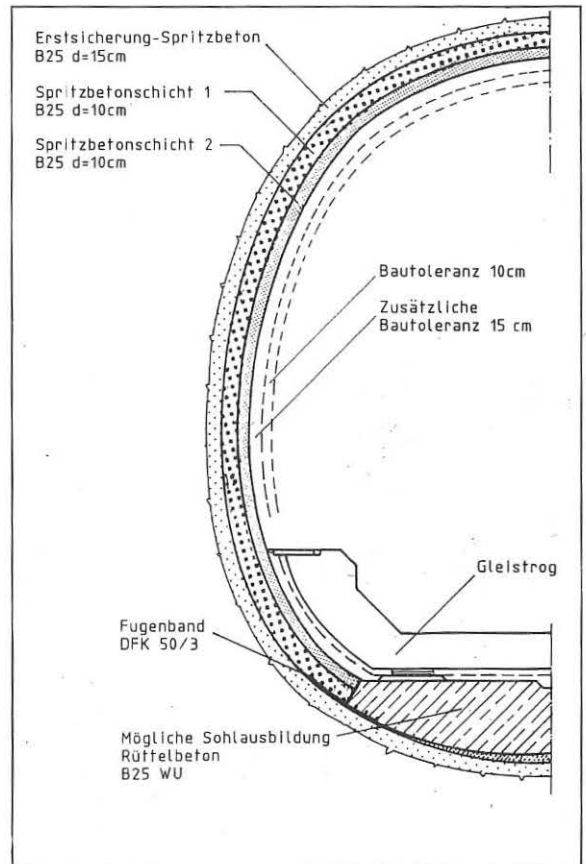


Bild 4: Einschalige Stollen- und Tunnelauskleidung in Spritzbeton

Fig. 4: Monocoque Shotcrete Tunnel Lining

proposal to construct a test line for the Munich subway, this presentation has to be reduced to rough outlines and will only cover the most important aspects.

2. The "Monocoque Shotcrete Tunnelling Method" Demonstrated on a 3.200 m Long Sewer Tunnel"

Technical Aspects

The essential idea of the monocoque shotcrete

and - because of the smaller quantity of aggregate needed - less harmful to our environment.

Considering the successful completion of the single permanent shotcrete lining of the 3200-m-long sewer tunnel as well as the favorable test results, we proposed to construct a 60-m-long test section of the Munich Subway in the same way.

Considerations with regard to sealing measures, savings of tunneling cost of the order of 20 to 30 % and technological improvements are convincing arguments in favor of the single permanent shotcrete lining method.

The application of this method in the forthcoming construction of the large-scale tunnel projects of the high-speed railway systems and of the urban transit systems has become reality.

1. Allgemeines

Bedenkt man, daß uns durch die Öffnung der Grenzen innerhalb von Europa große Verkehrstunnelbaumaßnahmen und durch die Infrastruktur unserer Städte ein erheblicher Verkehrstunnelbau mit U- und S-Bahn bevorsteht, so fordert dies konsequente Weiterentwicklungen im Stollen- und Tunnelbau. Eine dieser Weiterentwicklungen ist die heute allgemein bekannte Spritzbetonbauweise.

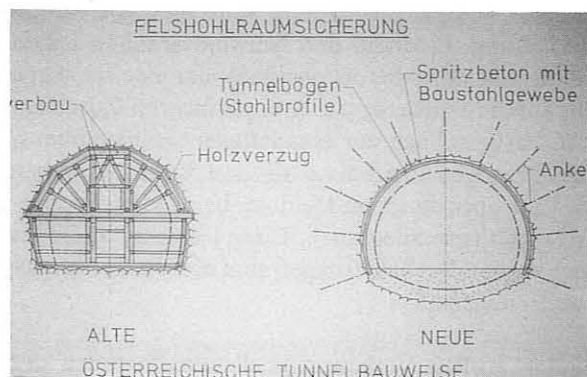


Bild 1: Alte und Neue Österreichische Tunnelbauweise

Fig. 1: Former and New Austrian Tunnelling Method

Spritzbeton, heute verbessert mit Siliciumdioxid z.B. in Form des Zusatzstoffes "Microsilica", ist ein Konstruktionsbeton.

- ein Beton, der hohen Qualitätsansprüchen gerecht wird,
- ein Beton, der nicht nur als Sicherungsmittel bei der Spritzbetonbauweise Anwendung findet, sondern speziell für die einschalige Stollen- und Tunnelauskleidung geeignet ist.

1. General

If one considers the fact that, due to the opening of borders within Europe and due to the infrastructure of our cities, major traffic tunnelling activities and significant subway constructions will be necessary, a consequent development in tunnelling is called for. The today well-known shotcrete method is one of them.



Bild 2: Spritzbeton als Sicherungsmittel im modernen Tunnelbau

Fig. 2: Shotcrete as a Securing Means in Modern Tunnelling

The major part of this shotcrete method is the first securing of the tunnel with shotcrete.

Shotcrete, nowadays improved by adding silicon dioxide (e.g. with the admixture "microsilica"), is a construction concrete:

- a concrete, which meets high quality expectations,
- a concrete not only used as a securing means for the shotcrete method, but especially suitable for the monocoque tunnel lining